

Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik Lehrstuhl Grafische Systeme



Diplomarbeit

Umsetzung eines vollautomatisierten Objekterfassungs-Systems über Methoden phasengestützter Streifenprojektion und Photogrammetrie

Verfasser:

Mathias Haberjahn

07.10.2006

Studiengang: Informatik Erst-Gutachter: Prof. Dr. Winfried Kurth Zweit-Gutachter: Dr. Martin Scheele (DLR) Betreuer: Dipl.-Phys.Thomas Mangoldt

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quelle und Hilfsmittel nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Cottbus, den 5. Oktober 2006

Danksagung

Mein Dank gebührt in erster Linie dem Lehrstuhl Grafische System, besonders Prof. Dr. Winfried Kurth und meinem Betreuer Dipl.-Phys. Thomas Mangoldt, welche für jede noch so trivial scheinende Fragestellung jederzeit zur Verfügung standen und wertvolle Hilfestellungen gaben.

Des weiteren danke ich hiermit Dipl.-Ing. Frank Henze vom Lehrstuhl für Vermessungskunde, der mich insbesondere bei fachspezifischen Problematiken bereitwillig unterstützte.

Zu guter Letzt gilt mein Dankeswort meiner Familie, meiner Mutter und meinem Vater, die mir über all die Jahre im außerordentlichem Maße den Rücken freihielt und bestärkend zur Seite stand.

1 Ei	nleitung	3
1.1 I	Motivation	.3
1.2 Ü	Überblick der Arbeit	.4
2 Ok	perflächenmessung von räumlichen Objekten	5
2.1 Ū	Überblick	.5
2.2	Streifenprojektionsverfahren	.6
2.2.1	Referenzbild-Binärisierung	.9
2.2.2	2 Gray-Code-Verfahren	10
2.2.3	Phase-Shift-Verfahren	11
2.3 I	Photogrammetrie	13
2.3.1	Innere Orientierung	14
2.3.2	2 Äußere Orientierung	15
2.4 I	Phasogrammetrie	17
3 Pr	inzip der Selbstkalibrierung	21
21 (Solbetkalibriorung	24
5.1 .	Serbstkalibrierung	21
3.2 I	Bündelblockausgleich	21
3.2.1	Ausgleichungsverfahren	23
3.2.2	Mathematisches Modell des Bundelblockausgleiches	27
4 Nä	iherungswert-Beschaffung	30
41	Relative Orientierung	30
4.1.1	Koplanaritätsbedingung	31
4.1.2	Berechnung	32
4.1.3	Genauigkeit	33
4.2	Absolute Orientierung	34
4.2 1	Der Verwärteschnitt	9 E
4.3 1	Berechnung	36
5 Αι	Ifbau und Funktionsweise der Messapparatur	38
5.1	Aufbau	38
5.2 I	Funktionsweise	39
6 Me	ess / Auswertungs-Software Scan 3D	12
61 1	Programmstruktur	42
611	Programmablauf	+∠ 42
6.1.2	2 Ein- und Ausgaben	43

0.2 70	fnanme-Prozess	44
6.2.1	Interne Bildauflösungen	45
6.2.2	Dynamische Mess-Sequenz-Erstellung	46
6.2.3	Umsetzung der Geräte-Unabhängigkeit	47
6.3 AL	swertungs-Prozess	49
0.3.1	Mess-Bild-Auswertung	50
0.3.1	. I Reletenz-Dilu-Elstellung	50
631	2 Objektifelstellung	52
631	 A Phase-Shift-Bild-Erstellung 	55
631	5 Triangulations-Bild-Erstellung	59
6.3.2	Kalibrierung der Messgeräte	61
632	1 Initialisierung des Bündelblockausgleiches	62
6.3.2	2 Skalierbarkeit der Messeinrichtung (KK, MK).	66
6.3.2	.3 Generierung von Bündeln	67
6.3.2	.4 Generierung von Startwerten	72
6.3.2	.5 Bündelblockausgleich	75
6.3.3	Berechnung der Objektkoordinaten	82
6.4 Be	dienung von S <i>can 3D</i>	83
6.4.1	Ansichten-Steuerung	83
6.4.2	Menü-Steuerung	84
6.5 Ins	tallationshinweise	86
7 Disk	ussion der Ergebnisse	87
7.1 Be	ispiel-Messung	87
7.1 Be	ispiel-Messung Mess-Konfiguration	87 87
7.1 Be 7.1.1 7.1.2	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder	87 87 88
7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung	87 87 88 90
7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse	87 87 88 90 93
7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse	87 87 88 90 93 93
7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2 1	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse bblemerörterung Test der relativen Orientierung	 87 87 88 90 93 96
7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.1 7.2.2	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse bblemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung	 87 87 88 90 93 96 99
7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse blemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung	87 88 90 93 93 96 96 99 00
7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse Oblemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung	87 88 90 93 96 96 99 00
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse belemerörterung Test der relativen Orientierung Test der relativen Orientierung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze	 87 87 88 90 93 96 99 00 04
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 	ispiel-Messung	87 87 88 90 93 96 96 99 00 00 04
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 8 Fazi 	ispiel-Messung	87 87 88 90 93 96 99 00 00 04 06
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 8 8 Fazi 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse belemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1	87 87 88 90 93 96 96 99 00 04 06
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 8 Fazi 9 Oue 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse blemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1	87 88 90 93 96 96 99 00 04 06 07
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 8 Fazi 9 Que 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse blemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1 Ilenverzeichnis 1	87 88 90 93 96 99 00 04 06 07
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 8 8 Fazi 9 Que 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse belemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1 t 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	87 87 88 90 93 96 99 00 04 06 07
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.3 Ve 8 8 Fazi 9 Que Anhang 	ispiel-Messung	87 87 88 90 93 96 99 00 04 06 07 09
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.3 Ve 8 Fazi 9 Que Anhang 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse belemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1 t A1 Abbildungsverzeichnis 1	87 87 88 90 93 96 99 00 04 06 07 09
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.3 Ve 8 8 Fazi 9 9 Que Anhang Anhang 100 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse oblemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1 Illenverzeichnis 1 A1 Abbildungsverzeichnis 1 A2 Gleichungsverzeichnis	87 88 90 93 96 99 00 04 06 07 09 11
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.3 Ve 8 Fazi 9 Que Anhang Anhang 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse oblemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1 Illenverzeichnis 1 A1 Abbildungsverzeichnis 1 A2 Gleichungsverzeichnis	87 88 90 93 96 99 00 04 06 07 09 11
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.3 Ve 8 Fazi 9 Que Anhang Anhang Anhang 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse oblemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1 Illenverzeichnis 1 A1 Abbildungsverzeichnis 1 A2 Gleichungsverzeichnis 1 A3 Tabellenverzeichnis	87 87 88 90 93 99 90 00 04 06 07 09 11 13
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.3 Ve 8 8 Fazi 9 9 Que Anhang Anhang Anhang Anhang 7.2 	ispiel-Messung Mess-Konfiguration Aufnahme-Bilder Bild-Auswertung Kalibrierungs-Ergebnisse oblemerörterung Test der relativen Orientierung Test der Bündelblockausgleichung Messwert-Betrachtung 1 rbesserungs-Ansätze 1 1 A1 Abbildungsverzeichnis 1 A2 Gleichungsverzeichnis 1 A3 Tabellenverzeichnis	87 87 88 90 93 96 99 00 04 06 07 09 11 13
 7.1 Be 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4 7.2 Pr 7.2.1 7.2.2 7.3 Ve 8 Fazi 9 Que Anhang Anhang	ispiel-Messung	87 87 88 90 93 96 99 00 04 06 07 09 11 13 14

1 Einleitung

1.1 Motivation

Heute gebräuchliche 3D-Messverfahren, basierend auf Streifenprojektion, Gray-Code-Projektion oder photogrammetrischen Messmethoden, messen die gewünschten räumlichen Objektkoordinaten auf indirekte Weise. Um die fehlende 3. Dimension wieder zu rekonstruieren, gehen neben den gemessenen Bildpunkten, Pixelwerten oder Phasenwerten auch sogenannte System-Parameter (innere und äußere Orientierung der Messgeräte) in die Koordinatenberechnung mit ein. Diese System-Parameter müssen normalerweise in einer Kalibrierungs-Prozedur vor oder nach dem eigentlichen Messvorgang bestimmt werden. Dazu werden zum Beispiel am Messobjekt manuell festgelegte Ziele (matching points) von festgelegten Positionen aus vermessen, um die späteren Messdaten eindeutig einzuordnen und bei Mehrpositionsaufnahmen die einzelnen Teilansichten (Punktwolken) zu einer Gesamtansicht zu vereinen. Die Nachteile liegen auf der Hand:

- rasches Ansteigen der benötigten Passmarken bei größer werdenden Objekten
- Eingriff in die Physis des Messobjektes
- zeitaufwändiger und benutzerunfreundlicher Messvorgang (nicht automatisierbar)
- Anfälligkeit gegenüber äußeren Einflüssen (zeitinstabil)
- kostenintensive Präzisionsgeräte

Die Photogrammetrie bietet nun eine Teillösung der genannten Probleme an. Durch die Vermessung eines Objektes aus mindestens zwei verschiedenen Ansichten erhält man pro Objektpunkt redundante, zusätzliche Messwerte. Durch diesen Informationszugewinn ist man nun in der Lage, während des Messvorganges neben den eigentlichen Objektkoordinaten noch zusätzlich die System-Parameter, über Methoden des Bündelausgleiches, mitzubestimmen. Dies führt zu einer automatisierten Selbstkalibrierung des Systems. Die Zeitstabilität äußerer Störungsfaktoren muss nun nur noch innerhalb der einzelnen Messabschnitte, für die verschiedene System-Parameter vorliegen, gewährleistet werden. Ebenso kann auf aufwändige Kalibrierungsstrategien und kostspieliges Kalibrierungsinventar verzichtet werden.

Es besteht jedoch weiterhin die Notwendigkeit des zeitintensiven und interaktiven Eingriffes beim Anbringen von Passmarken am Messobjekt, um die aus verschiedenen Messansichten gewonnen Daten dem jeweiligen Objektpunkt zuzuordnen [Luh03].

Das *Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik* entwickelte nun ein Verfahren, welches Methoden der phasengestützten Streifenprojektion und der Photogrammetrie vereint und zudem auf das Prinzip der *virtuellen Passmarken* zurückgreift (*Phasogrammetrie*).

Eine Kalibrierkamera, welche ihre Ausrichtung während des gesamten Messvorganges zum Messobjekt nicht verändert, legt automatisch *virtuelle Passmarken* auf dem Objekt an, die als Ausgangspunkt für die Selbstkalibrierung dienen. Ein manuelle Vergabe und anschließendes Zuordnen von Passmarken ist nun nicht mehr nötig, sondern wird *vollautomatisch* durch eine Software übernommen.

Diese Arbeit greift nun den Ansatz der Phasogrammetrie auf und versucht diesen in die Praxis zu überführen. Dabei wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- vollautomatisierter Aufnahme- und Auswertungsprozess
- Realisierung beliebig zweckmäßiger Messaufbauten
- berührungslose Interaktion mit dem Messobjekt während der Messung
- Verwendung von Amateur-Messgeräten (Kameras, Projektor)
- Unabhängigkeit der zu entwickelnden Software von den Messgeräten
- problemlose Skalierung der am Mess-Prozess beteiligten Kameras
- Implementierung eines flexiblen Bündelbockausgleich-Moduls mit automatisierter Startwertbeschaffung

1.2 Überblick der Arbeit

Die Kapitel 2 bis 4 stellen die theoretischen Vorarbeit und Kapitel 5 bis 8 den praktischen Anteil dieser Arbeit vor.

Kapitel 2 gibt einen kurzen Überblick über gängige Verfahren der aktiven Mustererkennung. Es wird dargestellt, wie die Phasogrammetrie Methoden der Streifenprojektion und der Photogrammetrie vereint, und eine Abgrenzung der drei Grundbegriffe vorgenommen.

Kapitel 3 beschäftigt sich intensiver mit der Selbstkalibrierung. Die mathematischen Grundlagen des Bündelausgleiches werden erläutert und der Bezug zur Phasogrammetrie hergestellt.

Im Kapitel 4 werden die in dieser Arbeit eingesetzten Verfahren zur Bestimmung der Startwerte für den Bündelblockausgleich vorgestellt.

Kapitel 5 beschreibt die verwendete Messeinrichtung, deren Komponenten und den generellen Messablauf.

Im Kapitel 6 wird die Steuerungs- und Auswertungs-Software *Scan 3D* eingeführt (Programmstruktur, Funktionsumfang, Bedienung).

Die Diskussion der Auswertungs-Ergebnisse und eine anschließende Erörterung der auftretenden Probleme behandelt das Kapitel 7. Des Weiteren wird ein kurzer Ausblick auf weitere, mögliche Entwicklungsstufen von Scan 3D gegeben.

Das 8. Kapitel schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung ab.

2 Oberflächenmessung von räumlichen Objekten

2.1 Überblick

Der heutige Stand der Technik erlaubt es, innerhalb eines kurzen Zeitraumes mit berührungslosen optischen Verfahren große Datenmengen zu erfassen. Punktwolken mit mehren hunderttausend Punkten zu erzeugen, ist längst nicht mehr nur hochmodernen, wohnzimmergroßen Messapparaturen überlassen. Selbst mit verhältnismäßig einfachen und kostengünstigen Lösungsvarianten lassen sich nun schon hervorragende Ergebnisse erzielen. Dies ist vor allem der rasanten Entwicklung der Technik zu verdanken. Besonders auf den Gebieten der digitalen Photografie, der Rechenleistung und der Speicherentwicklung wurden in den letzten Jahren große Sprünge gemacht. Dies bietet natürlich auch Vorteile für eine so rechenintensive Disziplin wie die Nahbereichsphotogrammetrie.

Bei den berührungslosen 3D-Abtastverfahren spielen besonders Verfahren mit Licht als Informationsträger eine große Rolle. Man kann Messprinzipien, die auf der Basis von Lichtwellen arbeiten, in folgende drei Kategorien unterteilen [Luh02]:

- 1. Triangulationsverfahren:
- Photogrammetrie (Einbild, Stereo- und Mehrbildauswertung), Winkelmesssysteme (Theodolithmesssysteme), Strukturierte Beleuchtung (Lichtschnitt, Streifenprojektion, Gray-Code-Projektion, Phasenmessung, Moiree-Verfahren), Fokusverfahren, Schattierungsverfahren etc.
- 2. Interferometrie:
- Optisch kohärente Laufzeitmessung, Holografie, Speckle-Interferometrie, Kohärenz-Radar
- 3. Laufzeitmessung:
- Entfernungsmessung mit optischer Modulationslaufzeitbestimmung (Laser-Scanning), Puls-Modulation



Abbildung 2-1: berührungslose Messverfahren [Luh02] S.7

Diese Arbeit wird sich hauptsächlich mit triangulationsbasierten Verfahren, wie der Streifenprojektion und der Photogrammetrie, beschäftigen (siehe Abbildung 2-1).

2.2 Streifenprojektionsverfahren

Man kann das Streifenprojektionsverfahren als Weiterentwicklung der Projektion von Lichtstrahlen (Punkte) und der Projektion von einzelnen Lichtebenen (Linien) ansehen. Wo bei der Projektion von Lichtstrahlen von einem Kamerastandpunkt noch eine Vielzahl an Bildaufnahmen nötig waren, um ein Objekt zu vermessen, benötigt die Streifenprojektion im günstigsten Falle oft nur noch eine einzige Aufnahme für den gleichen Erfolg.

Die einfachste Mess-Konstellation für ein Streifenmesssystem besteht aus einem Streifenprojektor und einer Matrixkamera. Dieser Sensorkopf vermisst nun von verschiedenen Blickpunkten aus das Objekt, um gegebenenfalls eine Rundumsicht zu erhalten. Zur Berechnung der Tiefeninformation des Objektes wird das *Prinzip der Triangulation* (siehe Abbildung 2-2) herangezogen.



Abbildung 2-2: Prinzip der Triangulation [Wil02] S.13

Sind der Abstand, die *Basis*, zwischen *A* und *B* (Projektor, Kamera), sowie die Winkel α und β gegeben, so lässt sich der Abstand von *O* (Objekt) zur Strecke *AB* wie folgt berechnen:

$$b_{1} = \frac{e}{\tan \alpha}$$

$$b_{2} = \frac{e}{\tan \beta}$$

$$b = b_{1} + b_{2} = \frac{e}{\tan \alpha} + \frac{e}{\tan \beta}$$

$$c = b \tan \alpha \cdot \tan \beta$$

 $\tan \alpha + \tan \beta$

Gleichung 2-1: Triangulation zur Basis

Die Entfernung des Objektpunktes O entweder zu A (c_1) oder B (c_2) bestimmt sich dann folgendermaßen:

$$c_1 = \left| \frac{e}{\sin \alpha} \right|$$
 bzw. $c_2 = \left| \frac{e}{\sin \beta} \right|$

Gleichung 2-2: Abstand Objektpunkt zum Messgerät

Anschließend bildet man mit dem zugehörigen Bildpunkt der Kameramatrix und der Kamerakonstante des betreffenden Messgerätes den räumlichen Richtungsvektor r zum Objektpunkt O. Nach einer Normierung von r wird der Vektor mit der entsprechenden Entfernungsangabe c multipliziert und man erhält den Objektpunktvektor mit dem Messgerätals Modellkoordinatenursprung.

Um das Objekt komplett zu vermessen, werden zu jedem mit der Matrixkamera erfassten Objektbildpunkt (Pixel) die passenden Winkel α und β und nach Gleichung 2-2 die Objektkoordinaten, bezogen auf das Messgerät, bestimmt. Dieses Verfahren bezeichnet man als *Lichtschnitt*.

Streifenprojektionsverfahren verwenden verschiedene Lichtmuster, die auf das Objekt projiziert werden. Dabei versuchen alle Muster (Gray-Code, Phase-Shift, Line-Shift) eine möglichst hohe Zuordnungsdichte zwischen den projizierten (*inverse Bildkoordinaten*) und den aufgezeichneten Musterpunkten (*Matrix-Koordinaten*) zu erreichen, um eine Triangulation durchführen zu können. Je größer diese Zuordnungsdichte ist, um so mehr Objektpunkte können trianguliert werden.



Abbildung 2-3: Prinzip der Streifenprojektion mit Beispielen [Wil02] S. 13

In der Praxis gestaltet sich die Triangulation folgendermaßen:

Wie in Abbildung 2-3 zu sehen ist, ergibt jeder unter einem bestimmten Winkel α auf das Objekt projizierte Lichtstrahl einen Punkt an einer bestimmten Stelle auf der Bildebene der Kameramatrix (*Matrix-Bildpunkt*). Aus der Position *p* dieses Punktes zur Bildmitte der Bildebene, der Kenntnis über den Winkel γ der Kamera zur Basis *b* und der Kamerakonstanten *f* (*f* ≈ Brennweite) lässt sich der Winkel β auf folgende Art berechnen:

 $\beta = 180^{\circ} - \gamma - \arctan(p \div f)$

Gleichung 2-3: Winkelberechnung Basisvektor zu Objektvektor

Analog ist die Vorgehensweise beim Streifenprojektor. Nur für einen Bildpunkt der Kameramatrix, der genau einem Punkt (inverser Bildpunkt) des projizierten Musters zugeordnet werden kann, ist es möglich, einen Projektionswinkel α zu bestimmen. Die Berechnung des Abstandes e zur Basis *b* erfolgt dann über das oben genannte Triangulationsverfahren (Gleichung 2-1).

Wie nun oben erwähnt stellt sich, anders als bei der Projektion von nur einem Punkt oder einer Lichtlinie pro Aufnahme, bei der gleichzeitigen Projektion mehrerer Lichtlinien (Streifen) das Problem der eindeutigen Zuordnung. Da man nicht immer gewährleisten kann, alle projizierten Steifen auch mit der Kamera zu erfassen (Verdeckung, schlechte Orientierung zum Projektor), scheidet ein einfaches Abzählen zur Bestimmung des aktuellen Streifens als Methode aus. Abhilfe schafft hier der sogenannte *Codierte Lichtansatz* [Wil02].

Hierbei werden nacheinander verschiedene Streifenmuster auf das Objekt projiziert und jeweils mit der Kamera aufgezeichnet. Die verschiedenen Ebenen der Streifenmuster bilden zusammen einen Code, der dem entsprechenden Objektbildpunkt zugeordnet werden kann (*Bildpunkt-Invertierung*). So ergibt sich pro Matrix-Bildpunkt ein Vektor mit binären Werten. Je nachdem ob der entsprechende Matrix-Bildpunkt bei einer Streifenmusterebenen-Projektion innerhalb oder außerhalb eines Streifens liegt, wird dem Vektor der Wert 1 oder 0 hinzugefügt. Diese Vorgehensweise wird nun für jede Kameraposition und jeden Matrix-Bildpunkt durchgeführt. Jeder Matrix-Bildpunkt besitzt anschließend einen binären Vektor

 $B = [b^1, b^2, \dots, b^n]$ (Codewort), dessen einzelne Werte (*Bits*) b^i genau dem Streifen-Status

der jeweiligen Projektion entsprechen. Man spricht daher von einem *Projektions- und Empfangswort*. Werden die Projektionsmuster mit unterschiedlichen Projektionswörtern aus einem n-stelligen Code codiert, kann die einem Matrix-Bildpunkt entsprechende Lichtebene anhand des Empfangswortes eindeutig zugeordnet werden. Bei *n* projizierten Ebenen können so bis zu 2^n verschiedene Codewörter erzeugt werden. Ein beispielhaftes Codierungsschema mit drei Projektionsebenen befindet sich in Tabelle 2-1:

Lichtebene	0	1	2	3	4	5	6	7
Projektionsmuster 1	0	0	0	0	1	1	1	1
Projektionsmuster 2	0	0	1	1	0	0	1	1
Projektionsmuster 3	0	1	0	1	0	1	0	1

Tabelle 2-1: Projektionsebenen bei Binärcode

Nach jeder Projektion wird ein Bild aufgenommen und binärisiert. Das Empfangswort in einem Matrix-Pixel (u,v) setzt sich aus den Bits der einzelnen Projektionen zusammen. Durch die nun durch dieses Codewort bestimmbare Lage des Streifens und die Projektorposition kann der inverse Bildpunkt der Projektor-Bildmatrix bestimmt werden. Zusammen mit dem zugehörigen Matrix-Bildpunkt der aufzeichnenden Kamera kann die Abstandsbestimmung des Objektpunktes auf dem Messobjekt mittels Triangulation durchgeführt werden.

2.2.1 Referenzbild-Binärisierung

Ein Problem stellt die *Binärisierung* des gemessenen Grauwertes pro Matrix-Bildpunkt dar. Man kann keinen einheitlichen Schwellwert heranziehen, um jeweils zu entscheiden, ob für einen Bildpunkt der gemessene Grauwert gerade noch zu einem aktiven (hellen) Streifen gehört oder nicht. Die Objektoberfläche weist häufig unterschiedliche Reflektionseigenschaften auf. Hinzu kommt, dass häufig bestimmte Objektelemente durch Verdeckung oder Schattenwurf einen von der Projektions-Beleuchtung unabhängigen Grauwert-Intensitätsverlauf besitzen. Es stellt sich also die Frage nach einem robusten Binärisierungsverfahren.

Ein weit verbreiteter Ansatz arbeitet mit der Hinzunahme eines *Referenzbildes*. Dieses Referenzbild wird jeweils für jede Kameraposition erstellt. Vor der eigentlichen Messung wird die gesamte Messszene einmal bei voller Beleuchtung und einmal bei abgeschalteter Beleuchtung aufgenommen. Aus den beiden Aufnahmen wird für jeden Matrix-Bildpunkt der Kamera ein Intensitäts-Mittelwert (*Referenzwert*) gebildet. Würden sich dann die beiden Intensitätswerte für einen Bildpunkt nur unwesentlich voneinander unterscheiden, so kann man diesen Objektpunkt als im Schatten befindlich oder nicht projiziert betrachten. Für die folgenden Aufnahme- und Auswerteschritte ist er somit nicht mehr von Interesse. Frühzeitig ist damit eine Ausdünnung hinsichtlich nicht-relevanter Messdaten möglich. Für die restlichen Bildpunkte dient nun der Referenzwert $s_{(u,v)}$ des Referenzbildes als Schwellwert für die Binärisierung. Nach der Projektion einer Ebene erfolgt die Binärisierung in einem Matrix-Bildpunkt $b_{(u,v)}$ mit seinem gemessenem Grauwert $g_{(u,v)}$ dann durch:

$$b_{(u,v)}^{k} = \begin{cases} 1 & g(u,v) \ge s(u,v) \\ 0 & g(u,v) < s(u,v) \end{cases}$$

Gleichung 2-4: Binärisierung des gemessenen Pixel-Grauwertes

Da für jeden Matrix-Bildpunkt ein separater Schwellwert existiert, werden durch die Binärisierung auch Materialeigenschaften wie Reflektion oder Oberflächenbeschaffenheit, die sich für jeden Objektpunkt unterscheiden können, berücksichtigt. Auch die dieser Arbeit zugrunde liegende Software *Scan 3D* greift auf ein, im Vergleich zum oben beschriebenen, leicht modifiziertes Referenzbild-Verfahren als Schwellwertgeber zurück.

2.2.2 Gray-Code-Verfahren

In der Regel wird als Codierungsverfahren in der binärcodierten Lichtschnitttechnik der *Gray-Code* verwendet (siehe Abbildung 2-4). Der Gray-Code wird als einschrittiger Code bezeichnet. Dies bedeutet, dass zwei aufeinanderfolgende Codeworte sich nur an einer Stelle (Bit) voneinander unterscheiden. Das hat den Vorteil, dass, falls durch einen Messfehler (Unschärfe der Kamera oder des Projektors, optische Störungen) eine Projektionsebene verschoben aufgenommen wird, das daraus resultierende Empfangswort in der Reihenfolge nur um eine Stelle zum reellen Empfangswort verschoben ist. Falls beispielsweise in Tabelle 2-1 das Projektionsmuster 1 nur um eine Stelle nach rechts verschoben aufgenommen wird, so lautet das Empfangswort für die 4. Lichtebene [0,0,0]. Im Projektionswort jedoch steht das Codewort [0,0,0] für die 0. Lichtebene. Der Binärisierungsfehler beträgt somit vier Schritte, was bei der späteren Triangulation zu starken Verzerrungen führt.



Abbildung 2-4: Gray-Code Projektion mit 7 Projektionsebenen [Luh02] S.481

Das Gray-Code-Verfahren toleriert Verschiebungen einzelner Codewörter besser, falls es sich nur um *eine* fehlerhafte Bit-Verschiebung handelt. Das fehlerhafte Empfangswort entspricht dann einem Nachbar-Empfangswort, was nur eine im Vergleich leichte Verzerrung

zur Folge hat. Dies erklärt die Popularität des Gray-Codes bei codierten Lichtschnitt-Verfahren.

Der n-stellige Gray-Code G_n ist rekursiv definiert. Ausgehend vom Initial-Code G_1 mit den beiden Wörtern 1 und 0 (Lichtstreifen ein und aus) ergibt sich der *k*-te Code G_k aus seinem Vorgänger G_{k-1} mit einer vorgestellten 0 und aus G_{k-1} in umgekehrter Reihenfolge mit einer vorgestellten 1:



G_3 :	0	0	0
	0	0	1
	0	1	1
	0	1	0
	1	1	0
	1	1	1
	1	0	1
	1	0	0

Abbildung 2-5: rekursiver Aufbau der Gray-Code-Ebenen [Wil02] S.16

Zwischen dem *k*-ten Codewort $[b^1, b^2, ..., b^n]$ des Binärcodes B_n und dem *k*-ten Codewort $[g^1, g^2, ..., g^n]$ des Gray-Codes G_n besteht die Beziehung:

 $b^{i} = g^{1} + g^{2} + \dots + g^{n}$

mit: $b^1 = g^1$ und $g^i = b^{i-1} + b^i$ i = 2...n

Gleichung 2-5: Gray-Code Aufbau

Über diese Beziehung kann aus dem Empfangswort des Gray-Codes das entsprechende Codewort des Binärcodes bestimmt werden, das der projizierten Streifennummer entspricht. Projektionswinkel und Empfangswinkel sind somit bestimmbar und der Objektpunkt kann trianguliert werden.

2.2.3 Phase-Shift-Verfahren

Trotz seiner Beliebtheit und Stabilität besitzt der Gray-Code nur ein ungenügendes Auflösungsvermögen. Bei einer erwünschten horizontalen Abtast-Punktdichte von n Punkten werden lg(n) Projektionsebenen benötigt. So können bei 7 Projektionsebenen maximal 128 Objektpunkte in Abtastungsbreite erfasst werden, da man nur einen inversen Bildpunkt pro projizierten Streifen genau zuordnen kann. Daher wird in den meisten Fällen, so auch in

dieser Arbeit, das Gray-Code-Verfahren um eines der aus der Interferometrie bekannten Verfahren erweitert, das sogenannte *Phase-Shift-Verfahren*.

Hierbei kann im Gegensatz zum Gray-Code-Verfahren direkt mit den gemessenen Intensitätswerten gearbeitet werden. Projiziert werden mehrere Bilder (meist vier), die einen sinusförmigen Intensitätsverlauf darstellen (Abbildung 2-6). Da die aufeinanderfolgenden Bilder jeweils in ihrem Kurvenverlauf um eine konstante Gradzahl (bei vier Bildern 90°) verschoben sind, spricht man vom *Phasen-Schieben*. Nun stellt sich die Frage, warum nicht ein Phasenbild zur Bestimmung des jeweiligen Phasenwertes pro Objektbildpunkt genügt. Einerseits werden durch Mittelwertbildung der vier Werte pro Bildpunkt eventuelle Messfehler in einem der vier Messwerte abgedämpft. Andererseits, da die Sinus-Funktion nicht eineindeutig ist, wird zur korrekten Phasenwertbestimmung mindestens noch ein weiterer phasenverschobener Wert benötigt, um den zugehörigen Sinus-Quadranten bestimmen zu können.



Abbildung 2-6: vier Projektionsmuster beim Phase-Shift: jeweils um 90° verschoben [Wil02] S.17

Der Intensitätsverlauf entlang der Streifenstruktur lässt sich wie folgt beschreiben:

 $I(x) = I_0 \cdot (1 + k \cdot \cos(dq(x)))$

mit I_0 : Hintergrundintensität

k: Kontrast

dq(x): Phasenlage innerhalb einer Periode

Bei einem 4er-Phasenshift mit einer Phasenverschiebung von jeweils 90° erhält man somit folgende vier Gleichungen:

 $I_{1}(x) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot \cos(dq(x) + 0^{\circ})) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot \cos(dq(x)))$ $I_{2}(x) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot \cos(dq(x) + 90^{\circ})) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot -\sin(dq(x)))$ $I_{3}(x) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot \cos(dq(x) + 180^{\circ})) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot -\cos(dq(x)))$ $I_{4}(x) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot \cos(dq(x) + 270^{\circ})) = I_{0} \cdot (1 + k \cdot \sin(dq(x)))$

Gleichung 2-6: Intensitätsverlauf beim 4er-Phasenshift

Subtrahiert man $I_4(x)$ von $I_2(x)$ und $I_3(x)$ von $I_1(x)$, so ergibt sich aus Division:

$$\frac{I_2(x) - I_4(x)}{I_1(x) - I_3(x)} = \frac{-2 \cdot I_0 \cdot k \cdot \cos(dq(x))}{-2 \cdot I_0 \cdot k \cdot \sin(dq(x))} = \tan(dq(x))$$

Gleichung 2-7: Intensitätsverlauf beim 4er-Phasenshift (zusammengefasst)

Für die gesuchte Phasenlage erhält man schließlich:

$$dq(x) = \arctan \frac{I_2(x) - I_4(x)}{I_1(x) - I_3(x)}$$

Gleichung 2-8: Umrechnung Phasen-Intensitäten in Bogenmaß

Diese Rechenoperationen erfolgen für jeden Matrix-Bildpunkt.

Die Leistungsfähigkeit hängt auch bei diesem Verfahren von den Reflektionseigenschaften der Objektoberfläche ab. In der Regel werden homogene, diffus reflektierende Oberflächen vorausgesetzt. Spiegelungen und Glanzeffekte müssen durch Präparation der Oberfläche (mit weißem Pulver bestäuben) und geeignete Umgebungsbeleuchtung vermieden werden.

Zum größten Problem beim Phase-Shift-Verfahren zählt die Erzeugung eines kontinuierlichen Sinus-Musters mit einem Projektor. Dies kann zum Einen durch ein gezieltes Unscharfstellen des Projektors erfolgen. Nachteil hierbei ist, dass die eingestellte Unschärfe nur in einem bestimmten Abstand zum Projektor den erwünschten Effekt erzielt. Variiert das Objekt in seinem Abstand stark zum Projektor, so wird das Phase-Shift-Muster nur teilweise exakt auf das Objekt sinusförmig abgebildet (*Tiefenschärfe*).

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung sinusförmiger Muster mit rasterbasierten Projektoren ist das Anbringen optischer Tiefpassfilter vor dem Projektor. Da dies nur in einer Streifenrichtung möglich ist, ist keine Kreuzprojektion mehr möglich, die z.B. für photogrammetrische Verfahren, wie in dieser Arbeit, notwendig ist [Boe01].

Das kontinuierlich messende Phase-Shift-Verfahren wird nun wie oben angedeutet meist als Erweiterung des diskret messenden Gray-Code-Verfahrens benutzt, um Subpixelgenauigkeit zu erlangen. Da das Phase-Shift-Verfahren nur in einem Bereich zwischen $-\pi$ und $+\pi$ eindeutig ist, wird die Wellenlänge der Sinus-Kurve nach der doppelten Breite eines Streifens der vorher durchgeführten Gray-Code-Projektion bemessen.

In dieser Arbeit entspricht die projizierte Sinus-Welle genau der vierfachen Breite eines Streifens, um eine bessere Auflösung der projizierten Kurve zu erhalten.

2.3 Photogrammetrie

Die oben genannten Verfahren der Streifenprojektionstechnik beruhen alle auf der Kenntnis der Orientierungsdaten der beteiligten Messgeräte (Projektor, Kamera). Die Problematik liegt auf der Hand. Aufwändige Kalibrierungsroutinen müssen vor oder während der Messung durchgeführt werden, um diese Daten zu ermitteln. Über Methoden der Photogrammetrie ist es nun möglich, alle am Messvorgang beteiligten Objekte, inklusive des zu erfassenden Objektes, mathematisch geschlossen in Form der *Kollinearitätsgleichungen* abzubilden.

Grundlage der Photogrammetrie ist die *zentralperspektivische Abbildung*. Form und Lage des Objektes werden über die Rekonstruktion von Strahlenbündeln ermittelt, wobei jeder Bildpunkt P^{t} zusammen mit dem Projektionszentrum O eine Raumrichtung des entsprechenden Strahls zum Objektpunkt P festlegt (Abbildung 2-7).

Sind die reale Abbildungsgeometrie in der Kamera (*innere Orientierung*) und ihre Lage im übergeordneten Koordinatensystem (*äußere Orientierung*) bekannt, kann jeder Bildstrahl im 3D-Raum beschrieben werden. Aus dem Schnitt in einem Objektpunkt von mindestens zwei korrespondierenden (homologen), räumlich verschiedenen Bildstrahlen lässt sich dieser Objektpunkt dreidimensional bestimmen. In der Praxis bedeutet dies, dass von mindestens zwei verschiedenen Perspektiven ein Objektpunkt betrachtet werden muss.



Abbildung 2-7: photogrammetrisches Messprinzip [Luh02] S.8

2.3.1 Innere Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung beschreiben die innere Geometrie der Messkamera, sowie Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive. Ausgegangen wird vom Modell der *Lochkamera* (Abbildung 2-8). Dabei wird die Kamera als räumliches System betrachtet, das aus der ebenen Bildfläche (Film, Bildsensor-Matrix) und dem davor angebrachten Objektiv mit dem Projektionszentrum besteht. Die innere Orientierung beschreibt nun die Lage dieses Projektionszentrums zur Bildebene der Messkamera.



Abbildung 2-8: Innere Orientierung (Lochkamera-Modell) [Luh02] S.119

Die wichtigsten Kenngrößen der inneren Orientierung, die mit in die Kollinearitätsgleichungen eingehen, sind:

Kamerakonstante c	:	Abstand des Projektionszentrums zur Bildebene; bei einer unendlichen Fokussierung entspricht <i>c</i> der Brennweite.
Bildhauptpunkt H'	:	Lotfußpunkt des Projektionszentrums zum Bildkoordinatensystem (x_0, y_0); häufig gleich der Bildmitte
Parameter der		
Abbildungsfehler	:	Funktionen oder Parameter, die Abweichungen vom
		zentralperspektivischen Modell beschreiben (z.B.
		Radialverzerrung, Tangentialverzerrung)

Im Normalfall weicht eine für die Messung nutzbare Kamera vom Grundmodell der Lochkamera ab. Der Einsatz zusätzlicher Objektive, instabile Kameraaufbauten oder eine nicht senkrecht zur optischen Achse stehenden Bildebene erfordern individuelle Kalibrierungen. Bei Amateur-Kameras weisen so zum Beispiel die Linsen oftmals erhebliche Abbildungsfehler auf.

2.3.2 Äußere Orientierung

Die sechs Parameter der äußeren Orientierung legen die räumliche Lage der Messkamera im übergeordneten Koordinatensystem fest.

Über drei räumliche Rotationen (ω , φ , κ) und drei Translationen (X_0 , Y_0 , Z_0) wird das Bildkoordinatensystem in das übergeordnete Koordinatensystem abgebildet (siehe Abbildung 2-9).



Abbildung 2-9: Äußere Orientierung [Luh02] S. 235

Die räumliche Lage des Bildkoordinatensystems des bildaufzeichnenden Gerätes wird durch den Vektor $X_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ zum Projektionszentrum O' definiert. Die räumliche Drehung wird

durch eine Drehmatrix $R = R_{\omega} \cdot R_{\phi} \cdot R_{\kappa}$ definiert, welche durch die drei Drehwinkel ω , φ und κ um die Koordinatenachsen des übergeordneten Koordinatensystems dargestellt werden kann.

Die in das übergeordnete Koordinatensystem transferierten Koordinaten X = (X, Y, Z) des gesuchten Objektpunktes *P* können über den Ortsvektor X_0 und dem Vektor X^* vom Bildkoordinatenursprung zum Objektpunkt hergeleitet werden:

$$X = X_0 + X^*$$

Gleichung 2-9: Zusammenhang Objektpunkt-Vektor im MKS und WKS

Da der Vektor X^* nicht direkt bestimmbar ist, wird er über den in der gleichen Richtung liegenden Bildvektor $x^* = (x^*, y^*, z^*)$ bestimmt, nachdem dieser mit der Drehmatrix und einem Maßstabsfaktor *m* in das übergeordneten Koordinatensystem transformiert wurde ($z^* = -c$):

 $X^* = m \cdot R \cdot x'$

Gleichung 2-10: Gleichsetzen von Vektor X*

Daraus folgt für den Objektpunkt-Vektor X:

 $X = X_0 + m \cdot R \cdot x'$

Gleichung 2-11: Ersetzung von Vektor X*

Durch Umkehrung von Gleichung 2-11 und zusätzlicher Erweiterung um den Bildhauptpunkt $H^{i}(x_{0}^{i}, y_{0}^{i}) = x_{0}^{i}$ und einen Korrekturterm $\Delta x^{i} = (\Delta x^{i}, \Delta y^{i})$ für die Bildkoordinaten folgt:

$$x' - x'_0 - \Delta x' = 1/m \cdot R^{-1} \cdot (X - X_0)$$

Gleichung 2-12: Erweiterung um Bildhauptpunkt und Korrekturterm

Durch Einsetzen von Gleichung 2-10 und Gleichung 2-11 in Gleichung 2-12 wird der Maßstabsfaktor *m* eliminiert, und es folgen die *Kollinearitätsgleichungen*:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + z' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned}$$

Gleichung 2-13: Kollinearitätsgleichungen

Die Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 2-13) beschreiben den mathematischen Zusammenhang der zentralperspektivischen Abbildung unter Einbeziehung der Bildkoordinaten (x^{i}, y^{i}), der Objektpunktkoordinaten (X, Y, Z), der inneren ($\Delta x^{i}, \Delta y^{i}, x^{i}_{0}, y^{i}_{0}, c$) sowie äußeren Orientierung ($\omega, \varphi, \kappa, X_{0}, Y_{0}, Z_{0}$) des Bildes.

Sie werden als die Grundlagen der Photogrammetrie bezeichnet, da sie Ausgangspunkt der wichtigsten Anwendungen der Photogrammetrie wie *Vorwärtsschnitt*, *Rückwärtsschnitt* und des *Bündelausgleiches* sind.

Prinzipiell erhält man über die Zentralprojektion zwischen einem Objektpunkt, dem Projektionszentrum der Kamera und dem Objektbildpunkt zuerst nur eine Richtungsinformation. Auf diesem Bildstrahl könnten sich noch unzählige andere Objektpunkte befinden. Zur Bestimmung der Objekt-Koordinaten fehlt somit die Länge. Erst wenn der Objektpunkt mit einem weiteren geometrischen Element zum Schnitt gebracht werden kann, z.B. mit einer weiteren Raumgeraden aus einer anderen Perspektive, liegen genügend Informationen vor, den Punkt im Raum absolut zu bestimmen.

Jedes beteiligte Bild spannt über dessen gemessene Bildpunkte (*homologe Bildpunkte*) über sein Projektionszentrum ein räumliches Strahlenbündel zu den Objektpunkten auf (Abbildung 2-7). Verknüpft man sämtliche von verschiedenen Positionen aus aufgenommen Bildern entstammende Strahlenbündel über ihre homologen Objektpunkte (*Verknüpfungspunkte*), so entsteht ein dichtes Netz von zusammenhängenden Raumstrahlen, das bei geeigneter Aufnahmekonfiguration (zum Beispiel große Winkel zwischen den Bündelstrahlen) eine hohe geometrische Stabilität aufweist. Als homologe Bildpunkte werden Bildpunkte verschiedener Bildansichten bezeichnet, die den gleichen Objektpunkt abbilden.

Mit der Methode der *Bündeltriangulation* (Bündelausgleich) lassen sich über diesen geometrischen Zusammenhang, mittels überbestimmter Ausgleichsrechnung, die Orientierungswerte der beteiligten Kameras und die zu messenden Objektpunkte bestimmen (Selbstkalibrierung siehe Abschnitt 3) [Luh02].

2.4 Phasogrammetrie

Die Phasogrammetrie ist ein am Fraunhofer-Institut in Jena (Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik) entwickeltes 3D-Mess-Verfahren. Wie aus dem Namen schon hervorgeht, stellt sie eine mathematisch geschlossene Verschmelzung der Methodiken der Photogrammetrie und der aktiven Musterprojektion dar. Man verwendet hierbei einen Messaufbau, bei dem auf das Objekt von mindestens zwei verschiedenen Positionen Streifenmuster (Gray-Code und Phase-Shift) projiziert werden. Die Streifenmuster werden horizontal und anschließend, um 90° gedreht, vertikal projiziert. Durch diese Projektionsart können pro Matrix-Bildpunkt der Kamera dem Projektor zwei Koordinatenwerte (horizontal und vertikal) zugeordnet werden (übliche Streifenprojektion nur einer). Somit kann der Projektor als *inverse Kamera* betrachtet werden, auf den die gleichen photogrammetrischen Methoden (Koordinatenberechnung, Kalibrierung) angewendet werden können wie auf eine Messkamera. Zur Koordinatenbestimmung des Objektes gehen nun nur noch die vom Projektor abhängigen Orientierungswerte mit ein, was bei geometrisch stabil aufgebauten Projektoren zu hervorragenden Messergebnissen führt. Eine der Kameras bleibt während des gesamten Messvorganges ortsfest zum Objekt. Ihre Bildpunkte dienen daher als *virtuelle homologe Punkte*, die die Grundlage für spätere photogrammetrische Auswertungen bilden. Man spricht hierbei von der Kalibrierkamera, da ihre eigenen direkten Matrix-Bildpunkte nur für die Zuordnung der von ihr von verschiedenen Positionen aus aufgezeichneten inversen Bildpunkte des Projektors dienen. Die innere und äußere Orientierung dieser Kalibrierkamera ist daher für die weitere Auswertung nicht von Belang.

Abbildung 2-10 veranschaulicht das geometrische Aufnahmemodell der Phasogrammetrie, ausgehend von einer ortsfesten Kalibrierkamera und zwei Projektorpositionen. Da mit dem Phase-Shift-Verfahren gearbeitet wird, erhält man pro Objektpunkt über einen virtuellen homologen Matrix-Bildpunkt (*x*['],*y*[']) der Kamera vier Phasenkoordinaten. Diese gemessenen Phasenwerte ($\delta x^{(i)}, \delta y^{(i)}$) definieren zusammen mit ihrem Projektionszentren ($O_p^{(i)}$) räumliche Strahlenbündel, die wie die Strahlenbündel der Photogrammetrie zur Koordinatenberechnung und System-Kalibrierung herangezogen werden können.



Abbildung 2-10: geometrisches Aufnahmemodell der Phasogrammetrie [Luh02] S.483

Die Vereinigung der Streifenprojektion und der Photogrammetrie erfolgt mathematisch über die aus der Photogrammetrie stammenden Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 2-13). Dabei werden in den Gleichungen die üblichen Bildkoordinaten (x^i, y^i) der Kamera durch die den Projektor beschreibenden Phasenkoordinaten ($\delta x^{(i)}, \delta y^{(i)}$) und die Bildhauptpunkt-Koordinaten der Kamera durch die den Hauptpunkt des Projektor-Projektions-Matrix beschreibenden Phasenkoordinaten ($\delta x_0^{(i)}, \delta y_0^{(i)}$) ersetzt.

Zur Überführung in eine Längeneinheit werden die Phasenwerte mit $\lambda / 2\pi$ multipliziert ($\lambda \approx$ Gitterkonstante im Projektor). Damit ergibt sich aus den Kollinearitätsgleichungen der Photogrammetrie:

$$\begin{split} \delta_x^{(i)} &= \delta_{x0}^{(i)} - \left(c^i \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot \frac{r_{11i} \cdot (X - X_0) + r_{21i} \cdot (Y - Y_0) + r_{31i} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13i} \cdot (X - X_0) + r_{23i} \cdot (Y - Y_0) + r_{33i} \cdot (Z - Z_0)} + d\delta_x^{(i)} \\ \delta_y^{(i)} &= \delta_{y0}^{(i)} - \left(c^i \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot \frac{r_{12i} \cdot (X - X_0) + r_{22i} \cdot (Y - Y_0) + r_{32i} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13i} \cdot (X - X_0) + r_{23i} \cdot (Y - Y_0) + r_{33i} \cdot (Z - Z_0)} + d\delta_y^{(i)} \end{split}$$

Gleichung 2-14: Kollinearitätsgleichungen mit Phasenkoordinten [Luh02] S. 484

mit

i : Index für die Projektorposition

 $d\delta x, y^{(i)}$: Verzeichniskorrekturterm

Da in die Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 2-14) nur die Phasenwerte (inversen Bildkoordinaten) des Projektors eingehen, ohne Einbeziehung der Kamera-Parameter, spricht man auch von einer phasenwert-basierten Photogrammetrie. Den Aufnahme- und Auswerteprozess zeigt Abbildung 2-11:



Abbildung 2-11: Aufnahme- und Auswerteprozess der Phasogrammetrie

Die Phasogrammetrie ist durch diese Messstrategie in der Lage, die Kollinearitätsgleichungen überzubestimmen. Das heißt, durch Ausgleichsrechnung mit mehreren homologen Verknüpfungspunkten werden zuerst die Systemparameter (innere und äußere Orientierung des Projektors) und anschließend die Objektkoordinaten bestimmt. Dieser Vorgang wird als *Selbstkalibrierung* bezeichnet.

Zur Rundumvermessung von Objekten lassen sich phasogrammetrische Systeme auch zum Netzwerk erweitern, indem z.B. mehrere Kalibrierkameras ortsfest um das Objekt positioniert werden und ein oder mehrere Projektoren das Objekt solange von allen Ansichten vermessen, bis jeder Objektpunkt mindestens zweimal erfasst wurde.

Phasogrammetrische Messsysteme zeichnen sich daher durch folgende Punkte aus:

- aufgrund der Simultankalibrierung unempfindlicher gegen äußere Einflüsse wie Temperaturschwankungen und Vibrationen
- aufwändige Kalibrierungsprozeduren und kostenintensive Kalibrierungstechnik entfallen
- System wird vollständig durch den Projektor beschrieben; kein Einfluss der Kamera-Parameter (weniger Fehlerquellen)
- keine manuelle Interaktion mit dem Objekt (Passmarken) durch das Modell der virtuellen Passpunkte
- Ganzkörper-Vermessungen über automatisierte Rundumvermessung möglich
- relative Messgenauigkeit von bis zu 1:100000 [NKH03]

3 Prinzip der Selbstkalibrierung

3.1 Selbstkalibrierung

Wie man den Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 2-13) entnehmen kann, ergeben sich bei bekannten Orientierungswerten drei unbekannte Werte, die gesuchten Koordinatenwerte, pro Objektpunkt. Man muss demnach mindestens drei Gleichungen pro Objektpunkt aufstellen, um das Gleichungssystem nach den Koordinaten aufzulösen. Dieser Ansatz wird in der üblichen Streifenprojektion verfolgt (drei Werte: ein indirekter Projektorwert, zwei direkte Kamerawerte). Wenn nun diese Orientierungswerte nicht vorliegen, lässt sich das Lösungssystem nicht eindeutig bestimmen.

Im Abschnitt zur Phasogrammetrie wurde das Prinzip der inversen Kamera vorgestellt. Durch eine Rotation der Projektion erhält man einen vierten, linear unabhängigen Koordinaten-Wert pro Objektpunkt. Dieser entscheidende vierte überschüssige Messwert führt zu einer Überbestimmung der Kollinearitätsgleichungen. Mit Hilfe des Ausgleichungssatzes ist es nun möglich, durch Hinzunahme mehrerer Messpunkte (jeweils vier Gleichungen), ein Normalgleichungssystem aufzustellen. welches linearisiertes die gesuchten Orientierungsparameter liefert. Werden im Rahmen dieser Ausgleichsrechnung nur zuvor gemessene Bildkoordinaten (zum Beispiel Phasenkoordinaten bei der Phasogrammetrie) eingesetzt, so spricht man von Selbstkalibrierung. Vor oder während (online) der Messung somit Kalibrierung Systems erfolgen. mit anschließender kann die des Objektkoordinatenbestimmung. Wird ein Objektpunkt von mehr als zwei Positionen durch den Projektor und die Kamera erfasst, lässt sich die Anzahl der homologen Bildpunkte pro Bündel und die Redundanz noch weiter erhöhen und somit die Messgenauigkeit steigern.

Das Modell, das die verschiedenen Ansichten (Strahlenbündel) auf ein Objektpunkt mathematisch in Form der Kollinearitätsgleichungen vereint, mit dem Ziel der Koordinatenund Orientierungsbestimmung, ist der *Bündelblockausgleich* (Bündeltriangulation).

3.2 Bündelblockausgleich

Die rechnerische Verknüpfung der Strahlenbündel erfolgt mit Hilfe homologer Bildpunkte. Der Bezug zu einem übergeordneten Objektkoordinatensystem kann durch eine minimale Anzahl dieser homologen Punkte hergestellt werden, so dass größere passpunktlose Räume durch Mehrbildverbände überbrückt werden können (besonders Luftbildphotogrammetrie). Die wichtigste Bedingung für die Verknüpfung der Strahlenbündel ist das möglichst optimale Schneiden verschiedener Strahlenbündel in gemeinsamen homologen Punkten (Abbildung 3-1).



Abbildung 3-1: Schnitt von Strahlenbündeln [Luh02] S.266

Wie im Abschnitt zur Selbstkalibrierung beschrieben, werden nun in einem überbestimmten Gleichungssystem 3D-Objektkoordinaten, Orientierungsparameter der Bilder und weitere Modellparameter durch Ausgleichung berechnet. Da alle gemessenen Größen und unbekannten Parameter in einem simultanen Berechnungsvorgang berücksichtigt werden, ist der Bündelblockausgleich das genaueste und leistungsfähigste Verfahren zur Punktbestimmung und Bildorientierung in der Photogrammetrie.

Die Hauptaufgaben des Bündelblockausgleiches umfassen folgende Punkte:

- Lösung großer Normalgleichungssysteme (bis einige tausend Unbekannte)
- Beschaffung von Näherungswerten der Unbekannten (zur Linearisierung des Gleichungssystems)
- Aufdeckung und Elimination grober Datenfehler

In der Praxis unterscheidet man zwei getrennt entwickelte Anwendungsbereiche: zum Einen den Bündelblockausgleich in der Luftbildphotogrammetrie und zum Anderen die Nahbereichsphotogrammetrie.

Abbildung 3-2 stellt den Datenfluss der Bündeltriangulation dar. Eingabewerte sind vorrangig die gemessenen Bildkoordinaten. Zusätzliche Informationen zum Obiektraum (gemessene Strecken, Winkel, Punkte) können ebenso berücksichtigt werden und dienen der Maßstabsdefinition und der Lage des Objektkoordinatensystems. Zur Linearisierung der Gleichungssysteme müssen Näherungswerte für alle unbekannten Parameter mit angegeben werden. Diese können z.B. für einfache Messaufbauten aus Planungsdaten oder komplexeren Aufbauten werden Aufbauskizzen entnommen werden. Bei die Näherungswerte durch iterative Verfahren bestimmt (siehe Abschnitt 4). Ergebnisse des Bündelblockausgleiches Objektkoordinaten sind vor allem die und die Orientierungsparameter der Aufnahmebilder.



Abbildung 3-2: Datenfluss der Bündeltriangulation [Luh02] S.269

3.2.1 Ausgleichungsverfahren

Ausgleichungsverfahren kommen dann zum Einsatz, wenn aus einer bestimmten Anzahl beobachteter (gemessener) Größen eine bestimmte Anzahl unbekannter Größen bestimmt werden sollen, wobei die Parameter in einem funktionalen Zusammenhang stehen. Falls die Zahl der gegebenen beobachteten Größen die der Unbekannten übersteigt, so kann im Allgemeinen keine eindeutige Lösung mehr ermittelt werden. Man spricht in diesem Fall von einem überbestimmten Gleichungssystem. Die Lösung erfolgt in einer Ausgleichs-Schätzung, welche versucht innerhalb von funktionalen und stochastischen Modellen die optimalen Lösungs-Parameter zu ermitteln.

Funktionales Modell:

Die gegebenen Beobachtungs-Parameter (z.B. Bildpunkte) werden durch den Beobachtungsvektor *L* zusammengefasst:

 $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)^T$

Gleichung 3-1: Beobachtungsvektor L

Der Unbekanntenvektor X fasst die Werte der unbekannten, gesuchten Parameter zusammen:

 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$

Gleichung 3-2: Unbekanntenvektor X

Für die Lösbarkeit des Ausgleichungsproblems muss die Anzahl n der Beobachtungen L mindestens genauso groß wie die Anzahl u der Unbekannten X sein.

Das *funktionale Modell* beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen den "wahren" Werten der Beobachtungen \widetilde{L} und der Unbekannten \widetilde{X} , der durch den Funktionenvektor ϕ beschrieben wird:

$$\widetilde{L} = \varphi(\widetilde{X}) = \begin{bmatrix} \varphi_1(\widetilde{X}) \\ \varphi_2(\widetilde{X}) \\ \vdots \\ \varphi_n(\widetilde{X}) \end{bmatrix}$$

Gleichung 3-3: funktionales Modell

Da aufgrund von Messunsicherheiten die wahren (exakten) Werte nicht bekannt sind, werden der Beobachtungsvektor *L* durch die Verbesserungen *v* zum Vektor \hat{L} und der Unbekanntenvektor *X* durch die geschätzten (ausgeglichenen) Unbekannten \hat{X} ersetzt. Hieraus ergeben sich die Verbesserungsgleichungen:

$$\hat{L} = L + v = \varphi \left(\hat{X} \right)$$

Gleichung 3-4: Verbesserungsgleichungen

Die geschätzten Unbekannten lassen sich durch Näherungswerte X^0 weiter zerlegen in:

$$X = X^0 + \hat{x}$$

Gleichung 3-5: Verbesserungen \hat{x}

Es sind nun nur noch die Differenz-Beträge \hat{x} zu bestimmen.

Über die Näherungswerte X^0 lassen sich jetzt über den funktionalen Zusammenhang (Gleichung 3-3) auch für die Beobachtungen Näherungswerte ermitteln

$$L^0 = \varphi(X^0),$$

die abgezogen von den beobachteten Werten *L* die gekürzten Beobachtungen liefern:

$l = L - L^0$

Gleichung 3-6: gekürzte Beobachtungen /

Die gekürzten Beobachtungen sind ein Indikator für die Güte der Näherungswerte X^0 . Je kleiner die Norm von I, desto besser passen die Beobachtungen und Näherungswerte der Unbekannten über das funktionale Modell zusammen.

Bei hinreichend kleinen Werten von \hat{x} (hinreichend genaue Näherungswerte) können die Verbesserungsgleichungen durch eine Reihenentwicklung nach TAYLOR an den Näherungswerten von X^0 beschrieben werden, die nach dem ersten Glied abgebrochen wird:

$$L + v = \varphi(X^{0}) + \left(\frac{\partial \varphi(X)}{\partial X}\right)_{0} \cdot \left(\hat{X} - X^{0}\right) = L^{0} + \left(\frac{\partial \varphi(X)}{\partial X}\right)_{0} \cdot \hat{x}$$

Gleichung 3-7: TAYLOR-Reihenentwicklung an X^0

Die Linearisierung des Gleichungssystems wird mittels der Differentialquotienten in der Designmatrix A vollzogen:

$$A_{n,u} = \left(\frac{\partial \varphi(X)}{\partial X}\right)_{0} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \varphi_{1}(X)}{\partial X_{1}}\right)_{0} & \left(\frac{\partial \varphi_{1}(X)}{\partial X_{2}}\right)_{0} & \cdots & \left(\frac{\partial \varphi_{1}(X)}{\partial X_{u}}\right)_{0} \\ \left(\frac{\partial \varphi_{2}(X)}{\partial X_{1}}\right)_{0} & \left(\frac{\partial \varphi_{2}(X)}{\partial X_{2}}\right)_{0} & \cdots & \left(\frac{\partial \varphi_{2}(X)}{\partial X_{u}}\right)_{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial \varphi_{n}(X)}{\partial X_{1}}\right)_{0} & \left(\frac{\partial \varphi_{n}(X)}{\partial X_{2}}\right)_{0} & \cdots & \left(\frac{\partial \varphi_{n}(X)}{\partial X_{u}}\right)_{0} \end{bmatrix}$$

Gleichung 3-8: Designmatrix A

Hieraus resultieren die linearisierten Verbesserungsgleichungen:

$$\hat{l}_{n,1} = l + v_{n,1} = A \cdot \hat{x}_{n,u}$$

Gleichung 3-9: linearisierte Verbesserungsgleichungen

Die in der Matrix A zwecks Linearisierung mit Näherungswerten (Startwerten) berechneten Differentialquotienten beschreiben den funktionalen Zusammenhang zwischen den gekürzten Beobachtungen *I* und den auszugleichenden (zu verbessernden) Unbekannten \hat{x} [Luh02].

Das *stochastische Modell* beschreibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Beobachtungen über eine Kovarianzmatrix. Somit lassen sich die Beobachtungen differenziert gewichten, um den Ausgleichungsprozess zu beeinflussen. Für diese Arbeit hat das stochastische Modell geringe Bedeutung, da hier einfachhalber von einer Wahrscheinlichkeits-Gleichverteilung der Beobachtungen ausgegangen wird.

Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen:

In diesem Ausgleichungs-Modell werden die Verbesserungen \hat{x} der Unbekannten so bestimmt, dass die Quadratsumme der Messabweichungen (*Residuum*) der Beobachtungen minimal wird und somit die theoretisch exakten Werte mit den gemessen Werten bestmöglich übereinstimmen (*Methode der kleinsten Quadrate*).

Das funktionale Modell entspricht dem von Gleichung 3-9.

Falls Startwerte aller beteiligten Unbekannten vorhanden und die Designmatrix *A*, sowie der Vektor der gekürzten Beobachtungen *I* aufgestellt sind, kann zur Bestimmung der Unbekannten \hat{x} das folgende Rechenschema eingesetzt werden. Bei der Ausführung wird auf die stochastische Komponente verzichtet:

1. Aufstellen der Normalgleichungen:

$$N \cdot \hat{x} - n = 0$$

$$u, u \quad u, 1 \quad u, 1 = 0$$

$$u, u = A^{T} \cdot A$$

$$u, u = A^{T} \cdot l$$

$$u, 1 = A^{T} \cdot l$$

Gleichung 3-10: Normalgleichungen

2. Auflösung der Normalgleichungen:

$$\hat{x}_{u,1} = N^{-1} \cdot n_{u,1} = \left(A^T \cdot A_{u,n} \cdot A_{u,n}\right)^{-1} \cdot A^T \cdot l_{u,n}$$

3. Verbesserungen ermitteln:

$$v_{n,1} = A \cdot \hat{x} - l_{n,1}$$

4. Beobachtungen ausgleichen:

$$\hat{l}_{n,1} = l + v_{n,1}$$
$$\hat{L}_{n,1} = L + v_{n,1}$$

5. Unbekanntenvektor verbessern:

$$\hat{X}_{u,1} = X_{u,1}^{0} + \hat{X}_{u,1}$$

6. Schlussprobe durchführen (optional):

$$\hat{L}_{n,1} = \varphi\left(\hat{X}_{u,1}\right)$$

Da beim Bündelblockausgleich nur grobe Näherungswerte für die unbekannten Größen zu erwarten sind, lässt sich das Ausgleichungssystem nur iterativ lösen. Hierbei werden die in Schritt 5 verbesserten Näherungswerte einer Iteration k solange wiederum als Startwerte für die nächste Ausgleichungs-Iteration k+1 eingesetzt, bis die L2-Norm der Unbekanntenzuschläge einen Grenzwert unterschreitet:

$$X_{k+1}^{0} = X_{k}^{0} + \hat{x}_{k}$$

Gleichung 3-11: Unbekannten-Verbesserung einer Iteration k

3.2.2 Mathematisches Modell des Bündelblockausgleiches

Der vorige Abschnitt hat gezeigt: Falls zur Bestimmung einer gegebenen Anzahl von Unbekannten *u* mehr Beobachtungen *n* vorliegen, welche zueinander funktional verknüpft sind, so bietet sich als Lösung dieses überbestimmten Gleichungssystem ein Ausgleichungsverfahren an. Dies ist der Fall beim Bündelblockausgleich.

Den funktionalen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen (Bildkoordinaten) und den Unbekannten (innere und äußere Orientierung der Ansichten und Objektkoordinaten) beschreiben dabei die Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 2-13). Die Kollinearitätsgleichungen, welche das mathematische Modell der Bündeltriangulation bilden, können nach Linearisierung an Näherungswerten direkt als Verbesserungsgleichungen nach kleinsten Quadraten verwendet werden.

Zur Überbestimmung der Kollinearitätsgleichungen werden die Bildkoordinaten der beobachteten homologen Bildpunkte betrachtet. Hierbei ergibt eine Bildkoordinate jeweils für den Ordinaten- und Abszissen-Wert eine Verbesserungsgleichung:

$$n = 2 \cdot n_{Bildpunkte}$$

Gleichung 3-12: Anzahl der Beobachtungen

Die Anzahl der Unbekannten des Ausgleichungssystems kann wie folgt bestimmt werden:

$$u = u_{\vec{A}O} \cdot n_{Ansichten} + u_{IO} \cdot n_{Kameras} + u_{OP} \cdot n_{Objektpunkte}$$

mit

 u_{AO} : Anzahl der Parameter der äußeren Orientierung

 u_{IO} : Anzahl der Parameter der inneren Orientierung

 u_{OP} : Anzahl der Parameter eines Objektpunktes

Gleichung 3-13: Anzahl der Unbekannten

Als Funktion der Beobachtungen werden folgende Unbekannte iterativ durch Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen bestimmt:

dreidimensionale Objektkoordinaten (X_i , Y_i , Z_i) äußere Orientierung (X_{0j} , Y_{0j} , Z_{0j} , ω_j , φ_j , κ_j) innere Orientierung (x_{0k}^{ι} , y_{0k}^{ι} , c_k)

mit

- i: Punktindex
- j: Bildindex
- k: Kameraindex

Mit Hilfe von Näherungswerten der unbekannten Parameter werden die nicht-linearen Kollinearitätsgleichungen nach TAYLOR linearisiert:

Substituiert man in den Kollinearitätsgleichungen die Zähler mit k_X , bzw. k_Y und den Nenner mit N,

$$x' = x'_{0} + z' \cdot \frac{k_{X}}{N} + \Delta x'$$
$$y' = y'_{0} + z' \cdot \frac{k_{Y}}{N} + \Delta y'$$

Gleichung 3-14: Substituierung der Kollinearitätsgleichungen [Luh02] S.241

so werden die Differentialquotienten wie folgt gebildet:

für die äußere Orientierung:

$$\frac{\partial x'}{\partial X_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_x - r_{11}N)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial Y_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_x - r_{21}N)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial Z_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_x - r_{31}N)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \varpi} = \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_x}{N} \cdot [r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)] - r_{31}(Y - Y_0) - r_{21}(Z - Z_0) \right\}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \varphi} = \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_x}{N} \cdot [k_x \cdot \cos \kappa - k_y \cdot \sin \kappa] + N \cdot \cos \kappa \right\}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \kappa} = \frac{z'}{N} \cdot k_y$$

$$\frac{\partial y'}{\partial X_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_y - r_{12}N)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial Y_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_y - r_{22}N)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial Z_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_y - r_{32}N)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial \sigma} = \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_y}{N} \cdot [r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)] - r_{32}(Y - Y_0) - r_{22}(Z - Z_0) \right\}$$

$$\frac{\partial y'}{\partial \varphi} = \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_y}{N} \cdot [k_x \cdot \cos \kappa - k_y \cdot \sin \kappa] - N \cdot \sin \kappa \right\}$$

$$\frac{\partial y'}{\partial \kappa} = \frac{z'}{N} \cdot k_x$$

Gleichung 3-15: Differentialquotienten äußere Orientierung [Luh02] S.241

für die innere Orientierung:

$$\frac{\partial x'}{\partial x'_0} = 1 \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial y'_0} = 1$$
$$\frac{\partial x'}{\partial c} = -\frac{k_x}{N} \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial c} = -\frac{k_y}{N}$$

Gleichung 3-16: Differentialquotienten innere Orientierung [Luh02] S.272

für die Objektkoordinaten:

Gleichung 3-17: Differentialquotienten Objektkoordinaten [Luh02] S.272

Die gekürzten Beobachtungen / des funktionalen Modells (Gleichung 3-9) ergeben sich ebenfalls aus den Kollinearitätsgleichungen. Für jede Verbesserungsgleichung wird dabei die aus den Näherungswerten berechnete Bildkoordinate von der zugehörigen beobachteten Bildkoordinate subtrahiert.

Mit Hilfe dieser Differentialquotienten und Näherungswerte für jeden Parameter kann die Designmatrix *A* aufgestellt werden. Zusammen mit den gekürzten Beobachtungen *I* wird nach dem Rechenschema aus Abschnitt 3.2.1 die Ausgleichsrechnung durchgeführt und die verbesserten Unbekannten ermittelt.

4 Näherungswert-Beschaffung

Wie schon im vorigen Abschnitt erwähnt, benötigt man für die Linearisierung der Kollinearitätsgleichungen und dem Bündelblockausgleich Näherungswerte für alle an der Ausgleichung beteiligten Unbekannten. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die innere Orientierung der Messkamera(s) und des Projektors hinreichend genau bekannt sind. Somit verbleibt nur noch die Bestimmung der Startwerte für die äußeren Orientierungen und die Koordinaten der Verknüpfungspunkte.

4.1 Relative Orientierung

Das Prinzip der *relativen Orientierung* wird im Programm *Scan 3D* herangezogen, um Näherungswerte für die äußere Orientierung der Projektor- und Messkamera-Positionen zu erhalten. Diese Näherungswerte wiederum werden vom anschließenden Bündelblockausgleich als Startwerte benötigt. Hierbei findet das Verfahren des *Folgebildanschlusses* (*relative Orientierung eines abhängigen Bildpaares*) Verwendung. Der Vollständigkeit halber sei noch auf das Verfahren der *relativen Orientierung eines unabhängigen Bildpaares* hingewiesen, wobei die X-Achse des Modellkoordinatensystems des linken Bildes gleich dem Basis-Vektor zum rechten Bild definiert wird.

Der relative Orientierung beschreibt die räumliche Translation und Rotation eines Bildes relativ zu seinem Stereopartner in einem gemeinsamen Modellkoordinatensystem. Sie ist der erste Schritt der zweistufigen Orientierung eines Stereobildpaares. Im zweiten Schritt, der *absoluten Orientierung*, wird das bei der relativen Orientierung bestimmte Modellkoordinatensystem (MKS) in ein übergeordnetes Weltkoordinatensystem (WKS), inklusive Maßstabsanpassung, transformiert.

Anschaulich beschrieben wird beim Folgebildanschluss ein lokales dreidimensionales MKS *xyz* in das Projektionszentrum des ersten (linken) Bildes gelegt und parallel zu dessen Bildkoordinatensystem ausgerichtet (siehe unten):



Abbildung 4-1: relative Orientierung eines abhängigen Bildpaares [Luh02] S. 252

Der Bildmittelpunkt des linken Bildes wird zum Ursprung des MKS beider Bilder definiert, womit alle äußeren Orientierungs-Werte (Translationen und Rotationen) gleich Null sind. Das zweite Bild wird nun räumlich dazu mit den üblichen drei Translationen und drei Rotationen orientiert.

gegebene Parameter		gesuchte Parameter		
$x_{01} = 0$	<i>ω</i> ₁ = 0	$x_{02} = b_X$	ω_2	
$y_{01} = 0$	$\varphi_1 = 0$	$y_{02} = b_y$	φ_2	
$z_{01} = 0$	$\kappa_1 = 0$	$z_{02} = b_z$	К2	

Tabelle 4-1: gesuchte und gegebene Größen der relativen Orientierung

Gesucht ist also der räumliche Basisvektor b ($b = [b_x, b_y, b_z]$) zwischen den beiden Projektionszentren O' und O''. Dem MKS kann ein beliebiger Maßstab zugeordnet werden, da bei der relativen Orientierung nur die gegenseitige Orientierung der beiden Bilder zueinander beschrieben wird. Hierfür wird einer der drei Komponenten des Basisvektors auf einen beliebigen konstanten Wert gesetzt (häufig $b_x = 1$). Somit verbleiben nur noch fünf unbekannte Elemente (b_y , b_z , ω_2 , φ_2 , κ_2) zur Bestimmung der relativen Orientierung (siehe Tabelle 4-1) [Luh02].

4.1.1 Koplanaritätsbedingung

Die relative Orientierung basiert auf der *Koplanaritätsbedingung*. Sie sagt aus, dass ein Objektpunkt *P* und die durch die Projektionszentren *O*['] und *O*^{''} verlaufenden Bildpunktvektoren *r*['] und *r*^{''} dieses Objektpunktes in einer Ebene liegen müssen. Man spricht hierbei von der *Kern*- oder *Epipolarebene*. Im Falle von zwei konvergenten Aufnahmen verlaufen die Schnittgeraden (*Epipolarlinien*) der Epipolarebene mit den Bildebenen schräg durch die Bilder. Im Falle des Stereonormalfalles liegen die Epipolarlinien parallel zur X-Achse der Bildebenen.

Aus einem homologen Bildpunktpaar lässt sich jeweils eine Bedingungsgleichung aufstellen. Da fünf äußere Orientierungsparameter gesucht sind, werden für die Lösung dieses auf der Koplanaritätsbedingung basierenden Gleichungssystems mindestens fünf homologe Bildpunktpaare benötigt.

Ausdrücken lässt sich die Koplanaritätsbedingung durch das Spatprodukt der drei die Epipolarebene aufspannenden Vektoren b, r, r^{\cdot}. Nur wenn sich die Bildpunkt-Vektoren exakt im Objektpunkt P schneiden, wird das so gebildete Spatprodukt (Volumen) zu Null:

$$\langle \mathbf{b}, \mathbf{r}', \mathbf{r}'' \rangle = (\mathbf{b} \times \mathbf{r}') \cdot \mathbf{r}'' = 0$$

Gleichung 4-1: Koplanaritätsbedingung (Spatvolumen)

Diese Gleichung lässt sich wiederum auch als Determinante der Matrix, bestehend aus den drei Epipolarebenen-Vektoren *b*, *r*['], *r*^{''}, ausdrücken:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x' & \overline{x}'' \\ b_y & y' & \overline{y}'' \\ b_z & z' & \overline{z}'' \end{vmatrix} = 0$$

Gleichung 4-2: Koplanaritätsbedingung (in Determinanten-Form)

Hierbei geht jedoch der Bildvektor *r*⁺ des zu orientierenden rechten Bildes in seiner mit den gesuchten Orientierungsparametern transformierten Form ein:

$\left\lceil \overline{x}'' \right\rceil$		r_{11}	r_{12}	r_{13}^{-}		[x'']
\overline{y} "	=	r_{21}	r_{22}	r_{23}	•	<i>y</i> ''
$\lfloor \overline{z}'' \rfloor$		r_{31}	r_{32}	r_{33}		_z''_

Gleichung 4-3: Transformation r"

Bei der Matrix *R* (Gleichung 4-4) handelt es sich hierbei um eine mit den gesuchten Drehwinkeln ω_2 , φ_2 , κ_2 geführte Rotationsmatrix. Diese Rotationsmatrix ist für ein linksseitiges Koordinatensystem definiert.

 $\begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi\\ \cos\varphi\sin\kappa + \sin\varphi\sin\varphi\cos\kappa & \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\varphi\cos\varphi\\ \sin\varphi\sin\kappa - \cos\varphi\sin\varphi\cos\kappa & \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\varphi\sin\kappa & \cos\varphi\cos\varphi \end{bmatrix}$

Gleichung 4-4: Rotationsmatrix R [Luh02] S.37

Die Komponenten z' und z'' entsprechen den negativen Werten der Kamerakonstanten der beiden Bilder [Luh02].

4.1.2 Berechnung

Für jedes gemessene Bildpunktpaar lässt sich nun eine Beobachtungsgleichung mit Δ_i aufstellen. Nach dem Prinzip der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (siehe Abschnitt 3.2.1) kann man nun ein Gleichungssystem aufstellen. Die in jeder Ausgleichs-Iteration erhaltenen Unbekanntenzuschläge werden wiederum solange auf die Start-Näherungswerte aufsummiert, bis keine nennenswerten Änderungen in den Verbesserungen mehr auftreten. Jeder Verknüpfungspunkt P_i liefert folgende Verbesserungsgleichung:

$$v_{\Delta} = \frac{\partial \Delta}{\partial b_{y}} db_{y} + \frac{\partial \Delta}{\partial b_{z}} db_{z} + \frac{\partial \Delta}{\partial \omega_{2}} d\omega_{2} + \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_{2}} d\varphi_{2} + \frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_{2}} d\kappa_{2} + \Delta^{0}$$

Gleichung 4-5: Verbesserung relative Orientierung [Luh02] S.254

 Δ^0 stellt das aus den Näherungswerten berechnete Spatvolumen dar.

Die Start-Näherungswerte kann man für annähernd parallele Aufnahmerichtungen gleich Null setzen:

$$b_v^0 = b_z^0 = \omega_2^0 = \varphi_2^0 = \kappa_2^0 = 0$$

Gleichung 4-6: Startwerte der relativen Orientierung

Natürlich verläuft die Ausgleichung schneller (weniger Iterationen nötig) und stabiler, wenn man nähere Angaben zu den auftretenden Orientierungswerten machen kann (Drehwinkel-Angabe eines verwendeten Drehtisches, etc).

Die Differentialquotienten für die benötigte Linearisierung der Beobachtungsgleichung nach den Unbekannten können wiederum mit Hilfe von Determinanten beschrieben werden:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial b_{y}} = \begin{vmatrix} 0 & x' & \overline{x''} \\ 1 & y' & \overline{y''} \\ 0 & z' & \overline{z''} \end{vmatrix} \qquad \qquad \frac{\partial \Delta}{\partial b_{z}} = \begin{vmatrix} 0 & x' & \overline{x''} \\ 0 & y' & \overline{y''} \\ 1 & z' & \overline{z''} \end{vmatrix}$$
$$\frac{\partial \Delta}{\partial b_{z}} = \begin{vmatrix} 1 & x' & 0 \\ b_{y} & y' & -\overline{z''} \\ b_{z} & z' & \overline{y''} \end{vmatrix} \qquad \qquad \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_{2}} = \begin{vmatrix} 1 & x' & -\overline{y''} \sin \phi_{2} + \overline{z''} \cos \phi_{2} \\ b_{y} & y' & \overline{x''} \sin \phi_{2} \\ b_{z} & z' & -\overline{x''} \cos \phi_{2} \\ \end{vmatrix}$$
$$\frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_{2}} = \begin{vmatrix} 1 & x' & -\overline{y''} \cos \phi_{2} \cos \phi_{2} - \overline{z''} \sin \phi_{2} \cos \phi_{2} \\ b_{y} & y' & \overline{x''} \cos \phi_{2} \cos \phi_{2} - \overline{z''} \sin \phi_{2} \\ b_{z} & z' & \overline{x''} \sin \phi_{2} \cos \phi_{2} + \overline{y''} \sin \phi_{2} \end{vmatrix}$$

Gleichung 4-7: Differentialquotienten der Koplanaritätsbedingung [Luh02] S.254

4.1.3 Genauigkeit

Verschiedene Einflussfaktoren können die Genauigkeit oder die Stabilität der relativen Orientierung beeinflussen:

Qualität der homologen Bildkoordinaten:

Schwankungen oder gar Ausreißer in den gemessenen Bildkoordinaten verzerren die Abbildung des Bildes zu den Objektpunkten. Bei einer zu geringen Anzahl von Beobachtungen kann dies zu einer nicht konvergenten Ausgleichsiteration oder bei zu einseitigen Schwankungen zu falschen Ausgleichungsergebnissen führen.

Verteilung der homologen Bildkoordinaten über dem Objekt:

Die Lage der Verknüpfungspunkte (Objektpunkte) im Modell sollte so gewählt werden, dass eine stabile geometrische Kopplung der beiden Bilder untereinander gewährleistet ist. Bei einer zu ungleichverteilten Menge von Bildkoordinaten kann es in dem nicht abgedeckten Objektbereich zu Modellfehlern kommen, die nicht kontrolliert werden können. Bei einer Verteilung der Verknüpfungspunkte auf einer Geraden wird das Normalgleichungssystem singulär.

Höhen-Basis-Verhältnis:

Ist der räumliche Basisvektor *b* zwischen den beiden Projektionszentren im Verhältnis zu dem mittleren Aufnahmeabstand zu kurz, so ergeben sich im Modellraum schleifende Strahlenschnitte. Dies resultiert in einer größeren Unsicherheit der Parameter der relativen Orientierung. Optimal ist ein Schnittwinkel um 90° zwischen den paarweisen Bildvektoren am Objektpunkt.
Verteilung der Verknüpfungspunkte im Objektraum:

In einigen Fällen kann es trotz guter Punktverteilung im Modell zu singulären oder schlecht konditionierten Normalgleichungen kommen. Ein Beispiel hierfür ist z.B. der sogenannte Gefährliche Zylinder (Abbildung 4-2). Hierbei liegen die Verknüpfungsobjektpunkte und die Projektionszentren der beiden Bilder auf einem virtuellen Zylindermantel [Luh02].



Abbildung 4-2: gefährlicher Zylinder [Luh02] S. 261

4.2 Absolute Orientierung

Die bei der relativen Orientierung gewonnene Basis-Translation *b* besitzt nur im relativen MKS maßstäbliche Gültigkeit. Nutzt man zum Beispiel die relative Orientierung zur Bestimmung der äußeren Orientierungen der Messgeräte in einem Mess-Verband, so müssen die einzelnen relativen äußeren Orientierungen der Reihe nach ins WKS überführt werden. Dies erfolgt wieder mit Hilfe von Verknüpfungspunkten.

Die absolute Orientierung stellt dabei eine räumliche Ähnlichkeitstransformation mit drei Translationen, drei Rotationen und einer Maßstabs-Skalierung dar. Man benötigt daher jeweils im Welt- und Modellkoordinatensystem mindestens sieben Verknüpfungspunkt-Informationen (z.B. 3 Punkte).



Abbildung 4-3: absolute Orientierung durch Ähnlichkeitstransformation [Luh02] S. 264

Wie in Abbildung 4-3 zu sehen, bildet der Vektor X_M die Translation des Projektionszentrums des WKS in das Projektionszentrum des linken Bildes der relativen Orientierung. Die drei Drehwinkel ξ , η , ζ rotieren die Projektionsrichtung des linken Bildes in die Projektionsrichtung des WKS. Der Maßstabsfaktor *m* skaliert die Modellkoordinaten in Weltkoordinaten. Die Vektoren *X* und *x* zeigen aus dem Weltkoordinaten- und Modellkoordinatensystem auf den gemeinsamen Verknüpfungspunkt. Somit lautet die Ähnlichkeitstransformation:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Gleichung 4-8: Ähnlichkeitstransformation

Die Lösung erfolgt wieder durch Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Für jede gegebene Verknüpfungspunkt-Koordinaten-Information lässt sich eine linearisierte Verbesserungsgleichung aufstellen [Luh02]:

$$\begin{split} X + v_x &= dX_M + \frac{\partial \phi}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial \phi}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} d\zeta + X^0 \\ Y + v_y &= dY_M + \frac{\partial \phi}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial \phi}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} d\zeta + Y^0 \\ Z + v_z &= dZ_M + \frac{\partial \phi}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial \phi}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} d\zeta + Z^0 \end{split}$$

Gleichung 4-9: Verbesserungen absolute Orientierung [Luh02] S.264

4.3 Der Vorwärtsschnitt

Nachdem Näherungswerte für die äußere Orientierung der beteiligten Messgeräte durch die relative Orientierung ermittelt wurden, werden nun noch Startwerte für die Verknüpfungspunkte für den Bündelblockausgleich benötigt.

Man kann davon ausgehen, dass aufgrund von Messungenauigkeiten sich die korrespondierenden homologen Bildvektoren nie genau im Verknüpfungspunkt schneiden, sondern windschief aneinander vorbeilaufen. Als Näherung für den gesuchten Objektpunkt P wird der Mittelpunkt P' der kürzesten Verbindung beider Trägergeraden der Bildvektoren herangezogen (Abbildung 4-4).



Abbildung 4-4: Verknüpfungspunkt-Berechnung

4.3.1 Berechnung

Grundlage für die Umsetzung waren die Ausführungen bei [WEB8].

Ausgangspunkt sind zwei über einen Verknüpfungspunkt P verbundene Bildvektoren (b° , b°) und ihre zugehörigen Projektionszentren (o° , o°).

Zuerst müssen die beiden Bildvektoren des Bildpaares über die äußere Orientierung ihrer Bilder in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden. Anschließend werden die Richtungsvektoren (Gleichung 4-10) und die Geradengleichungen (Gleichung 4-11) zwischen den transformierten Bildvektoren und ihren Projektionszentren ermittelt:

 $\vec{r}' = \vec{b}' - \vec{o}'$ $\vec{r}'' = \vec{b}'' - \vec{o}''$

Gleichung 4-10: Richtungsvektoren der Geraden g' und g"

$$\vec{g}' = \vec{o}' + s \cdot \vec{r}'$$
$$\vec{g}'' = \vec{o}'' + t \cdot \vec{r}''$$

Gleichung 4-11: Geradengleichungen von g' und g"

Die kürzeste Verbindung beider Geraden ist genau die Gerade v, welche sowohl auf g' als auch auf g'' senkrecht steht. Die Richtung von v ergibt sich aus dem Vektorprodukt der Richtungsvektoren von g' und g'':

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r'_2 r''_3 - r'_3 r''_2 \\ r'_3 r''_1 - r'_1 r''_3 \\ r'_1 r''_2 - r'_2 r''_1 \end{pmatrix}$$

Gleichung 4-12: Richtungsvektor der kürzesten Verbindung

Bildet man mit dem Richtungsvektor v der kürzesten Verbindung und einer der beiden Geraden eine Ebene e, so ist der Schnittpunkt dieser Ebene mit der jeweils anderen Geraden ein Punkt auf der Geraden der kürzesten Verbindung von g' und g'':

$\vec{e} = \vec{g}' + \vec{v}$

Gleichung 4-13: Schnittebene

Durch Gleichsetzen von e mit der jeweils anderen Geraden und nach Auflösen des Gleichungssystems erhält man die Koeffizienten, die, in die Geradengleichung eingesetzt, den Schnittpunkt (A) von e und dieser Geraden bildet.

Analog geht man für den Schnittpunkt (*B*) auf der anderen Gerade vor. Der Mittelpunkt *P*⁶ der Strecke *AB* ist der gesuchte Näherungswert des Verknüpfungspunktes *P*.

Als Maß für die Güte des bestimmten Objektpunktes und somit auch indirekt für die Güte der Bild-Orientierungen und Bildpunkte lässt sich der Abstand von *A* zu *B* heranziehen. Je kleiner dieser Abstand ist, desto koplanarer liegen die Bildvektoren im Raum.

5 Aufbau und Funktionsweise der Messapparatur

5.1 Aufbau

Wie schon vorab erwähnt, diente als Vorlage für diese Arbeit eine wissenschaftliche Arbeit über selbstkalibrierende Streifenprojektionsverfahren vom *Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik* in Jena [SN99]. Unter Anderem wird dort eine Messvorrichtung vorgestellt, welche auf Streifenprojektion in Verbindung mit photogrammetrischen Methoden basiert (Phasogrammetrie) und trotz einer relativ willkürlichen Anordnung der Messgeräte (Projektor, Kameras) in der Lage ist, sich selbst während des Messvorganges zu kalibrieren (*kolibri flex*) und die Objektkoordinaten zu ermitteln. Auf diesem Grundprinzip aufbauend wurde diese Arbeit entwickelt.

Der in [SN99] beschriebene Grundaufbau von *kolibri flex* setzt sich aus einer zum Messobjekt ortsfesten Kalibrierkamera, einer Messkamera und einem Streifenprojektor zusammen, der in der Lage ist, seine Projektionen um 90° rotiert zu projizieren (Abbildung 5-1).



Abbildung 5-1: Grundanordnung der flexiblen phasogrammetrischen 3D-Messung [Luh03] S.27

Der Streifenprojektor und die Messkamera bilden hierbei den Sensorkopf, der aus verschiedenen Perspektiven das zu erfassende Objekt vermisst. Dabei können sowohl der Abstand zwischen Messkamera und Projektor, als auch der Abstand zwischen Sensorkopf und Objekt oder der Kalibrierkamera während des Messvorganges variieren. Mittels der Selbstkalibrierung werden diese Positionen (innere und äußere Orientierung) für jede Sensorkopfänderung neu bestimmt. Lediglich die relative Orientierung der Kalibrierkamera zum Objekt muss während der Messung konstant bleiben. Somit kann man von einer mobilen Messeinrichtung sprechen, welche ohne großen Aufwand ortsunabhängig genutzt werden kann.

Im Unterschied zum Aufbau in Abbildung 5-1 liegt bei dem hier verwendeten Aufbau das gewünschte Einsatzgebiet in der Nahbereichs-Aufnahme. Um den gesamten Aufnahme-Prozess zu automatisieren, wird die Ansichtsänderung zwischen Sensorkopf und Objekt nicht durch eine räumliche Änderung des Sensorkopfes, sondern durch einen unter dem Messobjekt befindlichen Drehtisch bewirkt. Über einen auf dem Drehtisch angebrachten Messkäfig bleiben die dort angebrachten Kalibrierkameras ortsfest zum Objekt. Der eigentliche Sensorkopf, Messkamera(s) und Projektor, betrachtet die Szene von außerhalb des Messkäfigs (Abbildung 5-2).



Abbildung 5-2: verwendeter Messaufbau mit einer Mess- und Kalibrierkamera

Ein weiterer Unterschied zum Aufbau in Abbildung 5-1 ist die Skalierbarkeit der einsetzbaren Mess- und Kalibrierkameras. Ohne Problem können mehrere Messkameras das Objekt erfassen und somit eine dichtere Objekterfassung erzielen. Der Einsatz mehrerer Kalibrierkameras überwindet den Nachteil des Aufbaus in Abbildung 5-1, dass das Objekt nur im Aufnahmebereich der einzigen Kalibrierkamera erfasst werden kann. Somit steht einer kompletten räumlichen Objekterfassung nichts im Weg.

5.2 Funktionsweise

Grundlegendes Ziel bei der Weiterführung der Phasogrammetrie zur flexiblen Phasogrammetrie ist der Wunsch, einige Nachteile, wie

- Ortsfestigkeit der Kamera zum Objekt
- daraus resultierende Begrenzung der Anzahl der zu erfassenden Objekt-Ansichten durch die Anzahl der vorhandenen Kameras

zu überwinden.

Die Idee ist nun, durch einen zweiten Kameratyp, die Messkamera, welche ebenfalls neben der Kalibrierkamera die Projektionen parallel aufzeichnet, die eigentlichen Objektkoordinaten zu bestimmen. Anders als im Abschnitt 2.4 beschrieben, dient nun die ortsfeste Kalibrierkamera nur noch zur Kalibrierung der Projektor-Positionen und wird nicht mehr für die Objektkoordinaten-Berechnung mit herangezogen.

Nachdem die Projektor-Positionen durch die Kalibrierkamera(s) orientiert wurden, werden die einzelnen Messkamera-Positionen zu ihren zugehörigen Projektor-Positionen der Aufnahme orientiert. Dabei findet das gleiche phasogrammetrische Prinzip Anwendung, bis auf den Unterschied, dass neben den inversen Bildpunkten des Projektors nun auch die Matrix-Bildpunkte der Messkamera für die Bündelbildung mit verwendet werden. Jeweils ein direkter Matrix-Bildpunkt der Messkamera bildet nun zusammen mit dessen zugehörigem aufgenommenem indirekten Bildpunkt des Projektors ein homologes Bildpunktpaar. Somit kann zum Beispiel jetzt eine einzige Messkamera das Objekt nacheinander aus verschiedenen Ansichten vermessen. In der dieser Arbeit zugrunde liegenden Messeinrichtung werden die Positionsansichten durch den Drehtisch realisiert. Der Sensorkopf stellt hier die Konfiguration aller Messkameras und des Projektors einer Aufnahme-Position dar. Dieser belichtet im *Aufnahme-Prozess* (dargestellt in Abbildung 5-3), ohne selbst räumlich verschoben zu werden, das Objekt. Der Sensorkopf kann somit von beliebigen Ansichten heraus das Objekt rundherum ablichten.

Die Projektionssequenz für eine Mess-Position setzt sich zusammen aus einer Serie von vier Referenzbildern und einer von der Anzahl der Gray-Code-Ebenen abhängigen Zahl von Mess-Bildern (vier bis sieben Gray-Code-Bilder und vier Phase-Shift-Bilder).



Abbildung 5-3: Aufnahmeprozess

Nach der Messung wird ein vierstufiger *Auswertungs-Prozess* durchgeführt. Ziel dieser Auswertung ist die Kalibrierung des Sensorkopfes an allen Mess-Positionen und die Gewinnung von 3D-Objektkoordinaten in einem einheitlichen Koordinatensystem:

1. Auswertung der Mess-Bilder:

Für jede am Mess-Prozess beteiligte Kamera werden nacheinander die Referenzbild-Sequenzen und Mess-Bild-Sequenzen ausgewertet. Die resultierenden Triangulationswerte bilden die Basis für die anschließende Orientierung der Messgeräte und der Berechnung der Objektkoordinaten.

2. Kalibrierung des Projektors:

Ziel des 2. Schrittes ist die Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung aller am Messvorgang auftretenden Projektorpositionen.

Nach dem Prinzip der virtuellen Passmarken bestimmt *die* Kalibrierkamera, welche für die jeweilige Objektansicht über die größte Ansichtsüberschneidung mit der Projektion verfügt, über vorher automatisch ausgewählte homologe Matrix-Bildpunkte über Methoden des Bündelblockausgleiches die Orientierungsparameter des Projektors. Dabei müssen die Verknüpfungspunkte von mindestens zwei verschiedenen Positionen aus beleuchtet worden sein, um die nötigen vier Koordinateninformationen pro Verknüpfungspunkt zu erhalten, die für die Bestimmung der Unbekannten erforderlich sind. Auf Basis dieser Triangulationsbilder

kann das Projektorpositions-Netzwerk global ausgeglichen werden. Als Ergebnis erhält man die absoluten Orientierungsparameter des Projektors an allen Positionen.

3. Kalibrierung der Messkameras:

Sukzessive wird für alle Messkameras und deren Mess-Positionen die absolute Orientierung ermittelt. Mittels der im 1. Auswerteschritt ermittelten Orientierungswerte des Projektors werden die einzelnen Kamera-Positionen zu ihren korrespondierenden Projektor-Positionen über automatisch ausgewählte homologe Bildpunkte in einem Bündelblockausgleich ins gemeinsame Weltkoordinatensystem orientiert. Als Ergebnis erhält man die absoluten Orientierungen aller Messkameras an allen Positionen.

4. Berechnung der 3D-Objektkoordinaten:

Da nun die WKS-Orientierungsparameter sämtlicher Projektor- und Messkamera-Positionen bekannt sind, kann man über klassische Methoden der Streifenprojektion (Triangulation) die gewünschten Objektkoordinaten der einzelnen Messkamera-Ansichten bestimmen, welche sich im übergeordneten Weltkoordinatensystem zusammenfügen. Als Ergebnis erhält man die 3D-Objektkoordinaten aller Messkamera-Ansichten.

Der gesamte Kalibrier- und Mess-Prozess ist somit vollautomatisiert und bedarf keiner aufwändigen Vor- und Nacharbeit.

6 Mess / Auswertungs-Software Scan 3D

Durch die im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte Software *Scan 3D* soll die vollautomatische Steuerung und Auswertung einer 3D-Vermessungsanlage, welche auf photogrammetrischer Streifenprojektion basiert, übernommen werden.

Ziel der Software ist eine Rundumvermessung eines Objektes mit berührungsloser Objektinteraktion ohne manuelle Kalibrierungs- und Auswertestrategien. Der Schwerpunkt lag in der Implementierung eines Bündelausgleiches zur Systemkalibrierung und der Bestimmung der Objektkoordinaten (Punktwolke).

6.1 Programmstruktur

Als Entwicklungsumgebung für *Scan 3D* dient Microsoft Visual C++. *Scan 3D* ist eine MFCbasierte Windows-Anwendung mit C++ als Programmiersprache. Somit existiert eine programminterne Trennung (Datenkapselung) zwischen den Daten (*Dokument*) und den davon abhängigen *Sichten* nach der *Dokument-Ansicht-Architektur*. Die Sichten dienen als Interaktionselement zwischen Benutzer und Programm. Das Grundanwendungsgerüst setzt sich aus mehreren Instanzen von *MFC-Basisklassen* zusammen:

- Die Klasse *CScan3DApp* (Instanz von *CWinApp*) repräsentiert die Anwendung. In ihr wird das globale Anwendungsobjekt definiert. Sie ist der Ausgangspunkt der Anwendung.
- Die Klasse *CMainFrame* (Instanz von *CFrameWnd*) repräsentiert das Hauptrahmenfenster der Anwendung. In ihr wird das Verhalten der Sichten zur Interaktion mit dem Benutzer festgelegt.
- Die Klasse *CScan3DDoc* (Instanz von *CDocument*) verwaltet die Grunddaten, die von der Anwendung benötigt werden. Sie stellt somit eine Seite der Dokument-Ansicht-Architektur dar.
- Die Klassen CControlView (Steuerungs-Ansicht), CMeshView (Objekt-Ansicht), CCalibCamView (Kamera-Ansicht) und CImgThumView (Mess-Bild-Ansicht) stellen die Sichten-Struktur der Anwendung dar.

6.1.1 Programmablauf

Der grundlegende Programmablauf gestaltet sich wie in Abbildung 6-1 dargestellt.

Die manuelle Justierung umfasst das Fokussieren der Kameras und des Projektors sowie weitere Einstellungen, die nicht software-seitig gesteuert werden können.

Die software-gestützte Justierung umfasst Messgerät-Einstellungen, die von der Software *Scan 3D* unterstützt werden.

Nachdem die Aufnahme- und Auswertungs-Einstellungen (siehe Abschnitt 6.4) vorgenommen wurden, kann der Aufnahme-Prozess gestartet werden. Innerhalb einer Programmausführung können beliebig viele Aufnahme-Prozesse durchgeführt werden.

Der Auswertungs-Prozess führt sich bei einem vorangegangenen Start einer Aufnahme automatisch aus. Optional lässt sich im Anschluss die Auswertung mit veränderten Auswertungs-Einstellungen beliebig oft wiederholen.



Abbildung 6-1: Programmablauf

6.1.2 Ein- und Ausgaben

Eingaben:

Projektdatei (*.scn):

- sie enthält die Informationen der Programm-Einstellungen (Kamera-, Auswertungs-, Aufnahme- und Kalibrierungs-Einstellungen)

Projekt-Aufnahme-Bilder:

- Mess-Bilder, die während einer Aufnahme innerhalb eines Projektes aufgenommen wurden
- werden hinterlegt im Ordner \images
- sie bilden zusammen mit der Projektdatei ein Projekt

Ausgaben:

Projektdatei, Projekt-Aufnahme-Bilder

Projekt-Auswertungs-Bilder:

- optionale Auswertungs-Bilder wie Referenz-Bild-, Gray-Code-Bild-, Phase-Shift-Bild-, Triangulations-Bild- und Bündel-Testbilder

Protokolldatei:

- sie wird bei der Orientierung im Auswertungs-Prozess generiert und enthält alle Kalibrierungs-Resultate
- wird hinterlegt im Ordner \Text Output als Protokoll_Geräte_Kalibrierung.txt

Ausgleichungs-Daten:

- für jede Ausgleichungs-Iteration des Ausgleichungs-Moduls werden die Design-Matrix *A*, der Verbesserungsvektor *v* und der Vektor der gekürzten Beobachtungen *I* textuell ausgegeben
- werden hinterlegt im Ordner \Text Output

6.2 Aufnahme-Prozess

Die Ablauf-Koordinierung der Messung wird durch die Klasse *CControlView* gesteuert. Die Funktion *OnStartMeasure()*, welche durch den *Start-Button* aufgerufen wird, übernimmt die Steuerung der Messung. Der Ablauf gestaltet sich folgendermaßen:

starte FullScreen-Modus: generiere Mess-Bilder: für alle Messpositionen{ rotiere Drehtisch um vorgegebene Gradzahl; für zwei Projektor-Rotationen (horizontal und vertikal){ projiziere Referenzbild "normal"; für alle Messkameras{ nimm Bild; } für alle Kalibrierkameras{ nimm Bild; } projiziere Referenzbild "invertiert"; für alle Messkameras{ nimm Bild: } für alle Kalibrierkameras{

```
nimm Bild;
}
für zwei Projektor-Rotationen (horizontal und vertikal){
für alle Bilder einer Mess-Sequenz (GrayCode- und Phase-Shift-Bilder){
projiziere aktuelles Mess-Bild aus der Sequenz;
für alle Messkameras{
    nimm Bild;
    }
für alle Kalibrierkameras{
    nimm Bild;
    }
}
```

Anschließend wird der Auswertungs-Prozess über die Funktion OnStartCompute() gestartet.

6.2.1 Interne Bildauflösungen

Homogenität der internen Bildformate:

Die Klasse *Clmage* soll sicherstellen, dass unabhängig von den Bildformat-Einstellungen (Auflösung, Bildtiefe, Dateiformat) der einzelnen Kameras die internen Bildformate homogen sind, um eine reibungslose Verarbeitung der Bilder zu garantieren. Dabei arbeitet *Clmage* größtenteils mit Funktionen der *Freelmage-Bibliothek* [WEB5].

Jedes Bild, welches von einer Kamera während der Messung aufgenommen wird, wird von dem *Clmage*-Objekt *imageMeasure* in das interne Bildformat transformiert (siehe Beispiel Tabelle 6-1).

Objekt-Name	Auflösung	Bit-Tiefe	Format	RescalingMethode
imageMeasure	640x480	8	Bitmap	Bilinear-Filter

Tabelle 6-1: Beispiel internes-Bildformat

Projektions-Auflösung:

Die Klasse CProjection dient der Festlegung der inneren und äußeren Projektions-Auflösung.

Die *äußere Projektions-Auflösung* ist die Auflösung der Full-Screen-Ausgabe für die Mess-Projektionen. Sie stellt also die Gesamtprojektionsfläche dar. Die *innere Projektions-Auflösung* ist die Auflösung der Bilder, mit der sie im Ausgabebereich zentriert dargestellt werden. Sie kann höchstens genau so hoch wie die äußere Auflösung sein.

Anschaulich betrachtet, entspricht das Verringern der inneren im Vergleich zur äußeren Auflösung einem "Heranzoomen" der Projektor-Ansicht, also der inversen Kamera. Das Objekt *imageProject* der Klasse *CProjection* enthält die Informationen zur Projektions-Auflösung (siehe Beispiel Tabelle 6-2).

Objekt-Name	äußere Auflösung	innere Auflösung	resultierender Zoom-Faktor
imageProject	1024x768	800x600	1.28

Tabelle 6-2: Beispiel Projektions-Auflösung

6.2.2 Dynamische Mess-Sequenz-Erstellung

Eine Möglichkeit, die Darstellungs-Qualität einer Objekt-Punktwolke bei der Messung zu beeinflussen, ist die Variation der Gray-Code-Ebenen.

Die inverse Bildkoordinate setzt sich aus dem diskreten Gray-Code-Betrag und dem kontinuierlichen Phasen-Betrag zusammen.

Bei einer zu hohen Anzahl von Ebenen steigt zwar die diskrete Zuordnungsgenauigkeit der inversen Bildpunkte durch die feinere Gray-Codierung, jedoch nehmen die Phasenlängen mit steigender Gray-Code-Ebenen-Anzahl zum Quadrat ab, so dass die Phasen-Information in den Mess-Bildern verzerrt wird und der Subpixel-Beitrag der inversen Bildpunkte bei einer zu schmalen Phasenbreite fast vollständig verloren geht. Außerdem steigt der Mess- und Auswerteaufwand durch eine Vergrößerung der Mess-Bild-Sequenz an.

Wenn hingegen eine zu geringe Gray-Code-Auflösung gewählt wird, steigt der Subpixel-Anteil bei der Bestimmung des inversen Bildpunktes. Da aber der Phasenwert aus vier Phasenbildern als Mittelwert berechnet wird, stimmen die ermittelten Phasenwerte selten mit den theoretischen Sollwerten überein. Mit wachsendem Phasenwertanteil bei der Bildkoordinaten-Bestimmung nimmt wiederum diese Verzerrung zu.

Da bei jedem Messobjekt und jeder Aufnahmekonfiguration dieses Verhalten sich anders darstellt, kann man durch eine geeignete Wahl der Gray-Code-Auflösung darauf reagieren.

Um die Anzahl der Gray-Code-Ebenen dynamisch zu halten, müssen die Projektionsbilder der Mess-Sequenz dynamisch zur Laufzeit generiert werden. Insbesondere die Phase-Shift-Bilder hängen durch die Breite ihrer Phase von der Anzahl der Gray-Code-Ebenen und Gray-Code-Streifen ab.

Die Klasse *ClmgProcessing* generiert mit Hilfe der frei verfügbaren Bildbearbeitungs-Bibliothek *Freelmage* alle Mess-Bilder zur Laufzeit. Um Rechenzeit und Festplatten-Speicherplatz bei der Bildauswertung zu sparen, werden die Bilder direkt in den Arbeitsspeicher geladen.

Bei der Generierung der Phasenbilder wird neben der Projektionsbild-Breite B_X und Höhe B_Y auch die Anzahl der verwendeten Gray-Code-Ebenen *E* mit übergeben. Die Breite S_{BX} oder Höhe S_{BY} eines Gray-Code-Streifen entspricht genau einem Sinus-Quadranten in der Dhase Shift Darieletien – Correit erwiht eine für die Dariedenlänge in herioentelen

Phase-Shift-Projektion. Somit ergibt sich für die Periodenlänge in horizontaler Wellenausrichtung P_{LX} und in vertikaler Wellenausrichtung P_{LY} einer Phase:

 $S_{N} = 2^{E}$ $S_{BX} = B_{X} \div S_{N}$ $S_{BY} = B_{Y} \div S_{N}$ $P_{LX} = S_{BX} \cdot 4$ $P_{LY} = S_{BY} \cdot 4$

Gleichung 6-1: Größe Phasen-Periode in Pixel

6.2.3 Umsetzung der Geräte-Unabhängigkeit

Beim Entwurf und der Implementierung der Software *Scan 3D* wurde darauf geachtet, dass andere Messgeräte, verschieden von denen für diese Arbeit verwendeten, ohne viel Aufwand in die Software integriert werden können.

Struktur:

Alle eingebunden Geräte in der Software *Scan 3D* müssen spezialisierte Klassen von *CDevice* implementieren (Abbildung 6-2).



Abbildung 6-2: Geräte-Struktur

Die Klasse *CDevice* verfügt über die Attribute und Methoden der Geräte-Orientierung für ein beliebiges Koordinatensystem und der Gerätebezeichnung.

Projektor:

Um die Einbindung verschiedener Projektoren zu gewährleisten, spricht die Software den Projektor nicht direkt über eine Software-Schnittstelle an, sondern gibt die zu projizierenden Bilder direkt über einen *Fullscreen-Modus* über die Grafikkarte aus. Somit muss nur eine geeignete Anbindung des Projektors an die Grafikkarte erfolgen. Für die spätere Kalibrierung des Projektors müssen jedoch in der Spezialisierung der Klasse *CProjector* die Werte der inneren Orientierung wie Kamera-Konstante, Bildmatrix-Breite und Höhen angegeben werden (Abbildung 6-3).



Abbildung 6-3: Projektor-Struktur

Die interne Auflösung des Projektors spielt somit keine Rolle für den Messvorgang, lediglich das Verhältnis von projizierter Bildfläche zum gesamten Ausgabe-Bereich. Dieses Verhältnis ist über die Software regulierbar und ist somit bekannt (siehe 6.2.1).

Drehtisch:

Bei der Einbindung eines Drehtisches muss lediglich vorausgesetzt werden, dass das einzubindende Gerät über eine C/C++ Schnittstelle verfügt. Zudem müssen die virtuellen Funktionen der zu spezialisierenden Klasse *CStage* implementiert werden (siehe Abbildung 6-4).



Abbildung 6-4: Tisch-Struktur

Kamera:

Wie auch beim Drehtisch müssen einzubindende Kameras über eine C/C++ Schnittstelle verfügen. Die zu implementierende Klasse leitet sich jedoch nicht direkt von der Klasse *CCamera*, sondern von deren Kindern *CCalibCam* (für Kalibrierkameras) oder *CMeasureCam* (für Messkameras) ab. Auch hier müssen die virtuellen Schnittstellen-Funktionen der Eltern-Klassen implementiert werden (Abbildung 6-5).



Abbildung 6-5: Kamera-Struktur

Das Bild-Ausgabe-Format der Kamera muss dem Typ *Windows-Bitmap* (*bmp*) oder *jpeg* entsprechen. Des Weiteren sollten die verschiedenen Auflösungs-Modi der Messkameras auf Interpolation und nicht auf Bildausschnitts-Veränderung der Maximal-Auflösung basieren, um nicht das Kamera-Modell und somit die Messergebnisse zu verfälschen. Bei der Kalibrierkamera spielt dies keine Rolle, da hier nur die inversen Bildkoordinaten bestimmt werden.

6.3 Auswertungs-Prozess

Nachdem die Messung erfolgte, wird über die Funktion *OnStartCompute()* der Klasse *CControlView* der Auswertungs-Prozess initiiert.

Die Steuerung des Auswertungs-Prozesses übernimmt die Klasse *CPhasoClass*. Über ihre Start-Funktion *Run()* werden die Auswertungs-Schritte Bildauswertung (Objekt vom Typ *CImgProcessing*), Projektor-Kalibrierung (Objekt vom Typ *CCalibration*), Messkamera-Kalibrierung (Objekt vom Typ *CCalibration*) und die Objektkoordinaten-Berechnung (Objekt vom Typ *CObjectCoordinates*) nacheinander ausgeführt:

initialisiere Messgeräte;

führe Mess-Bild-Auswertung durch;

kalibriere Projektor auf allen Messpositionen;

kalibriere Messkameras auf allen Messpositionen;

für alle Messkameras{

für alle Kamera-Positionen{

berechne Objektkoordinaten;

füge ermittelte Punktwolke der globalen Punktwolke hinzu;

}

}

6.3.1 Mess-Bild-Auswertung

Die Mess-Bild-Auswertung umfasst die gesamte Auswertung aller Referenz- und Mess-Bilder, die während des Mess-Prozesses von Kameras aufgenommen wurden. Sie untergliedert sich in die Referenz-Bild-, die Gray-Code-Bild-, die Phase-Shift-Bild- und die Triangulations-Bild-Erstellung. Den Ablauf der Mess-Bild-Auswertung übernimmt die Funktion *Run()* der Klasse *CImgProcessing*:

für alle Messkameras{

bestimme Referenz-Bilder an allen Mess-Positionen; bestimme Gray-Code-Bilder an allen Mess-Positionen; bestimme Phase-Shift-Bilder an allen Mess-Positionen; bestimme direkte und indirekte Triangulations-Bilder an allen Mess-Positionen;

}

für alle Kalibrierkameras{

bestimme Referenz-Bilder an allen Mess-Positionen; bestimme Gray-Code-Bilder an allen Mess-Positionen; bestimme Phase-Shift-Bilder an allen Mess-Positionen; bestimme indirekte Triangulations-Bilder an allen Mess-Positionen;

}

6.3.1.1 Referenz-Bild-Erstellung

Wie schon im Abschnitt 2.2 näher beschrieben, wird üblicherweise an jeder Mess-Position vor der eigentlichen Mess-Bild-Sequenz ein Bild mit leerer (dunkel) und ein Bild mit voller (hell) Projektion aufgenommen. Im Rahmen des Testens fiel jedoch auf, dass diese Referenz-Bilder die realen Beleuchtungsverhältnisse während der eigentlichen Messung nicht hinreichend genau wiedergeben. Durch die Reflektion der Objektoberfläche ist vor allem der Dunkelanteil der Projektion verzerrt. Bei der Gray-Code-Projektion erreicht ein die dunkler Streifen nicht im dunklen Referenz-Bild dargestellte geringe Beleuchtungsintensität, da die benachbarten hellen Streifen durch die Reflektion der Objektoberfläche ihn mit aufhellen. Da im dunklen Referenz-Bild jeglicher Hellanteil in der Projektion fehlt, tritt diese Beeinflussung hier nicht auf. Diese ungenauen, aus dem dunklen Referenz-Bild heraus resultierenden, Referenzwerte wirken sich negativ in der Mess-Bild-Auswertung bei der Bestimmung der Gray-Code-Werte und Phasenwerte aus. Die in den Phasenmessbildern bestehenden Grauwerte der Wellenmaxima liegen deutlich über den zugehörigen Werten im dunklen Referenz-Bild. Dies spiegelt sich in der ermittelten Phasenwelle mit einer zu geringen Amplitude wider.

Um die Referenzwert-Bestimmung den Gegebenheiten anzupassen, wurde das übliche Referenzbild-Verfahren weiterentwickelt. Statt der Verwendung des Hell-Dunkel Referenzbildpaares werden nun Streifenprojektionen eingesetzt. Es wird jeweils eine Serie mit vier Projektionen mit horizontalen und mit vertikal ausgerichteten Streifen projiziert. Die vier Projektionen bestehen aus einem Streifenbild, einem um eine halbe Streifenbreite dazu versetzten Streifenbild und jeweils die Intensitäts-Invertierungen. Für eine Messansicht werden jetzt also acht Referenzbilder projiziert.

Hierbei wird das nicht versetzte Referenz-Bild und seine Invertierung als *erstes Streifen-Referenzbildpaar* (*ESR*) und das versetzte Referenz-Bild zusammen mit seiner Invertierung als *versetztes Streifen-Referenzbildpaar* (*VSR*) bezeichnet.

Das versetzte Streifen-Referenzbildpaar wird benötigt, um die an den Übergängen zweier Streifen auftretenden Referenzwert-Ungenauigkeiten des anderen Bildpaares auszugleichen.

Bildet man für jeden Matrix-Bildpunkt des Aufnahmebereiches den Mittelwert zwischen diesen Grauwert-Projektions-Extremen eines Streifen-Referenzbildpaares, so erhält man den Referenzwert für diesen Bildpunkt. Dieser Mittelwert wird jedoch nur als gültig (Referenzwert ungleich Null) in das Referenz-Bild übernommen, wenn die Differenz zwischen dem Hellund Dunkelwert einen bestimmten Referenz-Schwellwert übersteigt (siehe Abschnitt 2.2.1). Somit wird ein Großteil des nicht zu dem Messobjekt gehörigen Bereiches im Aufnahmebereich von vornherein als ungültig gekennzeichnet.

Zusätzlich wird noch der Differenz-Betrag (Referenzdelta) vom Referenzwert zu einem der beiden Extrem-Werte (Hell- oder Dunkel-Wert) für jeden Bildpunkt hinterlegt. Jeder Eintrag des Referenz-Bildes besitzt zudem noch ein binäres Attribut (is extracted) für die Objekt-Freistellung. Die Menge dieser Werte für alle Bildpunkte eines Aufnahmebereiches werden als Referenz-Bild bezeichnet. Sie werden im Objekt CReferenceData für jeden Bildpunkt hinterlegt und diese in der Liste CRefObjectMatrix in der Reihenfolge der Aufnahmepositionen als geordnet. Funktion Referenz-Bild Ablauf der Der DetermineRefValues() ist folgendermaßen:

für alle Mess-Positionen{

für zwei Rotationen{

lege neues Referenz-Bild für Kamera an;

für alle Bildpunkte des Aufnahmebereiches{

wenn Differenz Hell/Dunkelwert des ESR oder des VSR größer Referenz-Schwellwert, dann{

wenn Differenz Hell/Dunkelwert des ESR größer Referenz-Schwellwert, dann{

berechne hierfür Referenzwert;

berechne hierfür Referenzdelta;

} wenn Differenz Hell/Dunkelwert des VSR größer Referenz-Schwellwert, dann {

berechne hierfür Referenzwert;

berechne hierfür Referenzdelta;

}

ansonsten{

setze Referenzwert gleich Null; // entspricht Bildpunkt-Devalidierung

}

füge Referenz-Daten in Referenz-Bild ein;

} wenn im Menü ausgewählt, dann{

extrahiere Mess-Objekt;

} } }

Die Referenz-Bilder dienen vor allem durch ihre Objektabgrenzung für die nachfolgenden Auswerte-Schritte. Außerdem sind sie die Schwellwertgeber für die Gray-Code-Wert- und Phasenwert-Berechnung. Optional lässt sich ein visuelles Testbild des Referenz-Bildes erstellen:



Abbildung 6-6: Test-Bild des Referenz-Bildes (horizontal)

6.3.1.2 Objektfreistellung

Um Messausreißer in den Bildkoordinaten zu reduzieren und die resultierende Punktwolke auf das Messobjekt zu beschränken, hat sich herausgestellt, dass eine automatische Objektfreistellung des zu vermessenden Körpers unverzichtbar ist.

Die Idee hierbei ist, das Messobjekt innerhalb des Referenz-Bildes, welches jeweils pro Kamera und Messansicht nach einer Messung ermittelt wird, zu seiner Umgebung abzugrenzen und freizustellen. Punkte oder Flächen, die nicht mit dem Messobjekt direkt verbunden sind, werden im zugehörigen Referenz-Bild markiert und werden in den anschließenden Auswertungen nicht mehr verwendet.

Es wird davon ausgegangen, dass das eigentliche Messobjekt die Fläche im Referenz-Bild darstellt, welche dem Bildmittelpunkt am nächsten liegt. Nachdem diese Fläche gefunden ist (siehe Abbildung 6-7), wird sie rekursiv kreuzförmig mit ihrem Rand von der Umgebung abgegrenzt und markiert. Dabei werden sämtliche Formausprägungen (konvex, konkav, etc) und Löcher erkannt. Durch die Markierung der flächenzugehörigen Bildpunkte im Referenz-Bild werden im Anschluss alle nicht markierten Punkte als invalid markiert (siehe Abbildung 6-8). Sie bilden zusammen mit den schon von vornherein als invalid gekennzeichneten Bildpunkten des Referenzbildes die Menge der Umgebungspunkte.

Finden des Startpunktes:



Abbildung 6-7: Startpunktsuche

rekursive Flächenerkennung:





Abbildung 6-8: Objektfreistellung





Durch die Objektfreistellung ist nun die Ausreißerwahrscheinlichkeit bei der späteren automatischen Bestimmung der virtuellen homologen Punkte reduziert. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen des Bündelblockausgleiches wieder, welcher sehr sensibel auf Fehldaten reagiert.

6.3.1.3 Gray-Code-Bild-Erstellung

Der diskrete Anteil bei der Bestimmung der inversen Bildkoordinaten wird durch das Gray-Code-Verfahren geliefert. Hierzu werden die Gray-Code-Bilder der Mess-Sequenz ausgewertet. Durch die Rotation der Mess-Sequenzen liefert jede Aufnahme-Position zwei Gray-Code-Werte (einen horizontalen und vertikalen) pro Matrix-Bildpunkt. Dieser Gray-Code-Datensatz besteht aus einer Abfolge binärer Werte. Die Reihenfolge entspricht der Gray-Code-Ebene und der Wert zeigt an, ob der jeweilige Bildpunkt des Aufnahmebereiches einen hellen oder dunklen Streifen abbildet (siehe Abschnitt 2.2.2). Der Referenzwert bildet hierbei den Grauwert-Grenzwert zwischen den beiden Streifen-Typen. Die Menge der Gray-Code-Datensätze, für alle Bildpunkte des Aufnahmebereiches, wird als *Gray-Code-Bild* bezeichnet. Programmintern repräsentiert die Liste *CGrayCodeObjectMatrix* das Gray-Code-Bild.

Für die Gray-Code-Mess-Serien einer Kamera ergibt sich damit in der Funktion *DetermineGrayCodeValues()* folgender Algorithmus:

```
für alle Mess-Positionen{
    für zwei Rotationen{
        lege neues Gray-Code-Bild für Kamera an;
        für alle Bildpunkte des Aufnahmebereiches{
             wenn Bildpunkt gültigen Referenzwert besitzt, dann{
                 für alle Bilder der Gray-Code-Sequenz dieser Position und Rotation{
                     wenn Bildpunkt-Grauwert kleiner als Referenzwert, dann{
                         füge Wert 0 an Gray-Code-Wert an:
                                                               // dunkler Streifen
                     }
                     ansonsten{
                         füge Wert 1 an Gray-Code-Wert an; // heller Streifen
                     }
                 }
                 füge Gray-Code-Wert in Gray-Code-Bild ein;
            }
        }
    }
}
```

Optional lassen sich auch die Gray-Code-Bilder visuell als Test-Bild ausgeben:



Abbildung 6-9: Testbild Gray-Code-Bild

6.3.1.4 Phase-Shift-Bild-Erstellung

Das Phase-Shift-Verfahren liefert den kontinuierlichen Anteil zur Bestimmung der inversen Bildkoordinaten. Durch die Auswertung der vier jeweils um 90° verschobenen Phasenbilder wird der Phasenwert für den jeweiligen Matrix-Bildpunkt des Abbildungsbereiches bestimmt. Ebenso wie bei der Gray-Code-Auswertung erhält man durch rechtwinklige Rotation der Phasenprojektion zwei Werte pro Bildpunkt. Die Menge dieser Werte wird in der Liste *CPhaseObjectMatrix* geordnet hinterlegt und bildet damit ein Phase-Shift-Bild (für je eine Position und Rotation).

Da aufgrund verschiedener Oberflächen- und Reflektionseigenschaften des Materials der gemessene Grauwert des Phasensignals verzerrt sein kann, braucht man ein geeignetes Mittel, diesen Wert wieder zu entzerren. Hierzu dienen der zuvor ermittelte Referenzwert als Nullwert des Phasensignals und das Referenzdelta als Phasenwellen-Maximum an diesem Bildpunkt. Anhand dieser beiden Größen lässt sich der gemessene Phasen-Grauwert zur Sinuswelle mit einer Amplitude von Eins normieren.

Ein Gray-Code-Streifen überdeckt genau einen Quadranten der Sinuswelle. Der erste (linkeste, unterste) projizierte Gray-Code-Streifen entspricht immer dem 1. Quadranten der Sinuswelle der Phasenprojektion. Daher lässt sich für jeden beliebigen Bildpunkt, falls zu diesem ein Gray-Code-Wert existiert, der Quadrant und somit der Phasenwert ermitteln. Der gemessene Phasenwert ist so von vornherein an den Gray-Code-Wert gekoppelt (synchronisiert).

Anschließend wird der Phasenwert, der noch im Bogenmaß vorliegt, für die anschließende Summierung mit dem diskreten Gray-Code-Betrag für diesen Matrix-Bildpunkt durch PI/2 (Länge eines Quadranten) dividiert.

Für die Phase-Shift-Serien einer Kamera ergibt sich damit in der Funktion *DeterminePhaseValues()* folgender Algorithmus:

für alle Mess-Positionen{

für zwei Rotationen{

lege neues Phase-Shift-Bild für Kamera an;

für alle Bildpunkte des Aufnahmebereiches{

wenn Bildpunkt gültigen Referenzwert besitzt, dann{

für alle Bilder der Phase-Shift-Sequenz dieser Position und Rotation{

```
normiere die vier Phasenwerte zu den Referenzwerten;
bestimme Phasen-Quadranten ;
bestimme Phasenwert in diesem Quadranten;
normiere Phasenwert zu PI / 2;
füge Phasenwert in Phase-Shift-Bild ein;
}
}
}
wenn im Menü ausgewählt, dann{
Skaliere Phasenwerte;
}
}
```

Das Phase-Shift-Bild kann wiederum grafisch als Test-Bild ausgegeben werden.

Skalierung der Phasenwerte:

Beim Auswerten der Phasenwert-Testbilder fällt auf, dass die Phasenwerte innerhalb eines *Gray-Code-Streifenbereiches* (siehe Abbildung 6-11) selten die gewünschten Maximalwerte erreichen. Bei einer theoretisch einwandfreien Messung müsste dies aber der Fall sein. Ein Erklärungsansatz liegt in der Aufnahme verzerrter Sinuswellen, durch eine schlechte Projektion, Unschärfen in der Aufnahme und unterschiedliche Kontrastverhältnisse der Kameraaufnahmen. Da sich der Phasenwert aus einem Durchschnittswert der vier jeweils um 90° verschobenen Phasenbilder zusammensetzt, wirken sich vom Sinusideal abweichende Intensitätswerte dahingehend aus, dass der Amplitudenwert des berechneten Wellenverlaufes verringert wird.

In der im Rahmen der Arbeit entwickelten Funktion *ScalePhaseValues()* wird durch eine lineare Anpassung des vorliegenden Phasenwertverlaufes (*g2*) an den idealen Verlauf (*g1*) versucht, die Phasenwerte wieder zu entzerren (Abbildung 6-10).



Abbildung 6-10: Phasenwertskalierung

Die Linie (*g2*), welche den ersten (kleinsten) Phasenwert y_{PA} und den letzten (größten) Phasenwert y_{PE} verbindet, soll den gemessenen Phasenwertverlauf linear annähernd darstellen. Um nun *g1* zur Geraden *g2* zu transformieren, benötigt man den Schnittpunkt (x_S , y_S) der beiden Geraden und den Quotienten *s* (*Skalierungsfaktor*) der beiden Geraden-Anstiege. Im Falle, dass y_{PA} und y_{PE} gegeben sind, erhält man sie wie folgt:

$$g_1 = x \qquad a = (y_{PE} - y_{PA}) \div 1$$

$$g_2 = ax + b \qquad b = y_{PA}$$

Gleichsetzen von g1 mit g2:

$$x_s = y_s = \frac{b}{1-a}$$

Gleichung 6-2: Schnittpunkt von g1 und g2

$$s = \frac{1}{a}$$

Gleichung 6-3: Skalierungsfaktor s

Jeder Phasenwert y_P eines Gray-Code-Streifenbereiches lässt sich mit Hilfe der Schnittstelle x_S und des Skalierungsfaktors *s* nach dem idealen Verlauf *g1* abbilden:

$$y_P = ((y_P - x_S) \cdot S) + x_S$$

Gleichung 6-4: Phasenwert-Skalierung

In der Implementierung der Funktion *ScalePhaseValues()* wird für die Skalierung das zu skalierende Phasenbild je nach Rotationslage der Wellenausbreitung entweder zeilenweise oder spaltenweise zweimal durchgegangen. Im ersten Durchlauf (*Modus 1*) werden in jeder Zeile/Spalte für jeden Gray-Code-Streifenbereich die beiden Skalierungsparameter ermittelt und in einer Liste für den entsprechenden Gray-Code-Streifen hinterlegt. Es werden jedoch nur Phasenwert-Reihen eines Gray-Code-Streifenbereiches in Betracht gezogen, dessen Gray-Code-Streifen mit seinen beiden angrenzenden Streifen eine lückenlose, aufsteigende Ordnung bildet (Fall 2). Hiermit soll die Qualität der zu sammelnden Daten gewahrt bleiben, da die Berechnung der Skalierungsparameter davon ausgeht, dass die Phasenwert-Reihe für die Berechnung die Breite eines vollständigen Gray-Code-Streifens abdeckt.

Am Ende des ersten Durchlaufes werden aus dieser Menge an Parametern zu jedem Gray-Code-Streifen (falls hierfür vorhanden) Durchschnittswerte ermittelt. Falls für einen Gray-Code-Streifen aufgrund der Qualitätskriterien (z.B. linkester Streifen im Gray-Code-Bild) keine Skalierungsparameter gesammelt werden konnten, werden die Durchschnittsparameter eines angrenzenden Streifens übernommen.

Im zweiten Durchlauf (*Modus 2*) wird nun die eigentliche Skalierung vorgenommen. Die Skalierung einer Phasenwert-Reihe wird immer dann durchgeführt, wenn in einer Zeile/Spalte ein Gray-Code-Streifen-Wechsel oder das Zeilen/Spaltenende erkannt wird. Es ergeben sich vier mögliche Fälle, je nach Art der Begrenzung des zu skalierenden Gray-Code-Streifenbereiches:

- Fall 0: der zu skalierende Gray-Code-Streifenbereich besitzt weder einen ordentlichen linken (absteigenden), noch einen ordentlichen rechten (aufsteigenden) *Gray-Code-Streifen-Nachbarn*
- Fall 1: der skalierende Gray-Code-Streifenbereich besitzt nur einen ordentlichen rechten Gray-Code-Streifen-Nachbarn
- Fall 2: der zu skalierende Gray-Code-Streifenbereich besitzt einen ordentlichen linken und einen ordentlichen rechten Gray-Code-Streifen-Nachbarn
- Fall 3: der skalierende Gray-Code-Streifenbereich besitzt nur einen ordentlichen linken Gray-Code-Streifen-Nachbarn

Eine ordentliche Gray-Code-Streifen-Nachbarschaft liegt dann vor, wenn zwei im Gray-Code-Bild angrenzende Gray-Code-Streifen sich in ihrer Wertigkeit nur um den Wert Eins unterscheiden.

Für jeden Fall variiert die Wahl der Skalierungsparameter.

Im Fall 0 werden, da keine klaren Bereichsgrenzen vorhanden sind, die Durchschnittswerte des jeweiligen Gray-Code-Streifens zur Skalierung herangezogen.

Im Fall 1 wird der Skalierungsfaktor jedes Mal separat ermittelt. Da hier eine ordentliche rechte Bereichsgrenze vorliegt, kann der Anstieg der Geraden g2 und somit der Skalierungsfaktor durch den letzten Phasenwert y_{PE} und die Schnittstelle x_S berechnet werden:

 $a = (y_{PE} - y_S) \div (1 - x_S)$

Gleichung 6-5: Skalierungsfaktor bei Fall 1

Für die Schnittstelle wird der Durchschnittswert des Gray-Code-Streifens herangezogen.

Im Fall 3 wird der Skalierungsfaktor ebenfalls separat ermittelt. Da hier eine ordentliche linke Bereichsgrenze vorliegt, kann der Anstieg der Geraden *g*² durch den ersten Phasenwert y_{PE} und die Schnittstelle x_S berechnet werden:

 $a = (y_S - y_{PA}) \div (x_S)$

Gleichung 6-6: Skalierungsfaktor bei Fall 2

Für die Schnittstelle wird wiederum der Durchschnittswert des Gray-Code-Streifens verwendet.

Im Fall 2 wird der Skalierungsfaktor separat ermittelt. Da hier entweder eine oder zwei ordentliche Bereichsgrenzen vorliegen, wird ermittelt, welche von den beiden Grenzen die optimale ist. Es ist nicht auszuschließen, dass obwohl der zu skalierende Gray-Code-Streifen zwei ordentliche Nachbarn besitzt, beispielsweise durch eine Überdeckung am Objekt ein Teil des zu skalierenden Gray-Code-Streifenbereiches nicht erfasst wurde, aber trotzdem zwei ordentliche Nachbarschaften vorliegen. Hat man die optimale Begrenzung gefunden, so fährt man je nachdem analog zu Fall1 oder Fall 3 fort. Eine beispielhafte Anwendung der Phasenwert-Skalierung findet sich in Abbildung 6-11.



Abbildung 6-11: links visualisiertes Phasen-Bild ohne Skalierung, rechts mit Skalierung

6.3.1.5 Triangulations-Bild-Erstellung

Schritt Mess-Bild-Auswertung Im letzten der werden in den Funktionen DetermineCalibrationTriValues() (Auswertung Kalibrierkamera-Bilder) und DetermineCoordinationTriValues() (Auswertung Messkamera-Bilder) die zuvor ermittelten Daten verwendet, um die direkten (Matrix-Bildpunkte) und indirekten (inverse Bildpunkte) Triangulationswerte eines Kamera-Bildes an jeweils einer Mess-Position zu bestimmen.

Der *direkte Triangulationswert* entspricht dem relativen Abstand des betrachteten Matrix-Bildpunktes vom Bild-Mittelpunkt der Kamera-Bildebene, bezogen auf die Gesamtlänge der Bildebene. Er kann *direkt* aus den Matrix-Bildkoordinaten des Mess-Bildes abgeleitet werden.

Der *indirekte Triangulationswert* bezeichnet den relativen Abstand des betrachteten inversen Bildpunktes vom Bild-Mittelpunkt der Bildebene der inversen Kamera (Projektor), bezogen auf deren Bildebenen-Gesamtlänge. Er wird aus den Informationen der Gray-Code- und Phase-Shift-Bilder gewonnen.

Somit lassen sich für ein Messkamera-Bild, pro als Matrix-Bildpunkt abgebildeten Objektpunkt, zwei Triangulationswerte, die vier Koordinatenwerten (direkter x-, y-Wert, indirekter x-, y-Wert) entsprechen, ermitteln. Ein Paar von direkten und indirekten Werten, welche den gleichen Objektpunkt abbilden, bildet das eigentliche *Triangulationswert-Paar*.

Für ein Kalibrierkamera-Bild werden pro als Matrix-Bildpunkt abgebildeten Objektpunkt nur die indirekten Triangulationswerte (indirekter x-, y-Wert) benötigt. Das Triangulationswert-Paar kann nur zwischen verschieden Kamera-Bildern ermittelt werden. Dieses ergibt sich aus zwei indirekten Triangulationswerten, die von verschiedenen Bildern der Kalibrierkamera über denselben Matrix-Bildpunkt (muss in beiden Bildern gültig sein) miteinander verknüpft sind.

In einem *Triangulations-Bild* (Liste vom Typ *CTriangulationObjectMatrix*) werden für jeden Matrix-Bildpunkt des Aufnahmebereiches entweder die direkten oder indirekten Triangulationswerte eines Kamerabildes hinterlegt. Eine Kalibrierkamera besitzt somit für jede Mess-Position genau ein (indirektes) Triangulations-Bild. Eine Messkamera besitzt hingegen für jede Mess-Position genau zwei (indirektes + direktes) Triangulations-Bilder.

Die Zuordnung zwischen den direkten und indirekten Werten erfolgt wiederum über die identische Listen-Indizierung.

Die Bestimmung des direkten Triangulationswertes erfolgt über die entsprechende Matrix-Bildkoordinate:

```
für alle Mess-Positionen{
```

```
für zwei Rotationen{

lege neues Triangulations-Bild für Kamera an;

für alle Bildpunkte des Aufnahmebereiches{

wenn Bildpunkt gültigen Referenzwert besitzt, dann{

direkter X-Triangulationswert = (X-Bildkoordinate – (Bildmatrix-Breite / 2)) /

Bildmatrix-Breite;

direkter Y-Triangulationswert = (Y-Bildkoordinate – (Bildmatrix-Höhe / 2)) /

Bildmatrix-Höhe;

füge direkten Triangulationswert in Triangulations-Bild ein;

}

}
```

Bei der Bestimmung des indirekten Triangulationswertes werden die Gray-Code- und Phase-Shift-Daten zusammengeführt:

für alle Mess-Positionen{

für zwei Rotationen{

lege neues Triangulations-Bild für Kamera an;

für alle Bildpunkte des Aufnahmebereiches{

wenn Bildpunkt gültigen Referenzwert besitzt, dann{
 diskreter Wert = Gray-Code-Wert;

kontinuierlicher Wert = Phase-Shift-Wert;

indirekter X-Triangulationswert = ((diskreter Wert + kontinuierlicher Wert) - (Bildmatrix-Breite / 2)) / Bildmatrix-Breite;

indirekter Y-Triangulationswert = ((diskreter Wert + kontinuierlicher Wert) - (Bildmatrix- Höhe / 2)) / Bildmatrix-Höhe;

füge indirekten Triangulationswert in Triangulations-Bild ein;

```
}
}
}
```

Die so angewandte Bestimmung der indirekten Triangulationswerte bietet eine Unabhängigkeit gegenüber dem hier verwendeten Phase-Shift-Verfahren. Ohne weiteres könnten auch andere Subpixel-Verfahren (z.B. Line-Shift-Verfahren) mit dem Gray-Code-Verfahren kombiniert werden.

Auch die Triangulations-Bilder können visuell als Testbild ausgegeben werden:





6.3.2 Kalibrierung der Messgeräte

Nach der Auswertung der Mess-Bild-Daten und der Ermittlung der Triangulationswerte können nun die für die Berechnung der Objektkoordinaten benötigten Orientierungs-Daten der Messkamera(s) und des Projektors berechnet werden.

Die Klasse *CCalibration* koordiniert die Kalibrierung des Projektors und der Messkamera(s). Zuerst werden über die Triangulationswerte der Kalibrierkamera(s) die einzelnen Projektor-Positionen ermittelt. Anschließend werden mit Hilfe dieser Orientierungs-Daten und den Triangulationswerten der Messkamera(s) die Positionen der Messkamera(s) bei der Messung bestimmt. Die Klasse *CProjectorCalibration* steuert die gesamte Kalibrierung des Projektors, und die Klasse *CMeasureCamCalibration* kalibriert jeweils eine Messkamera für eine Mess-Position. Beide Klassen sind Spezialisierungen der Klasse *CDeviceCalibration* und besitzen die Funktion *Run()*, welche die einzelnen Schritte zur Messgerät-Orientierung steuert.

Ablauf der Projektor-Kalibrierung:

- Initialisierung des Bündelblockausgleiches
- Bestimmung der Kalibrierkamera-Reihenfolge (bei mehren Kalibrierkameras)
- Generierung von Bündeln
- Bestimmung der Startwerte für den Bündelblockausgleich
- funktionales Modell des Bündelblockausgleichs mit Startwerten füllen
- Durchführung des Bündelblockausgleiches
- Übernahme der Orientierungs-Werte für alle Mess-Positionen

Ablauf der Messkamera-Kalibrierung:

- Initialisierung des Bündelblockausgleiches
- Generierung von Bündeln
- Bestimmung der Startwerte für den Bündelblockausgleich

- funktionales Modell des Bündelblockausgleichs mit Startwerten füllen
- Durchführung des Bündelblockausgleiches
- Übernahme der Orientierungs-Werte für diese Mess-Position

6.3.2.1 Initialisierung des Bündelblockausgleiches

Die Initialisierung des Bündelblockausgleiches umfasst die Festlegung der auszugleichenden Orientierungs-Unbekannten (siehe Gleichung 3-2) im funktionalen Modell. Dabei wird die Anzahl der beteiligten Mess-Bilder (identisch der Mess-Positionen) samt deren auszugleichenden inneren und äußeren Orientierungs-Parametern in der Funktion *InitFunctionalModel()* angegeben. Um die Ausgleichung durchzuführen, werden dann nur noch die Startwerte für jede Unbekannte und die Beobachtungen (homologen Bildpunkte) benötigt.

Das im Programm umgesetzte Ausgleichungs-Modul (siehe Abbildung 6-13) wurde so konzipiert, dass es problemlos mit verschiedenen funktionalen Modellen auf Basis der vermittelten Beobachtungen zusammenarbeitet. So dient es auch bei der relativen Orientierung als Ausgleichungs-Modul.

Beschreibung des Ausgleichungs-Moduls:

Die abstrakte Klasse *CFunctionalModel* bildet die Schnittstelle zum jeweiligen funktionalen Modell ($I + v = A \cdot x$). Sie stellt die virtuellen Funktionen zum Erstellen der Designmatrix *A* (Gleichung 3-8), Zum Erstellen des Beobachtungsvektors *I* (Gleichung 3-6) und zur Übergabe des Verbesserungsvektors *v* bereit, die von der konkreten Klasse eines funktionalen Modells implementiert werden müssen.

Die Klasse *CAdjustmentControl* nutzt nun diese Methoden, ohne Kenntnis der konkreten Implementierung des funktionalen Modells, um die Ausgleichsrechnung durchzuführen. Hierbei wird die Ausgleichung solange wiederholt, bis entweder die Vektor-Norm des Verbesserungsvektors *v* (*Residuum*) einen Grenzwert unterschreitet (der optimale Fall) oder die Ausgleichsrechnung nicht konvergiert und ein Iterations-Limit überschritten wird (Abbruch der Ausgleichsrechnung).

Die eigentliche Ausgleichsrechnung findet in der Klasse *CAdjustment* statt. Hier wird mit Hilfe einer eingebundenen Mathematik-Bibliothek (*LTI-Computer Vision Library - LTI-Lib*) das Normalgleichungssystem aufgestellt und mittels einer QS-Zerlegung (*Householder-Transformation*) aufgelöst.



Abbildung 6-13: Klassen-Diagramm Ausgleichungs-Modul

funktionales Modell des Bündelblockausgleiches:

Die Implementierung des funktionalen Modells für den Bündelblockausgleich übernimmt die Klasse *CPhotogrammetry10ParameterFM*. Ihre Aufgaben sind unter Anderem das Aufstellen der Designmatrix *A*, des Unbekanntenvektors *X* und des Vektors der gekürzten Beobachtungen *I*. Die Kollinearitätsgleichungen und ihre partiellen Ableitungen werden von der Klasse *CPhotogrammetry10PEquation* bereitgestellt.

Bei der Initiierung des Bündelblockausgleiches wird zuerst die Anzahl der Mess-Bilder (*CAdjustingImage*) angegeben. Jedes Ausgleichs-Bild besitzt jeweils ein Objekt für die innere Orientierung (*CAdjustingInnerOrientation*) und äußere Orientierung (*CAdjustingOuterOrientation*). Jedes Objekt der inneren Orientierung besitzt zudem ein Objekt *CAdjustingInnerOrientationAP*, welches für jeden Parameter der inneren Orientierung den Ausgleichungs-Status bereithält (analog für *CAdjustingOuterOrientation*). Somit kann man explizit für jede unbekannte Größe des Bündelblockausgleiches separat entscheiden, ob sie verbessert wird oder konstant bleibt im Ausgleichungs-Prozess. Zusammen genommen bildet diese Objekt-Verkettung die *Ansichten-Datenstruktur* (Abbildung 6-14).



Abbildung 6-14: Klassendiagramm Bündelblockausgleich (funktionales Modell)

Bündelblockausgleichs-Initialisierung bei der Projektor-Kalibrierung:

1. Vereinfachung:

Da die erste Projektor-Position als Zentrum des globalen Weltkoordinatensystems definiert ist, sind alle Werte der äußeren Orientierung für diese Position gleich Null. Somit brauchen Parameter der äußeren Orientierung an dieser Position nicht ausgeglichen zu werden.

2. Vereinfachung:

Es ist anzunehmen, dass die Werte der inneren Orientierung eines Messgerätes innerhalb eines Aufnahme-Prozesses konstant bleiben. Daher genügt es, die innere Orientierung nur für das erste Mess-Bild zu bestimmen und die Werte für die restlichen Mess-Bilder zu übernehmen.

Für alle weiteren Mess-Bilder der Projektor-Kalibrierung werden so nur noch die jeweiligen äußeren Orientierungen in der Ausgleichung verbessert. Der Ausgleichungs-Status der Verknüpfungs-Punkte wird erst bei der Startwert-Übertragung angegeben, da die Punkte erst im späteren Schritt der Startwertbeschaffung generiert werden.

Bündelblockausgleichs-Initialisierung bei der Messkamera-Kalibrierung:

3. Vereinfachung:

Beim Bündelblockausgleich einer Messkamera werden genau zwei Mess-Bilder ausgeglichen. Das erste Bild ist das inverse Projektor-Bild und das zweite Bild das der Messkamera an der gleichen Aufnahme-Position. Da der Projektor schon vor der Messkamera kalibriert wurde, werden dessen Orientierungs-Werte nicht mehr ausgeglichen, sondern gehen als konstante Werte ein.

4. Vereinfachung:

Analog zur Projektor-Kalibrierung wird die innere Orientierung bei der Messkamera-Kalibrierung nur an der ersten Mess-Position in der Ausgleichung verbessert.

Mindestanzahl homologer Bildpunkte aller beteiligten Bilder:

Bei der Durchführung des Bündelblockausgleiches muss zu jeder unbekannten Größe mindestens eine (Beobachtungs-) Gleichung existieren, die noch keiner anderen Unbekannten zugeordnet wurde. Andernfalls wäre die Ausgleichs-Matrix nicht regulär und somit nicht lösbar.

Die Beobachtungs-Gleichungen entsprechen den homologen Bildpunkten, die über Bündel von mehreren Bildern aus die gleichen Objektpunkte abbilden. Je ein korrespondierendes Bildpunktpaar (Triangulationswert-Paar) liefert vier Gleichungen, von denen drei Gleichungen für den beobachteten Objektpunkt benötigt werden. Es bleibt eine Gleichung für eine zu bestimmende unbekannte Größe. Um nun eine untere Schranke von homologen Bildpunkten pro Bild-Ansicht (*Mindestpunktanzahl*) NP_{Min} für alle am Aufnahme-Prozess beteiligten Bilder anzugeben, kann man das Problem auf den Stereo-Bild-Fall reduzieren.

Nach der Initiierung des Bündelblockausgleiches lässt sich die Anzahl der zu bestimmenden Unbekannten pro Bild berechnen. Bildet man paarweise die Summe der unbekannten Größen, so entspricht die höchste Summe einer unteren Schranke. Diese untere Schranke wird in der anschließenden Bündel-Generierung als Bildpunkt-Minimum für jedes beteiligte Bild verwendet (siehe Tabelle 6-3 und Gleichung 6-7).

Beispiel:

Bildnummer	1	2	3	4	5
Anzahl der Unbekannten	11	6	3	11	6

Tabelle 6-3: Beispiel Mindestpunktanzahl

$$NP_{Min} = Max\{(11+6), (11+3), (11+11), (11+6), (6+3), (6+11), (6+6), (3+11), (3+6), (11+6)\} = 22$$

Gleichung 6-7: Beispiel Mindestpunktanzahl

Der Benutzer kann über die Kalibrierungs-Einstellungen die Mindestpunktanzahl noch manuell erhöhen.

6.3.2.2 Skalierbarkeit der Messeinrichtung (KK, MK)

Bei der Entwicklung des Programms wurde berücksichtigt, dass verschiedene Messkonfigurationen realisierbar sind. Neben einen Projektor als inverse Messkamera und einem optionalen Drehtisch (auch eine manuelle Positionierung der Messgeräte ist möglich) ist die Anzahl der verwendeten Mess- und Kalibrierkameras beliebig.

Die einfachste Messkonfiguration benötigt jeweils eine Mess- und Kalibrierkamera. Mit dieser Konfiguration wäre eine Rundumvermessung des Messobjektes nicht durchführbar. Hierzu sind mindestens zwei räumlich gegenüberliegende Kalibrierkameras von Nöten.

Das Programm führt zwei Listen der am Messvorgang beteiligten Mess- und Kalibrierkameras (*CMeasureCamList*, *CCalibCamList*). Über diese Listen werden alle nötigen Aufnahme- und Auswertungs-Operationen, wie Bildaufnahme und Kamera-Orientierung, sequentiell geordnet abgearbeitet.

Verwendung mehrerer Messkameras:

Jedes Kamera-Objekt verfügt über eine geordnete Liste der Datei-Namen ihrer Mess-Bilder, ihrer Referenz-Bilder (vom Typ *CRefObjectMatrix*), der Gray-Code-Bilder (vom Typ *CGrayCodeObjectMatrix*) und der Phase-Shift-Bilder (vom Typ *CPhaseObjectMatrix*), so dass alle nötigen Informationen zur späteren Auswertung direkt am jeweiligen Kamera-Objekt hängen. Zusätzlich besitzt jedes Messkamera-Objekt für jede Mess-Position eine Liste der direkten und indirekten Triangulations-Bilder (vom Typ *CTriangulationObjectMatrix*).

Bei der Verwendung mehrerer Messkameras werden zunächst, nach ihrer Reihenfolge in der Liste, die Mess-Bilder genommen und hinterlegt. Anschließend werden die Berechnungen zum Erhalt der Triangulations-Bilder durchgeführt. Die Orientierung der Messkameras zur jeweiligen Projektor-Position und die Einordnung ins Weltkoordinatensystem erfolgen ebenfalls hintereinander. Zum Schluss werden von allen in der Liste registrierten Messkameras die Objektkoordinaten ihrer Triangulations-Bilder errechnet und in ein gemeinsames WKS überführt.

Interessant wäre der Gebrauch mehrerer Messkameras bei gleichzeitigem Verzicht auf einen Drehtisch. Somit könnten auch größere Objekte vermessen werden.

Verwendung mehrerer Kalibrierkameras:

Im Gegensatz zur Messkamera besitzt jedes Kalibrierkamera-Objekt nur eine Liste mit indirekten Triangulations-Bildern für jede Position, da die direkten Triangulationswerte der Kalibrierkamera nicht zur Kalibrierung und Koordinatenberechnung mit herangezogen werden.

Die Bildaufnahme bei mehreren Kalibrierkameras erfolgt analog zu den Messkameras.

Die grundlegende Aufgabe der Kalibrierkameras besteht darin, den Projektor an der jeweiligen Aufnahme-Position zu orientieren. Wenn nun mehrere Kalibrierkameras zur Verfügung stehen, muss für zwei aufeinanderfolgende Läufe die Kalibrierkamera zur Projektor-Kalibrierung herangezogen werden, welche in diesen beiden Läufen von allen Kalibrierkameras den größtmöglichen Aufnahmebereich zwischen Messobjekt und Projektionsfläche aufgenommen hat. Das entspricht der Kamera, die mit ihrer Sichtachse der Sichtachse des Projektors am dichtesten ist. Es muss also eine optimale Kalibrierkamera-Reihenfolge (*Kalibrierkamera-Lauf-Liste*) für den Aufnahme-Prozess bestimmt werden. Dies geschieht in der Funktion *DetermineCalibCamSequence()* der Klasse *CProjectorCalibration*.

Als Vergleichsgrundlage dienen die Triangulations-Bilder (*CTriangulationObjectMatrix*) der einzelnen Kameras und Positionen. Jedes Triangulations-Bild kennt die Anzahl seiner

gültigen Matrix-Bildpunkte. Wenn man das Triangulations-Bild mit der höchsten Anzahl valider Bildpunkte (*maxValidPoints*) aller Läufe einer Kalibrierkamera als Bezugspunkt nimmt, so kann man für die restlichen Triangulations-Bilder eine relative *Positions-Qualität* (*positionQuality*) dazu definieren:

 $positionQuality = \frac{actualValidPoints}{maxValidPoints}$

Gleichung 6-8: Positions-Qualität einer Kamera

Die Kamera, welche in zwei aufeinanderfolgenden Läufen zusammengenommen die beste Positions-Qualität besitzt, wird als Kalibrierkamera dieser zwei Läufe definiert und in die Kalibrierkamera-Lauf-Liste hinzugefügt (siehe Beispiel Tabelle 6-4).

Beispiel:

Lauf	1 - 2	2 – 3	3 - 4	4 – 5
optimale	1	1	3	2
Kalibrierkamera				

Tabelle 6-4: Beispiel Kalibrierkamera-Lauf-Liste

6.3.2.3 Generierung von Bündeln

Um mittels der erfassten Bildpunkte (Triangulationswerte) Aussagen über die innere und äußere Orientierung der beteiligten Bilder machen zu können, ist es notwendig, dass jedem beobachteten Objektpunkt mindestens zwei Bildpunkte aus verschiedenen Ansichten zugeordnet werden. Bei mehreren Objektpunkten, die von verschiedenen Ansichten aus beobachtet werden, spricht man daher anschaulich von Bündeln. Durch diese enge Verknüpfung der Bilder über ihre Bildpunkte und deren Objektpunkte entsteht eine Informationsstruktur, die zum Beispiel für die Orientierungs-Bestimmung genutzt werden kann. Je öfter ein Objektpunkt (Verknüpfungspunkt) von Bildpunkten abgebildet wird, desto weniger Bildpunkte (Verbesserungs-Gleichungen) werden insgesamt für die Orientierung benötigt.

Bündel-Generierung für die Projektor-Kalibrierung:

In den Klassen *CProjectorCalibration* und *CMeasureCamCalibration* wird die Strahlenbündel-Generierung von der Funktion *GetBundleSelection()* gesteuert. Sie benutzt dafür die Klasse *CBundleSelection* und übergibt ihr die Kalibrierkamera-Lauf-Liste und die Triangulations-Bilder der betreffenden Kalibrierkamera (KK).

Da nicht die Bildpunkte der Kalibrierkamera selbst, sondern die von der Kalibrierkamera gemessen Bildpunkte der inversen Kamera (Projektor) zur Bündel-Generierung verwendet werden, können zusammenhängende Bündel nur innerhalb der Aufnahme-Posionen erstellt werden, die von der gleichen Kalibrierkamera erfasst wurden (siehe 6.3.2.2).

Nach dem Beispiel von Tabelle 6-4 werden somit zusammengehörige Bildpunkt-Bündel für die Bilder von KK-1 aus Lauf 1 bis 3, für KK-3 aus Lauf 3 bis 4 und für KK2 aus Lauf 4 bis 5 generiert.

BP-Nr	OP-Nr	Bild-Nr	KK-Nr	KK-X-Wert	KK-Y-Wert	BP-X-Wert	BP-Y-Wert
1	1	1	1	-17	213	1.342	-0.721
2	2	1	1	23	94	0.565	-0.312
3	1	2	1	-17	213	1.002	-0.779
4	2	2	1	23	94	0.889	-0.298
5	3	3	2	230	-69	-2.016	0.237
6	3	4	2	230	-69	-2.309	0.299

Die Bündel-Informationen werden in der Liste CImgPointObservation hinterlegt.

Tabelle 6-5: Beispiel Bündel-Daten

Diese Liste bildet die Basis für die anschließende Näherungswert-Beschaffung und den Bündelblockausgleich (siehe Tabelle 6-5).

Die Bildpunkt-Nummer (BP-Nr) ist ein fortlaufender Index der Bündel-Bildpunkte.

Die *Objektpunkt-Nummer* (*OP-Nr*) kennzeichnet den durch den Bildpunkt abgebildeten Objektpunkt.

Die Bildnummer (Bild-Nr) stellt die Aufnahme-Position des Bildes innerhalb der Messung dar.

Die Kalibrierkamera-Bildpunkt-Koordinaten (KK-X-Wert, KK-Y-Wert) bezeichnen den betreffenden direkten Matrix-Bildpunkt der Kalibrierkamera, und die Bildpunkt-Koordinaten (BP-X-Wert, BP-Y-Wert) entsprechen den indirekten Triangulationswerten dieses Matrix-Bildpunktes.

Die Objektpunkt-Nummer stellt eine Redundanz in der Liste dar, da sie dem Tupel *Kalibrierkamera-Nummer (KK-Nr)* und Kalibrierkamera-Bildpunkt-Koordinaten entspricht.

Triangulationswert-Paare bilden jeweils Datensätze mit gleicher Objektpunkt- und Kalibrierkamera-Nummer.

Bündel-Generierung für die Messkamera-Kalibrierung:

Im Gegensatz zur Projektor-Kalibrierung werden für die Bündel-Generierung nicht nur die indirekten Triangulationswerte, sondern auch die direkten Triangulationswerte der Messkamera (MK) der Klasse *CBundleSelection* übergeben.

Wie schon oben erwähnt, werden jeweils nur Bündel zwischen einer Mess-Kamera-Ansicht und der zugehörigen inversen Projektor-Ansicht einer Aufnahme-Position erzeugt.

Die Bündel-Daten werden analog zur Projektor-Kalibrierung hinterlegt, außer dass der Eintrag für die Kalibrierkamera-Nummer entfällt und die Einträge für die Kalibrierkamera-Bildpunkt-Koordinaten für die Matrix-Bildpunkt-Koordinaten der Messkamera benutzt werden.

Erstellung größtmöglicher Bündel:

Wie schon im Abschnitt 3.2 dargelegt, ist ein Bündelverband über mehrere Ansichten umso stabiler für den Bündelblockausgleich, wenn größtmögliche Bündel vorliegen. Dieses

Bündelmaximum wäre gegeben, wenn alle Verknüpfungspunkte in allen Bild-Ansichten durch homologe Bildpunkte abgebildet würden. Daher wurde eine Vorgehensweise bei der Bündel-Generierung entwickelt, die sich diesem Maximum bestmöglich anzunähern versucht.

1.Stufe:

In der ersten Stufe wird versucht, Bildpunkte von Verknüpfungspunkten zu finden, die in allen Bündel-Ansichten abgebildet sind. Hierzu wird eine *virtuelle Ansicht* erzeugt, die Bildpunkte enthält, welche Objektpunkte abbilden, die von allen Ansichten aus sichtbar sind. Da jedes indirekte oder direkte Triangulations-Bild genau eine Ansicht repräsentiert, wird nun über eine Schnittmengen-Operation der validen Bildpunkte aller Triangulations-Bilder eine solche Ansicht erstellt (Abbildung 6-15).

Aus der Menge der Bildpunkte dieser virtuellen Ansicht werden durch den nachfolgenden Algorithmus die homologen Bildpunkte bestimmt.

2.Stufe:

Falls die Anzahl der in der ersten Stufe bestimmten homologen Bildpunkte nicht der vorgegebenen Mindestpunktanzahl entspricht, so wird die zweite Stufe ausgeführt.

Hierbei werden jeweils paarweise für die Triangulations-Bilder benachbarter Ansichten die virtuellen Ansichten durch die Schnittmengen-Operation gebildet und darauf analog die homologen Bildpunkte bestimmt.

Bild Position 1	Bild Position 2	Schnittbild		

Abbildung 6-15: Schnittbild – Generierung zweier benachbarter Triangulations-Bilder

gleichmäßige Verteilung der homologen Bildpunkte:

Ziel bei der automatischen Ermittlung der virtuellen homologen Bildpunkte ist, eine möglichst gleichmäßig gestreute Verteilung der Punkte über das Messobjekt zu erlangen. Als Maßstab für die Güte der Punktverteilung kann das Schema der sogenannten GRUBER-Punkte herangezogen werden, welches Verknüpfungspunkte in den Ecken und den Mitten des Modellbereiches empfiehlt [Luh03] (siehe Abbildung 6-16).


Abbildung 6-16: links gute, rechts schlechte Bildpunktverteilung

Zu Beginn werden acht Startpunkte (erste Generation) ermittelt:

- 1. der oberste Punkt (y-max): Po
- 2. der rechteste Punkt (x-max): Pr
- 3. der linkeste Punkt (x-min): P_I
- 4. der unterste Punkt (y-min): P_u
- 5. Punkt mit max(x + y): P_{mama}
- 6. Punkt mit min(x + y): P_{mimi}
- 7. Punkt mit max(x y): P_{mami}
- 8. Punkt mit max(y x) P_{mima}

Hierbei wird das Schnittbild von unten links nach oben rechts, Zeile für Zeile durchgegangen und folgender Algorithmus angewendet:

für alle Matrix-Bildpunkte B_{x,y} des Schnittbildes{

wenn Bildpunkt gültigen Triangulationswert besitzt, dann{

$$\begin{split} P_{o} &:= B, \ wenn \ B_{y} > P_{oy}; \\ P_{r} &:= B, \ wenn \ B_{x} <= P_{rx}; \\ P_{l} &:= B, \ wenn \ B_{x} > P_{lx}; \\ P_{u} &:= B, \ wenn \ B_{y} >= P_{uy}; \\ P_{mama} &:= B, \ wenn \ (B_{x} + B_{y}) > (P_{mama_{x}} + P_{mama_{y}}); \\ P_{mimi} &:= B, \ wenn \ (B_{x} + B_{y}) < (P_{mimi_{x}} + P_{mimi_{y}}) \\ P_{mami} &:= B, \ wenn \ (B_{x} - B_{y}) > (P_{mami_{x}} - P_{mami_{y}}); \\ P_{mima} &:= B, \ wenn \ (B_{y} - B_{x}) > (P_{mima_{y}} - P_{mima_{x}}); \end{split}$$

}

}

Diese acht gewonnen Punkte bilden die *erste Punkt-Generation*. Sie werden in separate, für jede Ansichts-Position der im Schnittbild vereinten Ansichten vorhandene, temporäre Bildpunkt-Listen eingetragen.

Ausgehend von den acht Randpunkten werden sukzessiv weitere Punkt-Generationen ermittelt. Hierbei bilden die Mittelpunkte der Geraden zwischen allen Punkten der aktuellen Generation mit allen Punkten der vorherigen Generationen die neue Punkt-Generation. Um eine möglichst breite Punktverteilung zu gewinnen, wird ein neuer Punkt nur dann in die temporäre Bildpunkt-Liste aufgenommen, wenn sein Abstand zu allen anderen Punkten der Liste einen *minimalen Bildpunktabstand (m distanceThreshold)* nicht unterschreitet.

Diese Punktgewinnung wird solange fortgesetzt, bis entweder das Generations-Limit erreicht wird (Abbruch der Bündel-Generierung) oder die Summe der validen homologen Bildpunkte der temporären Punkt-Listen die geforderte Mindestpunktanzahl überschreitet. Im zweiten Fall werden die validen Bildpunkte der einzelnen temporären Listen (im Stereofall zwei) in die übergeordnete Bündel-Liste (Tabelle 6-4) übertragen.



Abbildung 6-17: Punkt-Generationen 1-3 auf dem Schnittbild

Auch das Ergebnis der Bündel-Generierung kann visuell ausgegeben werden:



Abbildung 6-18: Verteilung der homologen Punkte nach der Bündel-Generierung

6.3.2.4 Generierung von Startwerten

Für jeden Parameter der Kollinearitätsgleichungen müssen für die einzelnen Aufnahme-Ansichten Startwerte für den Ausgleichungs-Prozess bereitgestellt werden. Je exakter diese Näherungswerte den reellen Werten entsprechen, um so günstiger verläuft die Ausgleichung. Schlechte Eingaben hingegen können das Modell derart verzerren, dass die Ausgleichung nicht konvergiert.

Für die Vereinfachung der Startwert-Gewinnung wird davon ausgegangen, dass die innere Orientierung der Messgeräte (Projektor, Messkamera(s)) hinreichend genau bekannt ist. Somit müssen nur noch die äußeren Orientierungen der Messgeräte während des Mess-Vorganges und die Verknüpfungspunkt-Koordinaten, welche die verwendeten homologen Bildpunkte abbilden, ermittelt werden. Zur Bestimmung der äußeren Orientierungen kommt das in 4.1 beschriebene Verfahren der relativen Orientierung zum Einsatz. Die Berechnung der Modell-Koordinaten erfolgt über den in 4.3 dargestellten Vorwärtsschnitt.

Da die relative Orientierung ebenfalls auf einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen basiert, findet das Ausgleichungs-Modul wieder Anwendung. Das funktionale Model wird hierbei durch die Klasse *CCoplanarConditionFM* implementiert:



Abbildung 6-19: Klassendiagramm relative Orientierung

Die Schnittstelle Moduls relativen Orientieruna Klasse des der bildet die CRelativeOrientation. Ihr werden die zuvor generierten homologen Bildpunkte (Triangulationswerte) beider zueinander zu orientierenden Bildansichten in der Funktion GetRelativeOrientation() der Klassen CProjectorCalibration und CMeasureCamCalibration übergeben. Nach der Orientierung gibt sie die relative äußere Orientierung der zweiten zur ersten Bildansicht zurück.

relative Orientierung der Projektor-Positionen:

Ausgangspunkt des Folgebildanschlusses ist die relative Orientierung der zweiten zu der ersten Projektor-Position. Anschließend werden alle nachfolgenden Projektor-Positionen jeweils relativ zu ihrer Vorgänger-Position orientiert. Die Vorgänger-Position bildet dabei immer das Zentrum des jeweiligen Modellkoordinatensystems.

relative Orientierung der Messkamera-Positionen:

Die einzelnen Messkamera-Positionen werden jeweils zu ihrer korrespondierenden Projektor-Position relativ orientiert, wobei die Projektor-Position das Zentrum des Modellkoordinatensystems bildet.

absolute Orientierung:

Die Berechnung der absoluten Orientierung führt die Funktion *GetAbsoluteOrientation()* der Klassen *CProjectorCalibration* und *CMeasureCamCalibration* durch.

Die erste Projektor-Position bildet das Zentrum des Weltkoordinatensystems und der Basis-Vektor zur zweiten Projektor-Position dient als Maßstabsbezug aller weiteren Distanzen im System. Durch diese Festlegung vereinfacht sich die absolute Orientierung auf die Maßstabsbestimmung und die Ähnlichkeitstransformation der einzelnen relativen Orientierungen. Somit vereinfachen sich die Verbesserungsgleichungen (Gleichung 4-9) zu einem überbestimmten linearen Gleichungssystem mit einer Unbekannten.

Das eigentliche Problem besteht in dem Auffinden der gemeinsamen Verknüpfungspunkte im Welt- und Modellkoordinatensystem. Für eine vorhandene Menge an homologen Bildpunkten (Triangulationswerte) in einer Weltkoordinaten-Ansicht müssen die korrespondierenden Bildpunkte in der Modellkoordinaten-Ansicht ermittelt (*gematcht*) werden. Dies ist nur über die inversen Bildkoordinaten des indirekten Triangulations-Bildes, das die Projektor-Ansicht darstellt, möglich. Für die absolute Orientierung der Projektor- und Messkamera-Positionen wurden somit zwei verschiedene Herangehensweisen entwickelt:

absolute Orientierung der Messkamera-Positionen:

Zuerst werden die Bildkoordinaten des indirekten Triangulations-Bildes zu den Verknüpfungspunkten im Weltkoordinatensystem bestimmt. Da die Messkamera-Kalibrierung nach der Projektor-Kalibrierung erfolgt, kann man davon ausgehen, dass alle Projektor-Positionen bereits absolut orientiert sind. Für eine beliebige Messkamera-Position wird, wie im Abschnitt 6.3.2.2 beschrieben, die Kalibrierkamera (ErstKK) ermittelt, die an dieser Position die größte Projektionsfläche des Projektors erfasst. Nun ermittelt man nach 6.3.2.3 homologe Bildkoordinaten für die Ansicht der ErstKK mit einer benachbarten Kalibrierkamera-Position (ZweitKK). Anschließend werden die Koordinaten der Verknüpfungspunkte dieser Bildkoordinaten im Weltkoordinatensystem über einen Vorwärtsschnitt (4.3) Objekt-Koordinaten bestimmt. Um nun die derselben Verknüpfungspunkte in der Messkamera-Ansicht zu ermitteln, müssen die indirekten Triangulationswerte der Erstkamera mit den indirekten Triangulationswerten der Messkamera-Ansicht gematcht werden. Das heißt, es müssen die Bildkoordinaten des direkten Triangulations-Bildes der Messkamera-Ansicht ermittelt werden, an denen die indirekten Triangulationswerte beider Ansichten annähernd übereinstimmen:

setze aktuell_bester_Wert := 10000;

für alle indirekten Triangulationswerte der Erstkamera{

für alle indirekten Triangulationswerte der Messkamera-Ansicht{

wenn beide Werte gültig sind, dann{

wenn aktuell_bester_Wert > Betrag(indirekter-x-Wert-Erstkamera - indirekter-x-Wert-Messkamera) + (indirekter-y-Wert-Erstkamera - indirekter-y-Wert-Messkamera), dann{

direkter-x-Wert-Messkamera := aktueller_direkter_x_Wert;

direkter-y-Wert-Messkamera := aktueller_direkter_y_Wert;

```
aktuell_bester_Wert := Betrag(indirekter-x-Wert-Erstkamera - indirekter-x-
Wert-Messkamera) + (indirekter-y-Wert-Erstkamera - indirekter-y-Wert-
Messkamera)
}
}
```

Mit Hilfe der bestimmten direkten und indirekten Triangulationswerte der Messkamera-Ansicht lassen sich über die relative Orientierung der Messkamera die Koordinaten der Verknüpfungspunkte im Modellkoordinatensystem bestimmen.

Die Verknüpfungspunkt-Koordinaten im Welt- und Modellkoordinatensystem und die absolute äußere Orientierung der Projektor-Position werden nun der Klasse *CAbsoluteOrientation* übergeben, die nach 4.3 den Maßstab ermittelt und über eine Ähnlichkeitstransformation die relative Orientierung der Messkamera-Position in eine absolute Orientierung überführt.

absolute Orientierung der Projektor-Positionen:

Da die erste Projektor-Position das Zentrum des Weltkoordinatensystems und der Basis-Vektor zur zweiten Projektor-Position den Maßstabsbezug bildet, müssen erst die Projektor-Positionen ab Position drei absolut transformiert werden.

Dabei werden die Positionen der Reihe nach orientiert. Man benötigt immer drei aufeinanderfolgende Positionen. Die dritte Position stellt die aktuell absolut zu orientierende Projektor-Position dar. Sie ist relativ zur zweiten vorhergehenden Position orientiert. Die Positionen eins und zwei sind bereits absolut orientiert. Um nun für eine Menge an Verknüpfungspunkten sowohl die Weltkoordinaten als auch die Modellkoordinaten zu bestimmen, müssen für diese Punkte an allen drei Positionen die indirekten Triangulationswerte bestimmt werden. Man unterscheidet zwei Fälle:

1. alle drei Positionen werden von einer Kalibrierkamera erfasst (siehe 6.3.2.2):

Dies ist der triviale Fall. Man bildet ein Bildpunkt-Bündel über das Triangulations-Schnittbild der drei Kalibrierkamera-Ansichten (6.3.2.3). Die Weltkoordinaten der Verknüpfungspunkte lassen sich über Vorwärtsschnitt (4.3) mit den homologen Triangulationswert-Paaren der Positionen eins und zwei und deren absoluten äußeren Orientierungen bestimmen.

Die Modellkoordinaten werden analog mit den Triangulationswert-Paaren der Positionen zwei und drei und deren relativen Orientierungen ermittelt. Analog zur absoluten Orientierung der Messkamera(s) wird der Maßstab berechnet und die aktuelle Projektor-Position absolut orientiert.

2. alle drei Positionen werden von zwei verschiedenen Kalibrierkameras erfasst:

In diesem Fall müssen die indirekten Triangulationswerte der Kalibrierkamera an Position zwei mit den indirekten Triangulationswerten der anderen Kalibrierkamera an Position zwei gematcht werden. Dabei werden die Bildkoordinaten des indirekten Triangulations-Bildes der zweiten Kalibrierkamera bestimmt, um die nötigen indirekten Triangulationswerte an Position drei der zweiten Kalibrierkamera ermitteln zu können (Algorithmus analog zur Messkamera-Kalibrierung). Nun können die Objektkoordinaten im WKS über die Positionen eins und zwei

und die Objektkoordinaten im MKS mit den gematchten Triangulationswerten über die Positionen zwei und drei bestimmt werden.

Wie im ersten Fall kann jetzt die absolute Orientierung der Projektor-Position drei durchgeführt werden.

6.3.2.5 Bündelblockausgleich

Übernahme der Startwerte:

Die Funktion SetFunctionalModel() der Klassen CProjectorCalibration und CMeasureCamCalibration überträgt die zuvor gewonnenen Startwerte (relative Orientierung, absolute Orientierung, Vorwärtsschnitt) in die zu Beginn angelegte Datenstruktur der unbekannten Parameter des Bündelblockausgleiches. Der Ablauf weist für die Messkamera-Kalibrierung und die Projektor-Kalibrierung keine nennenswerten Unterschiede auf, außer dass jeweils nur zwei beteiligte Ansichten (korrespondierende Projektor- und Messkamera-Ansicht für eine Position) beim Messkamera-Ausgleich betrachtet werden. Bei der Bündelblocktriangulierung der Projektor-Ansichten hingegen ist die Anzahl der betrachteten Ansichten theoretisch unbegrenzt.

Theoretisch wäre es auch möglich, gleichzeitig über alle an der Messung beteiligten Messkamera-Ansichten eine Bündelblockausgleichung aufzustellen. Hierzu müsste man, analog zur absoluten Orientierung (6.3.2.4), homologe Bildpunkte einer Messkamera-Ansicht über die indirekten Triangulationswerte mit den indirekten Triangulationswerten einer benachbarten Messkamera-Ansicht matchen. Somit könnten zumindest paarweise, zwischen den Ansichten, Bündel aufgebaut werden, um einen gemeinsamen Ausgleich aller Ansichten vorzunehmen. Eine weitere Ausbaumöglichkeit läge sicherlich darin, nach dem gleichen Prinzip alle am Messvorgang beteiligten Messkamera- und Projektor-Ansichten in einem Bündelblockausgleich zu vereinen, was eventuell eine stabilere Ausgleichungskonfiguration darstellt. Aus Zeitmangel konnte dies in dieser Arbeit jedoch noch nicht realisiert werden.

Die innere Orientierung (*CAdjustingInnerOrientation*) eines Messgerätes wird nur für eine Ansicht (*CAdjustingImage*) als Unbekannte mit ausgeglichen und verbessert (siehe 2. und 4. Vereinfachung). Innerhalb des Ausgleichungsprozesses werden die verbesserten Werte der inneren Orientierung jedoch auch von den anderen Ansichten als Ausgleichungsparameter benötigt. Analog verhält es sich bei den Objektkoordinaten (*CAdjustingObjectPoint*). Da verschiedene Ansichten auf die gleichen Objektkoordinaten verweisen (sonst gäbe es keine Bündel), diese aber nur jeweils einmal in einer Ansicht mit ausgeglichen werden, müssen diese Startwerte auch für die anderen Ansichten übernommen werden. Zur Lösung werden die Objekte der inneren Orientierung und der Objektkoordinaten (*CAdjustingInnerOrientation, CAdjustingObjectPoint*), welche für eine Ansicht ausgeglichen werden, auf die restlichen Ansichten kopiert. Das heißt, die eigenen Objekte der Ansichten werden gelöscht und die Zeiger auf die zu kopierenden auszugleichenden Objekte gelegt (Abbildung 6-20):



Abbildung 6-20: Kopieren der Ausgleichsobjekte

Erweiterung des funktionalen Modells:

Die Triangulationswerte, direkt oder indirekt, sind relative Angaben bezogen auf die realen Abmaße der Kamera-Bildmatrix. Der horizontale Triangulations-X-Wert entspricht dem relativen Anteil der Matrix-Breite (IP_X), und der vertikale Triangulations-Y-Wert entspricht dem relativen Anteil der Matrix-Höhe (IP_Y). Der Koordinatenursprung liegt dabei nicht in der linken unteren Ecke, sondern im Matrix-Mittelpunkt (Bildhauptpunkt) (siehe Absatz 6.3.1.5).

Da es sich bei den verwendeten Messgeräten nicht um professionelle Messgeräte handelt, sind die Angaben zur inneren Orientierung meist nur ungenügend. Somit bietet es sich an, auch die Bildmatrix-Abmessungen als Ausgleichungs-Parameter mit zur inneren Orientierung hinzu zu nehmen. Die beobachteten absoluten Bildkoordinaten (Triangulationswerte) der Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 2-13) stehen mit den relativen Bildkoordinaten in folgendem Zusammenhang:

$$\begin{aligned} x_{abs} &= x_{rel} \cdot IP_X \\ y_{abs} &= y_{rel} \cdot IP_Y \end{aligned}$$

Gleichung 6-9: relative Bildkoordinaten

Die Kollinearitätsgleichungen verändern sich zu:

$$\begin{aligned} x_{rel}' &= \left(x_0' + z' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x' \right) \cdot \frac{1}{IP_X} \\ y_{rel}' &= \left(y_0' + z' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y' \right) \cdot \frac{1}{IP_X} \end{aligned}$$

Gleichung 6-10: Kollinearitätsgleichungen der relativen Bildkoordinaten

Durch diese Erweiterung verändern sich auch die Differentialquotienten (Gleichung 3-15 - Gleichung 3-17) der Kollinearitätsgleichungen:

für die äußere Orientierung:

$$\frac{\partial x'}{\partial X_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_x - r_{11}N) \cdot \frac{1}{IP_x}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial Y_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_x - r_{21}N) \cdot \frac{1}{IP_x}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial Z_0} = \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_x - r_{31}N) \cdot \frac{1}{IP_x}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \omega} = \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_x}{N} \cdot [r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)] - r_{31}(Y - Y_0) - r_{21}(Z - Z_0) \right\} \cdot \frac{1}{IP_x}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \varphi} = \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_x}{N} \cdot [k_x \cdot \cos \kappa - k_y \cdot \sin \kappa] + N \cdot \cos \kappa \right\} \cdot \frac{1}{IP_x}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \kappa} = \frac{z'}{N} \cdot k_y \cdot \frac{1}{IP_x}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial y'}{\partial X_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot \left(r_{13}k_Y - r_{12}N\right) \cdot \frac{1}{IP_Y} \\ \frac{\partial y'}{\partial Y_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot \left(r_{23}k_Y - r_{22}N\right) \cdot \frac{1}{IP_Y} \\ \frac{\partial y'}{\partial Z_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot \left(r_{33}k_Y - r_{32}N\right) \cdot \frac{1}{IP_Y} \\ \frac{\partial y'}{\partial \omega} &= \frac{z'}{N} \cdot \left\{\frac{k_Y}{N} \cdot \left[r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)\right] - r_{32}(Y - Y_0) - r_{22}(Z - Z_0)\right\} \cdot \frac{1}{IP_Y} \\ \frac{\partial y'}{\partial \varphi} &= \frac{z'}{N} \cdot \left\{\frac{k_Y}{N} \cdot \left[k_X \cdot \cos \kappa - k_Y \cdot \sin \kappa\right] - N \cdot \sin \kappa\right\} \cdot \frac{1}{IP_Y} \\ \frac{\partial y'}{\partial \kappa} &= \frac{z'}{N} \cdot k_X \cdot \frac{1}{IP_Y} \end{aligned}$$

Gleichung 6-11: erweiterte Differentialquotienten äußere Orientierung

für die innere Orientierung:

$$\frac{\partial x'}{\partial x'_0} = 1 \cdot \frac{1}{IP_X} \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial y'_0} = 1 \cdot \frac{1}{IP_Y} \\ \frac{\partial x'}{\partial c} = -\frac{k_X}{N} \cdot \frac{1}{IP_X} \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial c} = -\frac{k_Y}{N} \cdot \frac{1}{IP_Y}$$

innere Orientierung erweitert sich um die Bildmatrix-Größe:

$$\frac{\partial x'}{\partial IP_X} = -\frac{x'_0}{\left(IP_X\right)^2} - \frac{z' \cdot k_X}{N \cdot \left(IP_X\right)^2} \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial IP_Y} = -\frac{y'_0}{\left(IP_Y\right)^2} - \frac{z' \cdot k_Y}{N \cdot \left(IP_Y\right)^2}$$

Gleichung 6-12: erweiterte Differentialquotienten innere Orientierung

für die Objektkoordinaten:

$$\frac{\partial x'}{\partial X} = -\frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_X - r_{11}N) \cdot \frac{1}{IP_X} \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial X} = -\frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_Y - r_{12}N) \cdot \frac{1}{IP_Y}$$
$$\frac{\partial x'}{\partial Y} = -\frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_X - r_{21}N) \cdot \frac{1}{IP_X} \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial Y} = -\frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_Y - r_{22}N) \cdot \frac{1}{IP_Y}$$
$$\frac{\partial x'}{\partial Z} = -\frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_X - r_{31}N) \cdot \frac{1}{IP_X} \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial Z} = -\frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_Y - r_{32}N) \cdot \frac{1}{IP_Y}$$

Gleichung 6-13: erweiterte Differentialquotienten Objektkoordinaten

Durchführung:

Der Ausgleichungsprozess wird durch die vererbte Funktion *DoBundleAdjustment()* der Eltern-Klasse (*CDeviceCalibration*) der spezialisierten Geräte-Kalibrierungs-Klassen (*CProjectorCalibration*, *CMeasureCamCalibration*) gestartet.

Dabei wird ein Zeiger auf das Objekt des funktionalen Modells des Bündelblockausgleiches (*CPhotogrammetry10ParameterFM*) dem Ausgleichungs-Modul übergeben (siehe Abbildung 6-13). Wie schon im Abschnitt 6.3.2.1 dargestellt, veranlasst das Ausgleichungs-Modul das Objekt des funktionalen Modells in jeder Iteration, die Designmatrix *A* und den Vektor der gekürzten Beobachtungen *I* aufzustellen. Nach einer Ausgleichungsiteration werden die Verbesserungen \hat{x} dem Objekt zur Verbesserung der Unbekannten übergeben.

Aufstellen Unbekannten-Vektor:

Bevor die eigentliche Designmatrix erstellt werden kann, müssen zuvor der Vektor der Unbekannten X (Startwerte) und der Vektor der Beobachtungen (Bildpunkte) aufgestellt werden.

Bei der Erstellung des Unbekannten-Vektors (siehe Gleichung 3-2) wird die bei der Initiierung des Bündelblockausgleiches angelegte Ansichten-Datenstruktur (Abbildung 6-14) der Reihe nach, Ansicht für Ansicht, durchgegangen. In jeder Ansicht wird zu den damit

verbundenen Objekten der inneren und äußeren Orientierung, sowie zu den Objekten der Objektpunkte der Ausgleichungsstatus überprüft. Falls der jeweilige Unbekannten-Parameter ausgeglichen werden soll, so wird ein Objekt der Klasse *CAdjustingUnknown* (Abbildung 6-21) erzeugt und an den Unbekannten-Vektor angefügt.

<u>CAdjustingUnknown</u>

m_image:CAdjustingImage * m_unknownType:int m_objectIdentifier:int GetImage():CAdjustingImage * GetUnknownType ():int GetObjectIdentifier ():int SetImage (CAdjustingImage * img):void SetUnknownType (int unknownType):void SetObjectIdentifier (int objectIdentifier):void

Abbildung 6-21: Klasse CAdjustingUnknown

Das Objekt enthält einen Zeiger auf die Ansicht des Unbekannten-Parameter (*m_image*), sowie Informationen über den Unbekannten-Typ (*m_unknownType*) (siehe Tabelle 6-6) und die Identifizierungs-Nummer der Unbekannten (*m_objectIdentifier*).

Unbekannten-Typ	Bedeutung	Unbekannten-Typ	Bedeutung
1	x-Translation	8	Hauptpunkt x-Wert
2	y-Translation	9	Hauptpunkt y-Wert
3	z-Translation	10	Bildmatrix-Breite
4	omega-Rotation	11	Bildmatrix-Höhe
5	phi-Rotation	12	Objektpunkt x-Wert
6	kappa-Rotation	13	Objektpunkt y-Wert
7	Kamera-Konstante	14	Objektpunkt z-Wert

Tabelle 6-6: Unbekannten-Typ

Aufstellen Beobachtungsvektor:

Bei der Zusammenstellung der beobachteten Bildpunkte (siehe Gleichung 3-1) wird wiederum die Ansichten-Datenstruktur durchgegangen, und für jeden hinterlegten Bildpunkt jeder Ansicht wird ein Objekt der Klasse *CAdjustingObservation* (Abbildung 6-22) erzeugt und an den Vektor der Beobachtungen angefügt. Jedes Beobachtungs-Objekt besitzt einen Zeiger auf die Ansicht des Bildpunktes und einen Zeiger auf den beobachteten Bildpunkt selbst.

CAdjustingObservation

m_image:CAdjustingImage* m_imgPoint:CAdjustingImgPoint*

GetImage():CAdjustingImage* GetImagePoint():CAdjustingImgPoint* SetImage(CAdjustingImage* img):void SetImagePoint(CAdjustingImgPoint* imagePoint)

Abbildung 6-22: Klasse CAdjustingObservation

Aufstellen Design-Matrix:

Jedes Kind der Klasse *CFunctionalModel* erbt die Funktion *GetDesignMatrix_A()*. Als Parameter besitzt sie unter anderem eine Referenz auf eine Matrix-Datenstruktur, welche im Zuge der Funktions-Ausführung mit den Daten der Designmatrix *A* (siehe Gleichung 3-8) gefüllt wird.

Die Anzahl der Spalten wird durch die zweifache Länge n des Beobachtungsvektors L und die Anzahl der Spalten durch die Länge u des Unbekanntenvektors X vorgegeben. Für jede Beobachtungsgleichung wird zu zugehörigen Einträgen (gleiche Ansicht, oder abgebildeter Objektpunkt) der Unbekannten von X das Matrixelement ermittelt. Hierbei wird mittels der vorgegeben Näherungswerte die partielle Ableitung des Unbekannten-Typs gebildet. Für nicht zugehörige Einträge wird der Wert 0 an dieser Stelle in der Matrix vermerkt:

// iX ∈ {0,...,(Länge von X-1)} erstelle Unbekanntenvektor X mit Index iX; // $iL \in \{0, ..., (Länge von L-1)\}$ erstelle Beobachtungsvektor L mit Index iL: für alle Beobachtungen von L{ für zwei Koordinatenwerte k einer Beobachtung{ // $k \in \{1, 2\}$ hole Näherungswerte zur Beobachtungs-Ansicht i von L[iL]; für alle Unbekannten von X{ // Unbekannten-Typ ist ein Orientierungs-Parameter wenn Unbekannten-Typ von X[iX] zwischen 1 und 11, dann{ wenn Ansicht j von X[iX] gleich Ansicht i{ berechne partielle Ableitung zu Unbekannten-Typ von X[iX]; füge Wert in $A((iL^{2} + k), iX)$ ein; ansonsten{ füge Wert 0 in $A((iL^{2} + k), iX)$ ein; } // Unbekannten-Typ ist ein Objektpunkt-Parameter } wenn Unbekannten-Typ von X[iX] zwischen 12 und 14, dann{ wenn beobachteter Objektpunkt gleich Unbekannten-Objektpunkt{ berechne partielle Ableitung zu Unbekannten-Typ von X[iX]; füge Wert in $A((iL^{2} + k), iX)$ ein; ansonsten{

Aufstellen gekürzter Beobachtungsvektor:

Jede erbende Klasse der Klasse CFunctionalModel erbt zudem die Funktion GetDifferenceVector I(). Als Parameter besitzt sie unter anderem eine Referenz auf eine Vektor-Datenstruktur, die bei Funktions-Aufruf mit den Daten des Vektors der gekürzten Beobachtungen / (siehe Gleichung 3-6) gefüllt wird:

erstelle Beobachtungsvektor L mit Index iL; // $iL \in \{0,...,(Länge von L-1)\}$

für alle Beobachtungen von L{

hole Näherungswerte zur Ansicht i von L[iL];

berechne Beobachtungs-Näherungswert L_X^0 für die X-Koordinate (L[iL]_x) von L[iL];

berechne $L[iL]_X - L_X^0$;

füge Wert an I an;

berechne Beobachtungs-Näherungswert L_{Y}^{0} für die Y-Koordinate (L[iL]_Y) von L[iL];

berechne $L[iL]_{y} - L_{y}^{0}$;

füge Wert an I an;

}

Verbesserungen übernehmen:

Jede erbende Klasse der Klasse CFunctionalModel erbt außerdem die Funktion SetImprovements(). Als Parameter besitzt sie unter anderem einen Zeiger auf eine Vektor-Datenstruktur. Die Verbesserungen (siehe Gleichung 3-5) werden so nach einer erfolgreichen Ausgleichungs-Iteration in Vektor-Form der Funktion übergeben. Der Verbesserungsvektor V besitzt die gleiche Elementanzahl wie der Unbekannten-Vektor X. Jede Position in V stellt die Verbesserung zu der Unbekannten dar, die an der gleichen Position in X steht:

// $iX \in \{0, ..., (Länge von X-1)\}$ erstelle Unbekanntenvektor X mit Index iX: für alle Einträge des Verbesserungsvektors V mit Index iV{ // $iV \in \{0, ..., (Länge von V-1)\}$ setze X[iV] := X[iV] + V[iV];

}

6.3.3 Berechnung der Objektkoordinaten

Die Berechnung der gesuchten Objektkoordinaten der von der (den) Messkamera(s) aufgenommen Bilder erfolgt durch die Klasse *CObjectCoordinates*. Dies ist der letzte Schritt im Auswertungs-Prozess zur 3D-Erfassung des Messobjektes.

Die Steuerklasse *CPhasoClass* besitzt einen Zeiger auf ein Objekt des Typs *CObjectCoordinates*. Nach der Mess-Bild-Auswertung und der Orientierung der einzelnen Projektor- und Messkamera-Positionen im Mess-Prozess ruft die Funktion *Run()* der Klasse *CPhasoClass* für jede Messkamera und jede Aufnahme-Position die Funktion *GetObjectCoordinates()* von *CObjectCoordinates* auf. Dabei werden ihr die aktuelle Positions-Nummer, ein Zeiger auf das Messkamera-Objekt, ein Zeiger auf das Projektor-Objekt und ein Zeiger auf eine leere temporäre Punktwolken-Datenstruktur (Typ *CPointSet*) übergeben. Nach dem Ausführen der Funktion *GetObjectCoordinates()* wird das Punktwolken-Objekt, welches mit Objektkoordinaten der entsprechenden Messkamera-Position gefüllt ist, der eigentlichen Punktwolke hinzugefügt. Die Transformation der einzelnen temporären Punktwolken in das übergeordnete Weltkoordinaten-System wird in *CObjectCoordinates* vollzogen.

Die Funktion *GetObjectCoordinates()* beschreibt im Wesentlichen folgenden Ablauf (siehe Abbildung 2-2):

für alle Matrix-Bildpunkte eines Mess-Bildes{

hole direkte Triangulationswerte des Messkamera-Bildes;

hole indirekte Triangulationswerte des Messkamera-Bildes;

wenn beide Werte gültig sind, dann{

bestimme Winkel α ;

bestimme Winkel β ;

bestimme Abstand e Objektpunkt zur Messbasis b;

bestimme Abstand c Objektpunkt zur Messquelle (entweder Messkamera oder Projektor);

bestimme lokale Objektkoordinate;

transformiere lokale Objektkoordinate ins WKS;

füge Objektkoordinate in temporäre Punktwolken-DS ein;

}

}

Die Transformation der lokalen Objektkoordinate in das Weltkoordinaten-System erfolgt über drei Rotationen und drei Translationen nach den Werten der äußeren Orientierung des Messgerätes (Messkamera oder Projektor) an der jeweiligen Aufnahme-Position.

Nachdem die Objektkoordinaten für alle Aufnahme-Positionen und Messkameras bestimmt wurden, sind der Aufnahme- und Auswertungs-Prozess abgeschlossen. Die resultierende Punktwolke wird dem internen VRML-Viewer über die Klasse *CBuilderVrml* übergeben und in dem VRML-Fenster (Objekt-Ansicht) dargestellt.

6.4 Bedienung von Scan 3D

Interaktionsmöglichkeiten bei *Scan 3D* bieten sich sowohl über die Menü-Steuerung, als auch über die an der grafischen Oberfläche sichtbaren Ansichten (Abbildung 6-23).

6.4.1 Ansichten-Steuerung

Steuer-Ansicht (1):

- Im Abschnitt *Motor-Steuerung* (A) lässt sich der Drehtisch um jeweils 5° vor- und zurückdrehen, um z.B. eine günstige Ausgangsposition für die Messung zu erhalten.
- Der Abschnitt *Kamera-Steuerung* unterteilt sich in die vorhanden Kameras (Mess- (B) und Kalibrierkamera (C)). Die Testbildfunktion der Messkamera erlaubt über die Mess-Bild-Ansicht (4) Testbilder der Messkamera zu erstellen, welche dann anschließend über die Löschfunktion wieder entfernt werden können.
- Mit dem Button "*Einstellungen sichern*" lassen sich die aktuellen Kalibrierkamera-Einstellungen sichern, welche beim nächsten Programmstart geladen werden.
- Ein Testbild lässt sich im Abschnitt *Projektor-Steuerung* (D) ausgeben, um z.B. vor einer Messung die Tiefenschärfe des Projektors zu justieren.
- Einstellungen zum Messablauf, wie Anzahl der Aufnahmesichten und Rotationswinkel zwischen den Ansichten, werden im Abschnitt *Messung* (E) bestimmt.
- Über den Button *Start* im unteren Abschnitt (F) wird der gesamte Mess-Prozess gestartet. Nach einer Messung kann über den Button *Auswertung* aus den zuvor gewonnen Mess-Bildern eine erneute Auswertung mit z.B. anderen Auswertungs-Parametern gestartet werden.

Objekt-Ansicht (2):

- Die Objekt-Ansicht realisiert ein *VRML-Viewer*, der die nach einer Auswertung berechneten Objektkoordinaten darstellt. Verschiedene Darstellungsmodi (Punktwolke, Gittermodell) werden ebenso unterstützt wie die Objektinteraktion mit der Maus. Als Vorlage diente ein *Open-Source-Projekt* [WEB4].

Kamera-Ansicht (3):

- Momentan gibt die Kamera-Ansicht einen *Live-Stream* der Kamera *DFK 41AF02* aus. Diese Funktion ist jedoch für alle Kamera-Modelle mit einem *WDM Stream Class* Treiber nutzbar.

Mess-Bild-Ansicht (4):

- Die Mess-Bild-Ansicht gibt einen aktuellen Überblick über die vorhanden Bilder, die sich im Projektordner *Scan 3D\Images* befinden. Bei Mausselektierung eines Bildes in der oberen Ansicht (*thumbnail*) erfolgt die Großdarstellung in der unteren Ansicht.



Abbildung 6-23: Programmoberfläche von Scan 3D

6.4.2 Menü-Steuerung

File:

New:

- initiiert ein neues Mess-Projekt
- alle vorherigen Projekt-Daten werden hiermit verworfen

Open Project:

- lädt eine Projekt-Datei
- alle vorherigen Projekt-Daten werden hiermit verworfen

Save Project:

- sichert Projekt-Daten

Import-VRML:

- öffnet eine VRML-Datei

Export-VRML:

- exportiert die Objektkoordinaten der Objekt-Ansicht im VRML-Format

Einstellungen:

Dialog Aufnahme-Einstellungen:

- Im Abschnitt *Bild-Einstellungen* lassen sich das interne Bildformat und die Projektions-Auflösung (siehe Abschnitt 6.2.1) einstellen.
- Im unteren Abschnitt kann die Anzahl der Gray-Code-Ebenen verändert werden.

Dialog Auswertungs-Einstellungen:

- Im Abschnitt *Bildbearbeitungs-Optionen* lassen sich die Funktionen *Objektfreistellung*, *Synchronität Gray-Code zu Phase-Shift* und *Optimierung der Phasenwerte* aktivieren (siehe Abschnitt 6.3.1).
- Der Abschnitt *Testbilder generieren* bietet die Möglichkeit, zu den einzelnen Bild-Auswertungs-Strukturen die Ergebnisse, als Bilder visualisiert, auszugeben.
- Im unteren Abschnitt *Referenzschwellwert* wird dieser jeweils für die Mess- und Kalibrierkameras angegeben (Abschnitt 6.3.1.1).

Dialog Kalibrierungs-Einstellungen:

- Die Steuer-Parameter für die Ausgleichsrechnung, wie die Anzahl der maximalen Ausgleichs-Iterationen (*Iterations-Limit*) oder der Grenzwert der Ausgleichungsgenauigkeit (*Ausgleich-Genauigkeit*) lassen sich im Abschnitt *Ausgleichung* separat für die Projektor- und Messkamera-Kalibrierung einstellen.
- Ebenso werden die Angaben zur Bündel-Generierung, wie die Anzahl zusätzlicher homologer Bildpunkte (*zusätzliche Bildpunkte*) und der minimale Abstand zwischen jeweils zwei homologen Bildpunkten in Pixel (*min. Bildpunktabstand*) in den Abschnitten *Bündel-Generierung* nach der Projektor- und Messkamera-Kalibrierung getrennt erfasst.

VRML:

Punktwolke:

- Darstellung des erfassten Objektes als Punktwolke

Gitter:

- Darstellung des erfassten Objektes als vernetzte Gitterstruktur
- momentan nur bei geladen VRML-Objekten mit Triangulations-Daten möglich, da die 3D-Triangulierung einer Punktwolke noch nicht implementiert wurde

Ganzkörper.

- Darstellung des erfassten Objektes als Ganzkörper
- momentan nur bei geladen VRML-Objekten mit Triangulations-Daten möglich, da die 3D-Triangulierung einer Punktwolke noch nicht implementiert wurde

Smooth:

- Glättungsinterpolation der triangulierten Ganzkörper-Ansicht

Licht:

- Lichtquellen ein / ausblenden

Kamera-Einstellungen:

- Einstellungen der projekteinbezogenen Kameras (DFK 41AF02, Olympus 4040)

6.5 Installationshinweise

Zielplattform ist eine MS-Windows-Umgebung. Für die Ausführung von *Scan 3D* müssen folgende Bibliotheken/Komponenten auf dem Zielsystem installiert sein:

- Microsoft DirectX 9.0
- die entsprechenden Kamera-Treiber (siehe Geräte-Spezifizierung)

Zur Weiterbearbeitung des Projektes benötigt man Microsoft Visual C++ 6.0 oder höher.

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Beispiel-Messung

7.1.1 Mess-Konfiguration

Als Messobjekt diente ein Polyeder mit einem Durchmesser von ca. 12 cm, der über dem Drehtisch im Messkäfig positioniert war. Folgende Parameter lagen bei der Messung vor:

Projektor:	
Modell:	Hitachi CP-SX5600
Тур:	Liquid Crystal Projector
Pixel:	1365 * 1024
Helligkeit:	1800 ANSI Lumen
Brennweite:	38,0 – 49,0 mm
Kalibrierkamera:	
Modell:	DFK 41F02
Тур:	CCD-Interline Transfer, Progressive Scan
Sensor:	Sony ICX205AK
Brennweite:	16 mm
Objektiv:	Pentax C1614-M(KP)
Messkamera:	
Modell:	Olympus C-4040ZOOM
Тур:	CCD
Sensor:	1/1.8 inch solid-state
Brennweite:	7,1 – 21,3 mm
Drehtisch:	
Modell:	Physik Instrument M-038.DG
Aufnahme-Parameter:	
Anzahl der Messansichten:	2
Drehwinkel zwischen Ansichten:	23°
Gray-Code-Ebenen:	5
Phasen-Verschiebungen:	4
interne Bildauflösung:	640 x 480 Pixel
interne Bild-Bit-Tiefe:	8 Bit greyscale

innere Projektions-Auflösung:	1024 x 768 Pixel
äußere Projektions-Auflösung:	1024 x 768 Pixel

Auswertungs-Parameter:

Objektfreistellung:	ja
Synchronität Gray-Code zu Phase-Shift:	ja
Optimierung der Phasenwerte:	ja
Referenzschwellwert KK:	37%
Referenzschwellwert MK:	37%

Kalibrierungs-Parameter:

Gerät	zusätzliche Bildpunkte	minimaler Bildpunktabstand	Ausgleichungs- Genauigkeit	Iterations-Limit
Projektor	22	25	0.0001	25
Messkamera	22	25	0.001	25

Tabelle 7-1: Kalibrierungs-Parameter

Innere Orientierung:

Gerät	c (in mm)	<i>H-x</i> ₀ (in mm)	<i>H-y₀</i> (in mm)	IP_X (in mm)	<i>IP</i> _Y (in mm)
Projektor	21	0	0	7.18	5.32
Messkamera	46	0	0	18.288	13.716

Tabelle 7-2: Innere Orientierung von Messkamera und Projektor

7.1.2 Aufnahme-Bilder

Aufgrund des redundanten Informationsgehaltes und der Fülle der Aufnahme-Bilder werden in diesem und den folgenden Abschnitten nur die Bilder der Aufnahme-Sequenz der zweiten Ansicht der Messkamera dargestellt.

Referenzbilder:



Abbildung 7-1: Referenzbilder Messkamera zweite Ansicht - vertikale Ausrichtung



Abbildung 7-2: Referenzbilder Messkamera zweite Ansicht - horizontale Ausrichtung

Gray-Code-Bilder:



Abbildung 7-3: Gray-Code-Bilder Messkamera zweite Ansicht - vertikale Ausrichtung



Abbildung 7-4: Gray-Code-Bilder Messkamera zweite Ansicht - horizontale Ausrichtung

Phasenbilder:



Abbildung 7-5: Phasenbilder Messkamera zweite Ansicht - vertikale Ausrichtung



Abbildung 7-6: Phasenbilder Messkamera zweite Ansicht - horizontale Ausrichtung

7.1.3 Bild-Auswertung

Die Ergebnisse des Auswertungs-Prozesses lassen sich sehr anschaulich mittels der automatisch generierten Testbilder darstellen:

Referenz-Bilder:



Abbildung 7-7: links vertikales Referenz-Bild, rechts horizontales Referenz-Bild

In den Referenz-Bildern wird der jeweilige Referenzwert für jeden Bildpunkt dargestellt. Die weiß belegten Bildpunkte entsprechen den invaliden Umgebungs-Bildpunkten, die für die weitere Auswertung bedeutungslos sind.

Gray-Code-Bilder:



Abbildung 7-8: links vertikales Gray-Code-Bild, rechts horizontales Gray-Code-Bild

Der Hell-Dunkel-Grauwertverlauf der Streifen stellt die monoton steigende Ordnung der Streifennummern dar. Den diskreten X-Koordinaten-Anteil für den indirekten Bildpunkt liefert das vertikale und den diskreten Y-Koordinaten-Anteil das horizontale Gray-Code-Bild. In Kombination mit dem erweiterten Referenzbild-Verfahren liefert die Gray-Code Bestimmung stabile und präzise Ergebnisse.

Phase-Shift-Bilder:



Abbildung 7-9: links vertikales Phase-Shift-Bild, rechts horizontales Phase-Shift-Bild

Analog zum Gray-Code-Bild liefern das vertikale und horizontale Phasen-Bild den kontinuierlichen Anteil für die indirekten Triangulations-Koordinaten.

Triangulations-Bilder:



Abbildung 7-10: links indirektes (inverses) Triangulations-Bild, rechts direkte Triangulations-Bild

Das berechnete indirekte Triangulations-Bild beinhaltet aus der Sichtweise des Projektors alle Objektpunkte, die von der Projektor- und der Messkamera-Ansicht abgebildet werden. Die rasterartige Darstellung weist auf Ungenauigkeiten im kontinuierlichen Koordinaten-Anteil hin.

Homologe Bildpunkte:

Im Zuge der Geräte-Kalibrierung werden die homologen Bild-Bündel gebildet (siehe Abschnitt 6.3.2.3). Für die Beispiel-Messung wurde eine Mindestpunktanzahl von sechs Bildpunkten berechnet. Zusammen mit den 22 zusätzlichen Bildpunkten ergeben sich 28 Bildpunkte.

Die Abbildung 7-11 stellt die Verteilung dieser Bildpunkte in den beiden Ansichten gegenüber. Für einige korrespondierende Bildpunktpaare ist die Verbindung schemenhaft eingezeichnet. Die roten Punkte entsprechen den Bildpunkten der Projektor-Ansicht und die blauen Punkte denen der Messkamera-Ansicht.



Abbildung 7-11: homologe Bildpunkte im indirekten und direkten Triangulations-Bild

7.1.4 Kalibrierungs-Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kalibrierung entstammen der Protokolldatei, die dem Anhang entnommen werden kann. Auszugsweise werden daraus die ermittelten Werte, manuell gemessenen Werten gegenübergestellt.

Projektor-Kalibrierung:

Die Vergleichswerte beruhen zum Einen auf dem Drehwinkel des Drehtisches δ (23°) und zum Anderen auf einer manuellen Abstandsmessung des Projektionszentrums des Projektors zur Rotationsachse des Mess-Objektes (Vektor X_{P1O}).

Des Weiteren wird angenommen, dass die XY-Ebene des Drehtisches zur XY-Ebene des Projektors parallel liegt.

$$X_{P1O} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 78 \end{bmatrix}^T$$

Gleichung 7-1: Vektor Projektionszentrum Projektor zum Objektmittelpunkt (Rotationsachse)

Somit variieren während der Messung nur drei äußere Orientierungs-Parameter des Projektors (X_0 , Z_0 , φ). Aufgrund dieser Vereinfachung und der eingeschränkten Genauigkeit der manuellen Messung dienen die Vergleichswerte vorrangig als Orientierungshilfe.

Für die relative Orientierung der ersten zur zweiten Projektor-Position sieht die Werte-Gegenüberstellung folgendermaßen aus:

Parameter	relative Orientierung Scan 3D	manuelle relative Orientierung	Differenz-Betrag
x-Translation X_0	1	1	0
y-Translation Y ₀	-0.0209	0	0. 0209
z-Translation Z ₀	0.1813	0,2035	0,0222
omega-Rotation ω	-0.584°	0°	0.584°
phi-Rotation φ	-24.008°	-23°	1.008°
kappa-Rotation κ	-3.158°	0°	3.158°

Tabelle 7-3: relative Orientierung der Projektor-Positionen

Nach vier Iterationen liegt hierbei die L2-Norm des Verbesserungs-Vektors (Residuum) bei 0.0000622.

Da die relative Orientierung der ersten zur zweiten Projektor-Position maßstabsbestimmend für alle weiteren relativen Orientierungen ist, entspricht die absolute der relativen Orientierung.

Der anschließende Bündelblockausgleich erreicht nach zwei Iterationen ein Residuum von 0.0000151. Die Werte verändern sich nur minimal bezüglich der Startwerte:

Parameter	Bündelblockausgleich Scan 3D	relative Orientierung Scan 3D	Differenz-Betrag
x-Translation X_0	1.0001	1	0.0001
y-Translation Y ₀	-0.0209	-0.0209	0
z-Translation Z ₀	0.1815	0.1813	0.0002
omega-Rotation ω	-0.586°	-0.584°	0.002°
phi-Rotation φ	24.012°	-24.008°	0.004°
kappa-Rotation κ	-3.159°	-3.158°	0.001°

Tabelle 7-4: Bündelblockausgleich Projektor-Orientierung

Messkamera-Kalibrierung:

Für die Kalibrierung der Messkamera an den Positionen eins und zwei dienen für die Vergleichswerte wiederum der Rotationswinkel δ und der Vektor X_{P1M1} vom Projektionszentrum des Projektors zum Projektionszentrum der Kamera und der Vektor X_{P1O} vom Projektor zum Mess-Objekt an der Position eins.

$X_{P1M1} = \begin{bmatrix} 33 & 10 & 20 \end{bmatrix}^T$

Gleichung 7-2: Vektor Projektionsmittelpunkt Projektor zum Projektionszentrum Messkamera

Die Messkamera liegt höher im Raum als der Projektor (aufbaubedingt). Um trotzdem wie der Projektor das Messobjekt zentralperspektivisch abzubilden, besitzt sie eine leichte positive Kippung (omega-Rotation).

Da Messkamera und Projektor sich während der Messung zueinander nicht räumlich verschieben, sind ihre relativen Orientierungen zueinander für alle Mess-Positionen identisch (siehe Tabelle 7-5). Die gegenseitigen Abweichungen der berechneten Orientierungen lassen sich somit für eine Genauigkeits-Betrachtung heranziehen:

Parameter	relative Orientierung	relative Orientierung	manuelle	Differenz-
	Scan 3D Position 1	Scan 3D Position 2	Orientierung	Betrag P1-P2
x-Translation X_0	1	1	1	0
y-Translation Y ₀	0.3099	0.2422	0.3030	0.067
z-Translation Z_0	0.6105	0.5839	0.6061	0.027
omega-Rotation ω	10.511°	7.104°	8.862°	3.407°
phi-Rotation φ	-33.679°	-32.015°	-30.964°	1.664°
kappa-Rotation κ	1.436°	0.909°	0°	0.527°

Tabelle 7-5: relative Orientierung zwischen Projektor- und Messkamera-Positionen

Anhand dieser Daten lässt sich eine obere Schranke für die Genauigkeit der Translations-Werte (T) und Rotations-Werte (R) für die Messkamera-Positionen eins und zwei ermitteln. Die Funktion Γ , welche die minimale Genauigkeitsabweichung für eine Wertemenge ermittelt, geht davon aus, dass der wahre Wert genau dem arithmetischem Mittel *A* dieser Menge entspricht. Aus der Menge der Translations-Werte *T* und der Menge der Rotations-Werte *R* wird dabei nur die Parameter-Menge betrachtet, die die größte Standardabweichung zu ihrem Mittelwert besitzt. Die minimale Genauigkeit entspricht dann der maximalen Differenz des Mittelwertes *A* zu einem Wert aus der Parameter-Menge:

 $\Gamma(T) = (0.067 \div 2) = 0.034$ $\Gamma(R) = (3.407^{\circ} \div 2) = 1.704^{\circ}$

Gleichung 7-3: minimale Genauigkeitsabweichung relative Orientierung der Messkamera

Die absolute Orientierung der Messkamera zur Projektor-Position eins für die Kamera-Positionen eins und zwei gestalten sich folgendermaßen:

Parameter	absolute Orientierung Scan 3D Position 1	absolute Orientierung <i>Scan</i> <i>3D</i> Position 2	manuelle Orientierung Position 1	manuelle Orientierung Position 1
Maßstab <i>m</i>	1.1539	1.1228	1.1261	1.1261
x-Translation X_0	1.1539	1.7711	1.1261	1.7699
y-Translation Y ₀	0.3577	0.1996	0.3412	0.3412
z-Translation Z_0	0.7045	1.2406	0.6825	1.2718
omega-Rotation ω	10.511°	6.461°	8.862°	8.862°
phi-Rotation φ	-33.679°	-56.023°	-30.964°	-53.964°
kappa-Rotation κ	1.436°	2.248°	0	0

Tabelle 7-6: absolute Orientierung der Messkamera an Position eins und zwei

Analog zur relativen Orientierung der Messkamera- zu den Projektor-Positionen kann man für die Parameter-Menge des Maßstabes (*M*) ebenfalls eine minimale Genauigkeitsabweichung bestimmen, da er aus den oben genannten Gründen den gleichen "wahren Wert" abbildet:

 $\Gamma(M) = ((1.1539 - 1.1228) \div 2) = 0.016$

Gleichung 7-4: minimale Genauigkeitsabweichung Translations-Maßstab der Messkamera

Die Ergebnisse für die Bündelblockausgleichungen können dem Anhang entnommen werden. Da sie keine nennenswerten Veränderungen an den Startwerten bewirken, werden sie hier nicht näher betrachtet.

Punktwolke:

Die ermittelte Punktwolke (VRML-Darstellung siehe Abbildung 7-12) verfügt über 186909 Punkte:



Abbildung 7-12: VRML-Darstellung der berechneten Punktwolke zweier Ansichten [WEB9]

7.2 Problemerörterung

Der vorige Abschnitt hat gezeigt, dass die Genauigkeit der Orientierungs-Werte Schwankungen unterliegt. Im Folgenden wird versucht, die teilweise unzureichenden Auswertungs-Ergebnisse, insbesondere der relativen Orientierung, zu ergründen.

7.2.1 Test der relativen Orientierung

Mittels einer manuell ermittelten homologen Bildpunktmenge zweier Bilder über einen gemeinsamen Objektraum soll die Funktionsfähigkeit des Moduls der relativen Orientierung überprüft werden. Hierzu wurde wiederum die in Absatz 7.1.1 beschriebene Kamera Olympus C-4040ZOOM, mit einer Kamerakonstanten von 6.7, verwendet.

Das Projektionszentrum des linken Bildes stellt den Ursprung des Modellkoordinatensystems dar. Das rechte Bild (Abbildung 7-14) soll zum linken Bild (Abbildung 7-13) relativ orientiert werden. Die Orientierungen der beiden Bilder wurden zusätzlich manuell bestimmt:

Translation	linkes Bild	rechtes Bild	Rotation	linkes Bild	rechtes Bild
X	0	150	ω	0°	0°
У	0	8	arphi	0°	-20°
Ζ	0	50	К	0°	0°

Tabelle 7-7: manuelle Vergleichswerte für Test der relativen Orientierung



Abbildung 7-13: Testbild linke Ansicht



Abbildung 7-14: Testbild rechte Ansicht

Die manuell gemessenen homologen Bildkoordinaten können Tabelle 7-8 entnommen werden. Sie stellen die absolute Lage (in mm) auf der Bild-Matrix, bezogen auf den Bildmittelpunkt (H), dar:

Objektpunkt	X-Koordinate links	Y-Koordinate links	X-Koordinate rechts	Y-Koordinate rechts
2	1.0871	2.4602	-2.0826	2.5008
3	1.4411	2.0418	-3.1444	2.0137
6	0.6257	1.5298	-3.3751	1.3987
7	1.637	1.4143	-2.5029	1.3487
8	0.7553	0.8617	-2.9327	1.0147
9	1.5074	1.1364	-2.307	1.0428
11	1.3968	0.4402	-1.1029	0.3091
12	1.9593	0.3278	-0.2497	0.1592
13	2.2279	0.3684	-0.6194	0.1905
14	1.6844	-0.5027	-0.8406	-0.7836
15	1.8171	-0.5650	-1.1124	-0.8867
16	1.9625	-0.4933	-0.2718	-0.7899
18	2.6009	-0.5495	-0.1233	-0.9335
20	2.7399	-1.561	0.6889	-2.1386
24	0.4551	-2.1667	-3.53	-2.4727
26	-1.381	-1.3362	-2.8315	-1.3831
27	1.6307	2.3634	0.1485	2.557

Tabelle 7-8: Koordinaten der homologen Bildpunkte aus rechter und linker Ansicht

Die relative Orientierung stoppte nach der vierten Iteration mit einem Residuum des Verbesserungs-Vektors von 0.0000847. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der relativen Orientierung gegen die manuell ermittelten Werte in der nachfolgenden Tabelle aufgetragen:

Parameter	relative Orientierung Scan 3D	manuelle relative Orientierung	Differenz-Betrag
x-Translation X_0	1	1	0
y-Translation Y ₀	0.0525	0.0533	0.0008
z-Translation Z ₀	0.3301	0.3333	0.0032
omega-Rotation ω	0.277°	0	0.277°
phi-Rotation φ	-19.983°	-20°	0.017°
kappa-Rotation κ	2.128°	0°	2.128°

Tabelle 7-9: Test des Moduls der relativen Orientierung

Abgesehen von den Abweichungen für die omega- und kappa-Rotation, die sich aber auf Messungenauigkeiten der manuellen Messung und einer ungenauen Angabe der Kamerakonstanten zurückführen lassen, weisen die Ergebnisse auf eine einwandfreie Funktionsfähigkeit des Moduls der relativen Orientierung in *Scan 3D* hin. Des Weiteren sei

an dieser Stelle nochmals auf die Auflistung bekannter Schwächen der relativen Orientierung im Abschnitt 4.1.3 hingewiesen.

7.2.2 Test der Bündelblockausgleichung

Zu Vergleichszwecken werden für den Test der Funktionalität des Moduls der Bündelblockausgleichung erneut die Bilder (Abbildung 7-13, Abbildung 7-14) und die Mess-Konfiguration aus dem vorigen Abschnitt herangezogen.

Die Beobachtungen entsprechen somit den homologen Bildpunkten aus Tabelle 7-8. Als Startwerte für die äußeren Orientierungen dient die im vorigen Abschnitt ermittelte relative Orientierung des Bildpaares. Die Startwerte für die Objektkoordinaten sind durch Vorwärtsschnitt (4.3) auf Grundlage der relativen Orientierung der beiden Bilder berechnet worden:

Objektpunkt	X-Koordinate	Y-Koordinate	Z-Koordinate
2	0.2165	0.4879	1.3358
3	0.2323	0.3261	1.0815
6	0.1082	0.2596	1.16
7	0.2833	0.2426	1.16
8	0.1395	0.1798	1.2278
9	0.2741	0.2047	1.2185
11	0.3202	0.1011	1.5358
12	0.4741	0.0784	1.621
13	0.4772	0.0782	1.435
14	0.3869	-0.1162	1.5386
15	0.3876	-0.1226	1.4281
16	0.4756	-0.1199	1.6236
18	0.5694	-0.1217	1.4663
20	0.6805	-0.3862	1.6651
24	0.0805	-0.3837	1.1817
26	-0.3771	-0.3689	1.8307
27	0.4555	0.6636	1.869

Tabelle 7-10: Koordinaten der Verknüpfungspunkte

Die Ausgleichsrechnung erreicht nach der 3. Iteration ein Residuum des Verbesserungs-Vektors von 0.0000371. Die Ergebnisse lauten:

Parameter	Bündelblockausgleich Scan 3D	relative Orientierung Scan 3D	Differenz-Betrag
x-Translation X_0	0.9979	1	0.0021
y-Translation Y ₀	0.0543	0.0525	0.0018
z-Translation Z ₀	0.3301	0.3301	0
omega-Rotation ω	0.35°	0.277°	0.073°
phi-Rotation φ	-19.905°	-19.983°	0.078°
kappa-Rotation κ	2.185°	2.128°	0.057°

Tabelle 7-11: Test des Moduls der Bündelblockausgleichung

Die Abweichungen der Ergebnisse des Bündelblockausgleiches im Vergleich zur relativen Orientierung sind vernachlässigbar klein. Somit sind die Ergebnisse indirekt auch ein Nachweis für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der relativen Orientierung.

Des Weiteren kam das Modul der Bündelblockausgleichung von *Scan 3D* mit einem vergleichbaren Bündelblockausgleichungs-Programm (DGAP [WEB7]) mit identischen Eingabeparametern zu den gleichen Ausgabe-Resultaten.

7.2.3 Messwert-Betrachtung

Die erfolgreichen Tests der Module der relativen Orientierung und der Bündelblockausgleichung von *Scan 3D* haben gezeigt, dass die auftretenden Genauigkeitsabweichungen einen anderen Ursprung haben müssen.

Als Fehlerquelle verbleiben so nur die aus dem Aufnahmen-Prozess entstammenden Messwerte.

Um die Funktionsfähigkeit des Moduls des Auswertungs-Prozesses zu überprüfen, können die Projektionsbilder (Referenzbilder, Gray-Code-Bilder, Phasenbilder) gleichsam als Aufnahme-Bilder für mehrere Positionen verwendet werden. Durch die so geschaffene künstliche Aufnahmesituation sollte die direkte und ihre zugehörige indirekte Ansicht identisch sein. Das heißt, die Matrix-Bildkoordinaten eines direkten Triangulationswertes müssten mit den Matrix-Bildkoordinaten des korrespondierenden indirekten Triangulationswertes für alle Matrix-Bildpunkte übereinstimmen.

Test der Referenzbild-Auswertung:

Da die aufgenommen Referenzbilder gleich den projizierten Referenzbildern sind, kommen nur die beiden Hell-Dunkel-Maximal-Intensitäten (I_{H} , I_{D}) vor. Somit müssten für alle Bildpunkte des berechneten Referenz-Bildes (horizontal und vertikal) der Referenzwert dem Mittelwert (I_{M}) dieser beiden Extremwerte entsprechen.

$$I_M = (I_H - I_D) \div 2 = (255 - 0) \div 2 = 127.5$$

Gleichung 7-5: Mittelwert der Hell-Dunkel-Maximal-Intensitäten für 8-Bit-Grauwert-Auflösung

Die ermittelten Referenz-Bilder bestätigen diese Forderung:



Abbildung 7-15: Test-Referenz-Bild mit Referenzwert 127.5 für alle Bildpunkte

Test der Gray-Code-Bild-Auswertung:

Das resultierende horizontale und vertikale Gray-Code-Bild sollte alle auftretenden Streifen des Gray-Code-Musters gleichmäßig in aufsteigender Ordnung darstellen. Dies ist der Fall:



Abbildung 7-16: links horizontales und rechts vertikales Test-Gray-Code-Bild

Test der Phasenbild-Auswertung:

Die resultierenden Phasenwerte der unskalierten horizontalen und vertikalen Phasen-Shift-Bilder sollten innerhalb eines Gray-Code-Streifenbereiches (siehe Abschnitt 6.3.1.4) eine linear streng monoton steigende Wertefolge mit den Extremwerten Null und Eins besitzen. Die berechneten Phasen-Shift-Bilder deuten dies an:



Abbildung 7-17: links horizontales und rechts vertikales Test-Phase-Shift-Bild

Test der Triangulationswert-Berechnung:

Wie schon oben angedeutet, sollten innerhalb dieses Testes für alle Bildpunkte der Bild-Matrix die Matrix-Bildkoordinaten eines direkten Triangulationswertes mit den Matrix-Bildkoordinaten des korrespondierenden indirekten Triangulationswertes übereinstimmen. Da der gesamte Bildbereich zum gültigen Auswertungsbereich gehört, müssten sowohl das indirekte als auch das direkte Triangulations-Bild komplett mit homologen Bildpunkten überdeckt sein. Die erzeugten Triangulations-Bilder bestätigen dies wiederum:



Abbildung 7-18: links direktes und rechts indirektes Test-Triangulations-Bild

Ungenauigkeiten in Projektion und Aufnahme:

Zieht man den Schluss, dass wenn, wie oben gezeigt, der Auswertungs-Prozess für den trivialen Standardfall dann auch für jede beliebige Auswertungs-Situation stabile Ergebnisse liefert, so müsste die auftretende Genauigkeitsabweichung in vorhergehenden Schritten der Prozess-Kette verursacht werden.

Der Aufnahme-Prozess beinhaltet sowohl die Projektion, als auch die Aufnahme der Projektionsbilder. Wie im Abschnitt 7.1.2 dargelegt, liefert die Auswertung der Referenzbildund Gray-Code-Projektionen stabile Resultate. Daher verbleibt hauptsächlich nur die Phasenbild-Auswertung als Fehlerquelle.

Hierbei liegt eine systematische Verschiebung der gemessenen Phase vor. Die Ursachen hierfür liegen in:

- Variationen der Reflektionseigenschaften der Objektoberfläche
- Stufenförmiges (diskretes) Projektionsbild der Phasenmuster (zu geringe Auflösung)
- Abweichungen des projizierten Musters von der im Modell angenommenen Sinus-Form [Gue02]

Die Variation der Reflektionseigenschaften des Objektes wird größtenteils durch das Referenzbild-Verfahren kompensiert. Bei starken Beleuchtungsverzerrungen kann das Verfahren jedoch nicht ausreichend greifen (innerhalb der markierten Streifen in Abbildung 7-19). Die Folge ist ein verfälschter Referenzwert an solchen Stellen, der alle dortigen weitergehenden Auswertungen wie Gray-Code-, Phasenwert- und Triangulationswert-Berechnung beeinflusst:



Abbildung 7-19: Beispiel Einfluss des Reflektionsverhalten der Objektoberfläche

Gründe für die Abweichung des projizierten Musters von der Sinus-Form liegen zum Einen an den ungenügenden Tiefenschärfe-Eigenschaften der verwendeten Kameras und des Projektors. Zum Anderen müssen für verschiedene Umgebungsbeleuchtungs-Situationen das Kontrast- und Helligkeits-Verhalten der Kameras angepasst werden, was sich wiederum auf die Abbildung des Phasensignals auf dem Messobjekt und im Aufnahme-Bild auswirkt.



Abbildung 7-20: oben Phasenprojektionsmuster und unten aufgenommenes Phasenbild

Abbildung 7-20 macht dies deutlich. Oben ist das zu projizierende ideale Phasenbild und unten ein von der Messkamera aufgenommenes, vom Messobjekt reflektiertes, Phasen-

Messbild zu sehen, welches senkrecht zur Kamera-Achse liegt. Die durchgehenden Streifen, die im nachhinein hinzugefügt wurden, verbinden die beiden Bilder über die gleichen Grauwert-Intensitäten. Das heisst, wenn das untere aufgenommene Phasen-Messbild eine ideale Sinus-Phasenform wie im oberen Phasenbild besitzen würde, so dürften die Verbindungs-Streifen an der Verbindungsstelle keine Brechung aufweisen. Wie in Abbildung 7-20 ersichtlich, ist dies aber nicht der Fall. Die aufgenommene Phasenform ist verzerrt.

Diese verzerrte Sinus-Darstellung (siehe Abbildung 7-20) wirkt sich auf die Berechnung der Phasenwerte und somit auf die Triangulationswert-Berechnung aus. Diese scheinbar kleine Störung kann zur Folge haben, dass in den nachfolgenden Schritten, wie der relativen Orientierung und des Bündelblockausgleiches, es zu verfälschten oder gar keinen Ergebnissen kommt.

Eine andere Form der Visualisierung der verzerrten Sinus-Darstellung oder Aufnahme wird in [Wio01] beschrieben. Dabei werden die normierten Grauwerte zweier um 90° zueinander verschobener Phasenbilder gegeneinander aufgetragen. Im Idealfall wäre dabei die Verteilung der Punkte, analog zum Einheitskreis, kreisförmig. Bei zwei willkürlich gewählten Phase-Shift-Bildern aus dem Testfall aus Abschnitt 7.1 stellt sich jedoch eine Punktverteilung wie in Abbildung 7-21 dar



Abbildung 7-21: links ideale Phasenwertverteilung, rechts gemessene Phasenwertverteilung

Die ideale Phasenwertverteilung aus Abbildung 7-21 wurde über den in diesem Abschnitt beschriebenen Standardfall ermittelt.

Die gemessene Phasenwertverteilung zweier um 90° verschobener Phasenbilder zeigt hingegen, dass besonders im dritten, sowie im zweiten und vierten Quadranten eine schlechte Verteilung vorliegt. Der negative (dunkle) Sinus-Wellen-Anteil wird daher ungenauer (verzerrter) projiziert oder aufgenommen als der positive (helle) Sinus-Wellen-Anteil.

7.3 Verbesserungs-Ansätze

In diesem Abschnitt werden zur Beseitigung der angesprochenen bestehenden Probleme dieser Arbeit einige Verbesserungsmöglichkeiten skizziert, die aus Zeitgründen nicht mehr umgesetzt werden konnten.

relative Orientierung / Bündelblockausgleichung:

- Verwenden eines *Data-Snooping* Verfahrens zur Erkennung und Aussortierung von fehlerhaften oder zu ungenauen Bildpunkten (Ausreißer)

Phasenwert-Bestimmung:

- Bestimmung einer Funktion (Objektphasentransferfunktion, siehe [Wio01]), die die Verzerrung der Phasenprojektion bestimmt und anschließend glättet
- Einsatz des Line-Shift-Verfahrens zur stabileren Subpixel-Bestimmung (siehe [Ste04])

Allgemein:

- Hinzufügung der Farbinformation zu jedem Objektpunkt der Punktwolke
- Punktreduktion
8 Fazit

Die im Abschnitt zur Motivation gesteckte Zielsetzung wurde meines Erachtens umgesetzt.

Die Gründe für die teilweise Abweichung der im Mess-Prozess erzielten Resultate von der gewünschten Genauigkeit sind im Kapitel 7 dargelegt. Um die Genauigkeit zu steigern, ist bei einer weiteren Verwendung von Amateur-Messgeräten, die Verwendung einer Objektphasentransferfunktion, um die Projektions- und Aufnahme-Verzerrung der Phasenbilder zu kompensieren, unbedingt erforderlich. Eine stabilere Rekonstruktion des Phasensignals wäre somit gegeben, wodurch alle nachfolgenden Auswertungsschritte ebenfalls an Genauigkeit gewinnen würden. Denkbar wäre zum Beispiel eine Referenz-Phasenprojektion auf eine planare Ebene, die orthogonal zur Projektionsrichtung des Projektors steht. Die Bestimmung einer solchen Funktion würde so jedoch einen manuellen Arbeitsschritt vor der eigentlichen Messung erforderlich machen, was wiederum der geforderten Zielsetzung eines vollautomatisierten Mess-Prozesses widersprechen würde.

Die implementierten Module der Bündelblockausgleichung, der relativen Orientierung und der Ausgleichsrechnung können ohne Weiteres auch in anderen Projekten mit einbezogen werden.

Abschließend hoffe ich, dass diese Arbeit ein Ausgangspunkt für weitere Arbeiten ist.

9 Quellenverzeichnis

Literatur:

[Ack65]	F. E. Ackermann, Fehlertheoretische Untersuchungen über die Genauigkeit photogrammetrischer Streifentriangulation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 87, München, 1965
[Boe01]	J. Böhm, Erfassung und Interpretationen von dichten Oberflächendaten, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 2001
[Fin52]	R. Finsterwalder, Photogrammetrie, Walter de Gruyter & Co Berlin, 1952
[Gro69]	W. Großmann, Grundzüge der Ausgleichsrechnung, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1969
[Gue02]	J. Gühring, 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 560, München, 2003
[NKH03]	G. Notni, P.Kühnstedt, M. Heinze, M. Himmelreich, Phasogrammetrische Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung, In: Th. Luhmann (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik (Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003), Wichmann Verlag Heidelberg, 2003
[Koz04]	K. Kozempel, Kalibrierung eines Bildaufnahmeverfahrens zur Gewinnung von 3D-Informationen, Bachelorarbeit am Lehrstuhl Grafische Systeme der BTU Cottbus, 2004
[Kra87]	K. Krauss, Photogrammetrie Band 2, Theorie und Praxis der Auswertesysteme, Ferd. Dümmler Verlag Bonn, 1987
[KSW98]	D. Kruglinski, S. Wingo und G. Shepard, Inside Visual C++ 6.0, Microsoft Press Deutschland, 1998
[Luh02]	T. Luhmann, Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Wichmann Verlag Heidelberg, 2003
[Luh03]	T. Luhmann, Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003, Wichmann Verlag Heidelberg, 2003
[QSS02]	A. Quateroni, R. Sacco, F. Saleri, Numerische Mathematik 1, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2002
[Scw93]	H.R. Schwarz, Numerische Mathematik, 3. Auflage, B.G. Teubner Stuttgart, 1993

[SN99]	W. Schreiber und G. Notni, Theory and arrangements of self-calibrating whole- body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique, Paper SM-18, Fraunhofer Institut Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena,1999
[Ste04]	I. Steinicke, Erzeugung von Punktwolken mittels Lineshiftverfahren, Bachelorarbeit, BTU Cottbus, 2004
[Str93]	G. Strunz, Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 1993
[Wil02]	W.Wilke, Segmentierung und Approximation großer Punktwolken, Dissertation TU Darmstadt, 2002
[Wio01]	G. Wiora, Optische 3D-Messtechnik, Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren, Inaugural-Dissertation, Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg, 2001
[Wol68]	H. Wolf, Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate, Ferd. Dümmlers Verlag Bonn, 1968

Internet:

- [WEB1] <u>http://www.1394imaging.com/products/cameras/dfk41f02/docs/specs.htm</u>, 7.10.2006
- [WEB2] <u>http://www.olympus.co.jp/en/news/2001a/nr010626c4040zspe.cfm</u>?, 7.10.2006
- [WEB3] <u>http://www.physikinstrumente.de/products/prdetail.php?secid=7-58</u>, 11.05.2006
- [WEB4] <u>http://www.codeproject.com/opengl/wrl_viewer.asp</u>, 13.06.2006
- [WEB5] <u>http://freeimage.sourceforge.net/</u>, 7.10.2006
- [WEB6] <u>http://ltilib.sourceforge.net/doc/html/index.shtml</u>, 7.10.2006
- [WEB7] <u>http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/openbundle/index.html</u>, 22.07.2006
- [WEB8] <u>http://www.kliss-h.de/vektorrechnung15.htm</u>, 5.07.2006
- [WEB9] <u>http://www.righthemisphere.com/products/dexp/index.html</u>, 7.10.2006

Anhang A1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: berührungslose Messverfahren [Luh02] S.7	.6
Abbildung 2-2: Prinzip der Triangulation [Wil02] S.13	6
Abbildung 2-3: Prinzip der Streifenprojektion mit Beispielen [Wil02] S. 13	8
Abbildung 2-4: Gray-Code Projektion mit 7 Projektionsebenen [Luh02] S.481	10
Abbildung 2-5: rekursiver Aufbau der Gray-Code-Ebenen [Wil02] S.16	11
Abbildung 2-6: vier Projektionsmuster beim Phase-Shift: jeweils um 90° verschoben [Wil02]	
S.17	12
Abbildung 2-7: photogrammetrisches Messprinzip [Luh02] S.8	14
Abbildung 2-8: Innere Orientierung (Lochkamera-Modell) [Luh02] S.119	14
Abbildung 2-9: Äußere Orientierung [Luh02] S. 235	15
Abbildung 2-10: geometrisches Aufnahmemodell der Phasogrammetrie [Luh02] S.483	18
Abbildung 2-11: Aufnahme- und Auswerteprozess der Phasogrammetrie	19
Abbildung 3-1: Schnitt von Strahlenbündeln [Luh02] S.266	22
Abbildung 3-2: Datenfluss der Bündeltriangulation [Luh02] S.269	23
Abbildung 4-1: relative Orientierung eines abhängigen Bildpaares [Luh02] S. 252	30
Abbildung 4-2: gefährlicher Zylinder [Luh02] S. 261	34
Abbildung 4-3: absolute Orientierung durch Ähnlichkeitstransformation [Luh02] S. 264	34
Abbildung 4-4: Verknüpfungspunkt-Berechnung	36
Abbildung 5-1: Grundanordnung der flexiblen phasogrammetrischen 3D-Messung [Luh03]	
S.27	38
Abbildung 5-2: verwendeter Messaufbau mit einer Mess- und Kalibrierkamera	39
Abbildung 5-3: Aufnahmeprozess	40
Abbildung 6-1: Programmablauf	43
Abbildung 6-2: Geräte-Struktur	47
Abbildung 6-3: Projektor-Struktur	48
Abbildung 6-4: Tisch-Struktur	48
Abbildung 6-5: Kamera-Struktur	49
Abbildung 6-6: Test-Bild des Referenz-Bildes (horizontal)	52
Abbildung 6-7: Startpunktsuche	53
Abbildung 6-8: Objektfreistellung	53
Abbildung 6-9: Testbild Gray-Code-Bild	55
Abbildung 6-10: Phasenwertskalierung	56
Abbildung 6-11: links visualisiertes Phasen-Bild ohne Skalierung, rechts mit Skalierung	59
Abbildung 6-12: Testbild eines indirekten Triangulations-Bildes (Projektor-Ansicht)	61
Abbildung 6-13: Klassen-Diagramm Ausgleichungs-Modul	63
Abbildung 6-14: Klassendiagramm Bündelblockausgleich (funktionales Modell)	64
Abbildung 6-15: Schnittbild – Generierung zweier benachbarter Triangulations-Bilder	69
Abbildung 6-16: links gute, rechts schlechte Bildpunktverteilung	70
Abbildung 6-17: Punkt-Generationen 1- 3 auf dem Schnittbild	71
Abbildung 6-18: Verteilung der homologen Punkte nach der Bündel-Generierung	71
Abbildung 6-19: Klassendiagramm relative Orientierung	72
Abbildung 6-20: Kopieren der Ausgleichsobjekte	76
Abbildung 6-21: Klasse CAdjustingUnknown	79
Abbildung 6-22: Klasse CAdjustingObservation	80
Abbildung 6-23: Programmoberfläche von Scan 3D	84
Abbildung 7-1: Referenzbilder Messkamera zweite Ansicht - vertikale Ausrichtung	88
Abbildung 7-2: Referenzbilder Messkamera zweite Ansicht - horizontale Ausrichtung	89
Abbildung 7-3: Gray-Code-Bilder Messkamera zweite Ansicht - vertikale Ausrichtung	89
Abbildung 7-4: Gray-Code-Bilder Messkamera zweite Ansicht - horizontale Ausrichtung	89
Abbildung 7-5: Phasenbilder Messkamera zweite Ansicht - vertikale Ausrichtung	90
Abbildung 7-6: Phasenbilder Messkamera zweite Ansicht - horizontale Ausrichtung	90
Abbildung 7-7: links vertikales Referenz-Bild, rechts horizontales Referenz-Bild	90
Abbildung 7-8: links vertikales Gray-Code-Bild, rechts horizontales Gray-Code-Bild	91

Abbildung 7-9: links vertikales Phase-Shift-Bild, rechts horizontales Phase-Shift-Bild91
Abbildung 7-10: links indirektes (inverses) Triangulations-Bild, rechts direkte Triangulations-
Bild
Abbildung 7-11: homologe Bildpunkte im indirekten und direkten Triangulations-Bild92
Abbildung 7-12: VRML-Darstellung der berechneten Punktwolke zweier Ansichten [WEB9] 96
Abbildung 7-13: Testbild linke Ansicht
Abbildung 7-14: Testbild rechte Ansicht
Abbildung 7-15: Test-Referenz-Bild mit Referenzwert 127.5 für alle Bildpunkte101
Abbildung 7-16: links horizontales und rechts vertikales Test-Gray-Code-Bild101
Abbildung 7-17: links horizontales und rechts vertikales Test-Phase-Shift-Bild102
Abbildung 7-18: links direktes und rechts indirektes Test-Triangulations-Bild
Abbildung 7-19: Beispiel Einfluss des Reflektionsverhalten der Objektoberfläche
Abbildung 7-20: oben Phasenprojektionsmuster und unten aufgenommenes Phasenbild 103
Abbildung 7-21: links ideale Phasenwertverteilung, rechts gemessene Phasenwertverteilung

Anhang A2 Gleichungsverzeichnis

Gleichung 2-1: Triangulation zur Basis	7
Gleichung 2-2: Abstand Objektpunkt zum Messgerät	7
Gleichung 2-3: Winkelberechnung Basisvektor zu Objektvektor	8
Gleichung 2-4: Binärisierung des gemessenen Pixel-Grauwertes	10
Gleichung 2-5: Gray-Code Aufbau	11
Gleichung 2-6: Intensitätsverlauf beim 4er-Phasenshift	12
Gleichung 2-7: Intensitätsverlauf beim 4er-Phasenshift (zusammengefasst)	13
Gleichung 2-8: Umrechnung Phasen-Intensitäten in Bogenmaß	13
Gleichung 2-9: Zusammenhang Objektpunkt-Vektor im MKS und WKS	16
Gleichung 2-10: Gleichsetzen von Vektor X*	16
Gleichung 2-11: Ersetzung von Vektor X*	16
Gleichung 2-12: Erweiterung um Bildhauptpunkt und Korrekturterm	16
Gleichung 2-13: Kollinearitätsgleichungen	17
Gleichung 2-14: Kollinearitätsgleichungen mit Phasenkoordinten [Luh02] S. 484	19
Gleichung 3-1: Beobachtungsvektor L	23
Gleichung 3-2: Unbekanntenvektor X	23
Gleichung 3-3: funktionales Modell	24
Gleichung 3-4: Verbesserungsgleichungen	24
Gleichung 3-5: Verbesserungen \hat{x}	24
Gleichung 3-6: gekürzte Beobachtungen /	24
Gleichung 3-7: TAYL OR-Reihenentwicklung an X^0	25
Gleichung 3-8: Designmatrix A	25
Gleichung 3-9: linearisierte Verbesserungsgleichungen	25
Gleichung 3-10: Normalgleichungen	26
Gleichung 3-11: Unbekannten-Verbesserung einer Iteration k	27
Gleichung 3-12: Anzahl der Beobachtungen	27
Gleichung 3-13: Anzahl der Unbekannten	27
Gleichung 3-14: Substituierung der Kollinearitätsgleichungen [Luh02] S 241	28
Gleichung 3-15: Differentialguotienten äußere Orientierung II uh021 S 241	29
Gleichung 3-16: Differentialguotienten innere Orientierung [Luh02] S.272	29
Gleichung 3-17 [.] Differentialguotienten Obiektkoordinaten [] uh02] S 272	29
Gleichung 4-1: Koplanaritätsbedingung (Spatvolumen)	31
Gleichung 4-2: Koplanaritätsbedingung (in Determinanten-Form)	31
Gleichung 4-3: Transformation <i>r</i> "	32
Gleichung 4-4: Rotationsmatrix <i>R</i> [Luh02] S.37	32
Gleichung 4-5: Verbesserung relative Orientierung [Luh02] S.254	32
Gleichung 4-6: Startwerte der relativen Orientierung	32
Gleichung 4-7: Differentialguotienten der Koplanaritätsbedingung [Luh02] S.254	33
Gleichung 4-8: Ähnlichkeitstransformation	35
Gleichung 4-9: Verbesserungen absolute Orientierung [Luh02] S.264	35
Gleichung 4-10: Richtungsvektoren der Geraden g' und g"	36
Gleichung 4-11: Geradengleichungen von q' und q''	36
Gleichung 4-12: Richtungsvektor der kürzesten Verbindung	37
Gleichung 4-13: Schnittebene	37
Gleichung 6-1: Größe Phasen-Periode in Pixel	47
Gleichung 6-2: Schnittpunkt von g1 und g2	57
Gleichung 6-3: Skalierungsfaktor s	57
Gleichung 6-4: Phasenwert-Skalierung	57
Gleichung 6-5: Skalierungsfaktor bei Fall 1	58
Gleichung 6-6: Skalierungsfaktor bei Fall 2	58
Gleichung 6-7: Beispiel Mindestpunktanzahl	65
Gleichung 6-8: Positions-Qualität einer Kamera	67
Gleichung 6-9: relative Bildkoordinaten	76

Gleichung 6-10: Kollinearitätsgleichungen der relativen Bildkoordinaten	76
Gleichung 6-11: erweiterte Differentialquotienten äußere Orientierung	77
Gleichung 6-12: erweiterte Differentialquotienten innere Orientierung	78
Gleichung 6-13: erweiterte Differentialquotienten Objektkoordinaten	78
Gleichung 7-1: Vektor Projektionszentrum Projektor zum Objektmittelpunkt (Rotati	onsachse) 93
Gleichung 7-2: Vektor Projektionsmittelpunkt Projektor zum Projektionszentrum M	esskamera 94
Gleichung 7-3: minimale Genauigkeitsabweichung relative Orientierung der Messk Gleichung 7-4: minimale Genauigkeitsabweichung Translations-Maßstab der Mess Gleichung 7-5: Mittelwert der Hell-Dunkel-Maximal-Intensitäten für 8-Bit-Grauwert-	kamera95 skamera 95 Auflösung 100

Anhang A3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Projektionsebenen bei Binärcode	9
Tabelle 4-1: gesuchte und gegebene Größen der relativen Orientierung	31
Tabelle 6-1: Beispiel internes-Bildformat	45
Tabelle 6-2: Beispiel Projektions-Auflösung	46
Tabelle 6-3: Beispiel Mindestpunktanzahl	65
Tabelle 6-4: Beispiel Kalibrierkamera-Lauf-Liste	67
Tabelle 6-5: Beispiel Bündel-Daten	68
Tabelle 6-6: Unbekannten-Typ	79
Tabelle 7-1: Kalibrierungs-Parameter	88
Tabelle 7-2: Innere Orientierung von Messkamera und Projektor	88
Tabelle 7-3: relative Orientierung der Projektor-Positionen	93
Tabelle 7-4: Bündelblockausgleich Projektor-Orientierung	94
Tabelle 7-5: relative Orientierung zwischen Projektor- und Messkamera-Positionen	94
Tabelle 7-6: absolute Orientierung der Messkamera an Position eins und zwei	95
Tabelle 7-7: manuelle Vergleichswerte für Test der relativen Orientierung	96
Tabelle 7-8: Koordinaten der homologen Bildpunkte aus rechter und linker Ansicht	98
Tabelle 7-9:Test des Moduls der relativen Orientierung	98
Tabelle 7-10: Koordinaten der Verknüpfungspunkte	99
Tabelle 7-11: Test des Moduls der Bündelblockausgleichung	100

Anhang B Kalibrierungs-Protokoll der Beispiel-Messung

Protokoll_Geräte_Kalibrierung.txt

Projektor Kalibrierung:

innere Orientierung:	
Kamera-Konstante:	46 mm
Hauptpunkt-X:	0 mm
Hauptpunkt-Y:	0 mm
Bildbreite:	18.288 mm
Bildhöhe:	13.716 mm

relative Orientierung:

gemessene Bildpunktpaare (in mm) der beiden Bildansichten Projektor-Position 1 und Projektor-Position 2:

OP-Nr.	X-Wert (links)	Y-Wert (links)	X-Wert (rechts)	Y-Wert (rechts)
1	1.3693	1.9862	-0.16146	1.9636
2	-2.0642	0.86384	-3.3687	0.68015
3	-0.16901	0.72881	-1.7227	0.57387
4	0.9827	3.8491	0.043205	3.7602
5	0.55944	0.83215	-1.0941	0.68339
6	-0.70389	-0.86609	-2.3997	-1.0277
7	1.9882	-1.5033	0.55848	-1.5256
8	2.2908	1.8685	0.83863	1.9432
9	2.6921	-1.434	1.1917	-1.4022
10	-1.1464	-2.5607	-2.1987	-2.5793
11	-2.8263	-2.5969	-3.1643	-2.7111
12	-1.5601	0.86508	-2.8663	0.69068
13	-0.83085	-2.4468	-1.8876	-2.491
14	1.4729	-3.0004	0.21339	-2.9581
15	1.423	0.65465	-0.052201	0.6355
16	2.5384	0.86776	1.1092	0.94931
17	-1.4353	0.00045	-2.8683	-0.12872
18	0.90121	-0.42862	-0.57996	-0.42939
19	1.3241	2.9446	-0.0079823	2.9147
20	1.5869	-0.31938	0.050334	-0.30915

21	-0.77566	1.5838	-2.3969	1.364
22	0.57274	1.2871	-0.97985	1.2787
23	1.6916	0.24135	0.22266	0.22965
24	-0.53139	-0.071991	-2.0625	-0.22308
25	1.4044	1.2883	-0.096664	1.2858
26	-1.1046	-0.77622	-2.6471	-0.88697
27	-2.5358	-0.83643	-3.4298	-1.0191
28	-1.143	0.91605	-2.7075	0.8009

Ausgleichsrechnung:

Abbruch der Ausgleichsrechnung nach der 4. Iteration. Die L2-Norm des Verbesserungs-Vektors (Residuum) liegt bei: 6.2298e-005

relative Orientierung von Projektor-Position 1 zu Projektor-Position 2:

äußere Orientierung: Translation in X-Richtung: Translation in Y-Richtung: Translation in Z-Richtung: omega-Drehung: phi-Drehung: kappa-Drehung:	1 -0.020867 0.18129 -0.010191 rad -0.41901 rad -0.055121 rad
absolute Orientierung:	
Position 1:	
Maßstab:	1
äußere Orientierung: Translation in X-Richtung: Translation in Y-Richtung: Translation in Z-Richtung: omega-Drehung: phi-Drehung: kappa-Drehung:	0 0 0 rad 0 rad 0 rad 0 rad
Position 2:	
Maßstab:	1
äußere Orientierung: Translation in X-Richtung: Translation in Y-Richtung: Translation in Z-Richtung: omega-Drehung: phi-Drehung: kappa-Drehung:	1 -0.020867 0.18129 -0.010191 rad -0.41901 rad -0.055121 rad

Modellkoordinaten:

Modellkoordinaten für den Blockbündelausgleich:

OP-Nr.	X-Wert	Y-Wert	Z-Wert
1	0.067502	0.098092	2.2674
2	-0.1004	0.04293	2.2379
3	-0.0082458	0.0344	2.2381
4	0.050032	0.19505	2.3438
5	0.027167	0.038633	2.237
6	-0.033768	-0.042932	2.2054
7	0.097885	-0.075171	2.265
8	0.11383	0.093707	2.2851
9	0.13248	-0.071031	2.2638
10	-0.056386	-0.12499	2.2632
11	-0.14259	-0.1316	2.3205
12	-0.076175	0.042628	2.2463
13	-0.040963	-0.12045	2.268
14	0.072715	-0.14749	2.2708
15	0.070115	0.032144	2.2666
16	0.12606	0.043772	2.2841
17	-0.069526	0.00075002	2.2288
18	0.044174	-0.020216	2.2539
19	0.066074	0.14698	2.2955
20	0.077829	-0.01538	2.2559
21	-0.037567	0.075519	2.2263
22	0.028086	0.064704	2.2517
23	0.083384	0.011524	2.2678
24	-0.02579	-0.0044507	2.231
25	0.069234	0.063963	2.2672
26	-0.053236	-0.037166	2.2172
27	-0.12504	-0.041709	2.2681
28	-0.055214	0.045792	2.2237

Ausgleichsrechnung:

Abbruch der Ausgleichsrechnung nach der 2. Iteration. Die L2-Norm des Verbesserungs-Vektors (Residuum) liegt bei: 1.5103e-005

Position 1:

äußere Orientierung:	
Translation in X-Richtung:	0
Translation in Y-Richtung:	0
Translation in Z-Richtung:	0
omega-Drehung:	0 rad
phi-Drehung:	0 rad
kappa-Drehung:	0 rad

46 mm 0 mm 0 mm 18.288 mm 13.716 mm
1.0001 -0.020943 0.18156 -0.010228 rad -0.41908 rad -0.055131 rad
46 mm 0 mm 0 mm 18.288 mm 13.716 mm

Messkamera Kalibrierung:

innere Orientierung:	
Kamera-Konstante:	21 mm
Hauptpunkt-X:	0 mm
Hauptpunkt-Y:	0 mm
Bildbreite:	7.18 mm
Bildhöhe:	5.32 mm

relative Orientierung:

gemessene Bildpunktpaare (in mm) der beiden Bildansichten:

OP-Nr.	X-Wert (links)	Y-Wert (links)	X-Wert (rechts)	Y-Wert (rechts)
1	3.8402	0.8745	1.2116	-0.15517
2	0.38322	1.8542	-0.81897	0.21058
3	2.3727	0.59526	0.30291	-0.41008
4	0.87051	0.85725	-0.54972	-0.28817
5	0.47441	3.8258	-0.38144	1.4076
6	1.9989	-1.2859	0.067312	-1.4187
7	3.0194	-2.7169	1.1892	-2.0393
8	2.3615	-2.1575	0.33656	-1.9174
9	4.5043	0.46346	1.8399	-0.28817
10	4.5457	-2.2757	2.0979	-1.7955
11	0.33593	-1.725	-0.84141	-1.6736
12	-2.5631	-1.9327	-1.694	-1.5517
13	1.486	1.5248	-0.1795	0.077583
14	-1.2353	1.6624	-1.5145	0.14408
15	0.62631	-2.7633	-0.57216	-2.1723
16	3.4537	0.31693	0.93116	-0.54308
17	-0.39738	0.78918	-1.2565	-0.35467
18	1.7504	3.4348	0.25803	1.2746
19	4.413	-0.62446	1.6492	-0.97533
20	1.1659	0.23945	-0.37022	-0.60958
21	3.1672	-0.92849	0.74044	-1.2303
22	1.6547	-0.65352	-0.11219	-1.1083
23	3.633	2.0054	1.4023	0.52092
24	2.0115	2.4387	0.067312	0.5985
25	2.1468	1.4099	0.19072	0.022167
26	3.1581	0.78909	0.75166	-0.28817
27	2.5886	2.4246	0.41509	0.62067
28	3.0242	-0.12168	0.63947	-0.78692

Ausgleichsrechnung:

Abbruch der Ausgleichsrechnung nach der 7. Iteration. Die L2-Norm des Verbesserungs-Vektors (Residuum) liegt bei: 0.00022122

relative Orientierung von Messkamera-Position 1 zu Projektor-Position 1:

äußere Orientierung: Translation in X-Richtung:

0	
Translation in X-Richtung:	1
Translation in Y-Richtung:	0.30998
Translation in Z-Richtung:	0.61054
omega-Drehung:	0.18345 rad
phi-Drehung:	-0.58781 rad
kappa-Drehung:	0.025071 rad

absolute Orientierung:

Position 1:

Maßstab: 1.1539

äußere Orientierung:	
Translation in X-Richtung:	1.1539
Translation in Y-Richtung:	0.35768
Translation in Z-Richtung:	0.7045
omega-Drehung:	0.18345 rad
phi-Drehung:	-0.58781 rad
kappa-Drehung:	0.025071 rad

Modellkoordinaten:

Modellkoordinaten für den Blockbündelausgleich:

OP-Nr.	X-Wert	Y-Wert	Z-Wert
1	0.19284	0.045628	2.3159
2	0.018927	0.089886	2.2475
3	0.11758	0.02906	2.2772
4	0.042509	0.042246	2.251
5	0.024307	0.19211	2.325
6	0.097822	-0.062444	2.256
7	0.15456	-0.1395	2.3511
8	0.11681	-0.10779	2.2645
9	0.23074	0.025682	2.3625
10	0.23565	-0.1183	2.3831
11	0.016238	-0.083384	2.2235
12	-0.12724	-0.094722	2.2779
13	0.07351	0.074634	2.27
14	-0.060411	0.081575	2.245
15	0.030405	-0.13429	2.2398
16	0.17247	0.015321	2.2951
17	-0.019387	0.038733	2.2247
18	0.088639	0.1753	2.3356
19	0.22344	-0.031008	2.3314
20	0.057067	0.011995	2.2548
21	0.15695	-0.046054	2.2792
22	0.081306	-0.032668	2.2545
23	0.18718	0.10228	2.3666
24	0.09959	0.12095	2.2785
25	0.10673	0.068857	2.2802
26	0.15747	0.038873	2.2917
27	0.12887	0.12108	2.2916
28	0.14974	-0.0057221	2.2792

Ausgleichsrechnung:

Abbruch der Ausgleichsrechnung nach der 2. Iteration. Die L2-Norm des Verbesserungs-Vektors (Residuum) liegt bei: 0.00021248

Position 1:

äußere Orientierung:	
Translation in X-Richtung:	1.1547
Translation in Y-Richtung:	0.35797
Translation in Z-Richtung:	0.70543
omega-Drehung:	0.18372 rad
phi-Drehung:	-0.58841 rad
kappa-Drehung:	0.024988 rad
innere Orientierung:	
Kamera-Konstante:	21 mm
Hauptpunkt-X:	0 mm
Hauptpunkt-Y:	0 mm
Bildbreite:	7.18 mm
Bildhöhe:	5.32 mm

innere Orientierung:	
Kamera-Konstante:	21 mm
Hauptpunkt-X:	0 mm
Hauptpunkt-Y:	0 mm
Bildbreite:	7.18 mm
Bildhöhe:	5.32 mm

relative Orientierung:

gemessene Bildpunktpaare (in mm) der beiden Bildansichten:

OP-Nr.	X-Wert (links)	Y-Wert (links)	X-Wert (rechts)	Y-Wert (rechts)
1	3.2194	0.96468	0.75166	-0.1995
2	-0.3097	2.477	-1.0433	0.58742
3	1.6413	0.63509	-0.1795	-0.43225
4	0.70796	0.64332	-0.59459	-0.399
5	1.6988	3.8176	0.43753	1.4519
6	-0.10234	3.8373	-0.56094	1.3965
7	1.7145	-0.57331	-0.15706	-1.0751
8	2.3357	-2.7351	0.70678	-2.0947
9	1.8934	-2.6201	0.30291	-2.0615
10	2.6221	0.90363	0.33656	-0.25492
11	3.5366	-2.6066	1.5033	-2.0172
12	-0.50646	-1.1508	-1.0882	-1.3078
13	-1.4862	-1.1449	-1.5033	-1.2746

4 0700			
-1.3798	2.3463	-1.4697	0.52092
-0.29241	0.42917	-1.0097	-0.4655
1.2419	3.8039	0.022437	1.3854
3.7924	0.53923	1.1892	-0.37683
2.1002	2.4565	0.30291	0.63175
3.8311	-0.60261	1.2004	-1.0308
2.4225	-0.85744	0.25803	-1.2635
2.8804	2.2381	0.88628	0.62067
1.5963	2.4208	-0.11219	0.56525
1.7278	1.7394	-0.14584	0.18842
2.4243	2.3531	0.59459	0.62067
2.575	0.23218	0.29169	-0.64283
3.2019	-0.78873	0.72922	-1.1527
1.6841	0	-0.16828	-0.75367
	-1.3798 -0.29241 1.2419 3.7924 2.1002 3.8311 2.4225 2.8804 1.5963 1.7278 2.4243 2.575 3.2019 1.6841	-1.37982.3463-0.292410.429171.24193.80393.79240.539232.10022.45653.8311-0.602612.4225-0.857442.88042.23811.59632.42081.72781.73942.42432.35312.5750.232183.2019-0.788731.68410	-1.3798 2.3463 -1.4697 -0.29241 0.42917 -1.0097 1.2419 3.8039 0.022437 3.7924 0.53923 1.1892 2.1002 2.4565 0.30291 3.8311 -0.60261 1.2004 2.4225 -0.85744 0.25803 2.8804 2.2381 0.88628 1.5963 2.4208 -0.11219 1.7278 1.7394 -0.14584 2.4243 2.3531 0.59459 2.575 0.23218 0.29169 3.2019 -0.78873 0.72922 1.6841 0 -0.16828

Ausgleichsrechnung:

Abbruch der Ausgleichsrechnung nach der 6. Iteration. Die L2-Norm des Verbesserungs-Vektors (Residuum) liegt bei: 0.00095445

relative Orientierung von Messkamera-Position 2 zu Projektor-Position 2:

äußere Orientierung: Translation in X-Richtung: Translation in Y-Richtung: Translation in Z-Richtung: omega-Drehung: phi-Drehung: kappa-Drehung:	1 0.24223 0.58391 0.12399 rad -0.55877 rad 0.015887 rad

absolute Orientierung:	
Position 2:	
Maßstab:	1.1228
äußere Orientierung.	
Translation in X-Richtung:	1.7711
Translation in Y-Richtung:	0.1996
Translation in Z-Richtung:	1.2406
omega-Drehung:	0.11376 rad
phi-Drehung:	-0.97786 rad
kappa-Drehung:	-0.039243 rad

Modellkoordinaten:

Modellkoordinaten für den Blockbündelausgleich:

OP-Nr.	X-Wert	Y-Wert	Z-Wert
1	0.205	0.045278	2.3694
2	0.052894	0.13325	2.2824
3	0.14441	0.033113	2.3042
4	0.10108	0.03759	2.2871
5	0.10752	0.20076	2.4282
6	0.03356	0.20611	2.3612
7	0.1487	-0.026336	2.2945
8	0.14222	-0.13971	2.3804
9	0.13389	-0.12996	2.3406
10	0.18488	0.044299	2.3367
11	0.1857	-0.14026	2.4427
12	0.04454	-0.046613	2.2537
13	-0.00027188	-0.042514	2.2345
14	0.12028	0.12873	2.3029
15	0.0015017	0.13057	2.2647
16	0.053216	0.031868	2.2701
17	0.099297	0.19883	2.3845
18	0.22223	0.022975	2.4038
19	0.14794	0.12498	2.3716
20	0.2249	-0.035829	2.3932
21	0.17672	-0.044941	2.3182
22	0.17059	0.11505	2.4226
23	0.13583	0.12351	2.3322
24	0.14765	0.088942	2.3152
25	0.1544	0.12005	2.4003
26	0.18457	0.010302	2.3261
27	0.20491	-0.041921	2.353
28	0.14662	0.0025557	2.2994

Ausgleichsrechnung:

Abbruch der Ausgleichsrechnung nach der 5. Iteration. Die L2-Norm des Verbesserungs-Vektors (Residuum) liegt bei: 0.00043613

Position 2:

äußere Orientierung:	
Translation in X-Richtung:	1.7629
Translation in Y-Richtung:	0.21146
Translation in Z-Richtung:	1.2223
omega-Drehung:	0.1271 rad
phi-Drehung:	-0.96683 rad
kappa-Drehung:	-0.017647 rad

21 mm
0 mm
0 mm
7.18 mm
5.32 mm