Pattern Recognition and Image Processing Group Institute of Automation Vienna University of Technology Treitlstr. 3/1832 A-1040 Vienna AUSTRIA Phone: +43 (1) 58801-8161 Fax: +43 (1) 5054668 E-mail: lis@prip.tuwien.ac.at

PRIP-TR-51

18. Juni 1998

Robuste und Adaptive 3D-Bildgewinnung mittels Laserlicht

Problemstellung der Diplomarbeit

Christian Liska

Abstract

Dieser Report spezifiziert die gestellte Problemstellung der Diplomarbeit. Es wird speziell die Anordnung der Hardware zur dreidimensionalen Oberflächenrekonstruktion mittels strukturiertem Licht, sowie die Kalibrierung dieser Hardware beschrieben. Weiters wird eine Einführung in Verfahren zur Planung und Berechnung der nächsten Kameraaufnahmeposition zum Objekt, sogenannte Next-View-Planning-Techniken, gegeben. Abschließend werden die geplanten Ziele der Diplomarbeit definiert und ein grober Zeitplan zur Realisierung dieser Diplomarbeit angegeben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	leitung	2
2	Auf	nahmeanordnung	5
	2.1	Geräte	5
	2.2	Geometrische Anordnung	5
	2.3	Kalibrierung	7
		2.3.1 Kalibrierung der Kamera	8
		2.3.2 Kalibrierung des Rotationstellers	9
		2.3.3 Kalibrierung der Laserlichtebene	11
	2.4	Aufzunehmende Objekte	12
3	Nex	t View Planning	13
	3.1	Grundlagen	13
	3.2	Next View Planning zur adaptiven Bildgewinnung	14
	3.3	Algorithmus zur adaptiven Bildgewinnung	15
4	Feh	lerabschätzung	17
	4.1	Kalibrierfehler	17
	4.2	Rekonstruktionsfehler	18
5	Ziel	setzung der Diplomarbeit	19
	5.1	Zieldefinition	19
	5.2	Teilziele	19
	5.3	Zeitplan	21

Kapitel 1 Einleitung

3D-Vision ist die Fähigkeit mit einem Computer-Vision-System die dreidimensionale Charakteristik eines Objektes zu erfassen. Das Anwendungsspektrum reicht dabei von der 3D-Modellierung der realen Welt (bspw. im Bereich der Virtual Reality) über Multimedia, Electronic Shopping bis hin zu Anwendungen in anderen Wissenschaftsbereichen (wie zum Beispiel in der Archäologie [SMD91]). Bei der dreidimensionalen Erfassung von Objekten wird folgende Einschränkung gemacht: Es wird lediglich die sichtbare Oberfläche eines Objektes rekonstruiert. Die Rekonstruktion basiert dabei auf der Analyse der zugrundeliegenden vorhandenen Informationen, wie z.B. ein Stereo-Bild-Paar, ein Tiefenbild (Rangebild), eine zeitlich abhängige Bildersequenz oder geometrische Merkmale, kombiniert mit Aufnahmen der Szene.

Techniken zur dreidimensionalen Erfassung von Objekten sollten sowohl robust, d.h. Fehler während des Bildaufnahmevorganges sollen das Ergebnis nur wenig beeinflussen [HS91], als auch effizient sein. Gängige Methoden der 3D-Erfassung sind:

- Shape from stereo: Dieses Verfahren versucht das visuelle System des Menschen nachzubilden, wobei zwei Kameras die Augen und der Computer das Gehirn simulieren. Die Tiefe eines 3D-Punktes wird dabei aus der Analyse der beiden Aufnahmen dieses Punktes berechnet. Ein Problem dieses Verfahrens ist die Suche nach zwei korrespondierenden Punkten in diesen Aufnahmen, was als *Korrespondenzproblem* bekannt ist [Shi87].
- Shape from shading: Die Beschattung von Oberflächen beeinflußt das Raumempfinden beim Menschen. Bei dieser Technik wird die dreidimensionale Oberflächenstruktur eines Objektes durch seine Schattierung gewonnen. Es wird zwischen dynamischem und statischem "shape from shading" unterschieden. Während beim statischen Verfahren eine Aufnahme mit einer festen Lichtquelle analysiert wird, werden beim dynamischen Verfahren Serien von Bildern mit unterschiedlichen Beleuchtungspositionen analysiert (*photometric stereo*). Eine kurze Darstellung zu "shape from shading" ist in [Shi87] zu finden. Eine praktische Einführung zu "photometric stereo" ist u.a. in [Dav97] zu finden.

- Shape from motion: Diese Technik ermittelt die dreidimensionale Form aus bewegten Objekten bzw. durch Bewegung der Kamera wird die Form eines Objektes ermittelt. Bewegte Oberflächenpunkte, die näher an der Kamera sind, ziehen schneller an der Kamera vorüber, als Punkte, die weiter entfernt sind. Aus der Analyse der Geschwindigkeiten dieser Oberflächenpunkte kann die Tiefeninformation der einzelnen Punkte ermittelt werden [ZF92].
- Shape from texture: Dieses Verfahren ermittelt die dreidimensionale Form einer homogen texturierten Oberfläche durch die Änderung der Dichte der Textur. Die Änderung der Dichte ist gleichzusetzen mit der geometrischen Verzerrung eines Musters, woraus die Tiefeninformation gewonnen werden kann [Dav97].
- Shape from contour (shape): Bei diesem Verfahren wird versucht, die dreidimensionale Form eines Objektes aus einer wohldefinierten Menge markierter Konturen der Objektoberfläche zu rekonstruieren [Zhe94].
- Shape from silhouette: Dieses Verfahren ist dem vorher erwähnten Verfahren sehr ähnlich. Die dreidimensionale Form eines Objektes wird dabei aus mehreren Bildern, welche die Silhouetten des Objektes darstellen, gewonnen [Gra92].
- Shape from structured light: Bei dieser Technik werden nacheinander unterschiedliche, wohl definierte Lichtmuster auf die Szene projiziert. Durch die in den Lichtmustern implizit gegebene Information und die aufgenommenen Bilder kann die dreidimensionale Oberfläche des Objektes rekonstruiert werden. Ein Spezialfall dieser Technik ist die *Lichtstreifenprojektion*. Dabei wird eine Lichtebene derart auf das Objekt projiziert, daß an der Schnittebene zwischen Objekt und Lichtebene eine Linie entsteht. Aufgrund der bekannten Parameter der Lichtebene und der Aufnahmegeometrie können für jeden Punkt der Schnittlinie die Objektkoordinaten mittels Triangulierung berechnet und damit das Objekt rekonstruiert werden [Joh93].

In dieser Arbeit findet der strukturierte Lichtansatz (*Shape from structured light*), speziell die Lichtstreifenprojektion, Anwendung. Die Auswahl dieses Verfahrens ist in der Einfachheit und Schnelligkeit, der hohen Genauigkeit der Laserlichtstreifenprojektion, sowie der Robustheit der Detektion der projizierten Lichtstreifen begründet [Joh93, YCZB98].

Diese Arbeit dient als Spezifikation der Diplomarbeit, soll einen Uberblick über die Problemstellung geben und somit Grundlage zur weiteren Arbeit am Thema sein. In Kapitel 2 wird die Aufnahmeanordnung beschrieben. Dabei werden die geometrischen Zusammenhänge der einzelnen Komponenten, sowie deren Kalibrierung gezeigt. Weiters werden die mit dieser Anordnung aufzunehmenden Objekte beschrieben. Zur Rekonstruktion einer kompletten sichtbaren Objektoberfläche eines beliebigen Objektes werden im allgemeinen mehrere Aufnahmen dieses Objektes aus unterschiedlichen Blickrichtungen und -winkeln benötigt. Zu diesem Zweck wird in Kapitel 3 die adaptive Bildgewinnung mittels Next-View-Planning-Techniken beschrieben. Kapitel 4 beschreibt die Arten der möglichen Fehler des Aufnahmesystems, sowie deren Abschätzung. Abschließend werden in Kapitel 5 die Ziele der Diplomarbeit vorgestellt, sowie eine Tabelle, mit den wichtigsten Meilensteinen und deren Termine angeführt.

Kapitel 2 Aufnahmeanordnung

In diesem Kapitel werden die verwendeten Geräte, sowie deren geometrische Anordnung beschrieben. Weiters werden die Verfahren zur automatischen Ermittlung dieser Aufnahmeanordnung beschrieben.

2.1 Geräte

Folgende Geräte werden verwendet:

- Rotationsteller: Mit diesem kann das zu erfassende Objekt im Aufnahmebereich rotiert werden, wodurch die gesamte sichtbare Oberfläche aufgenommen werden kann. Der Rotationsteller hat einen Durchmesser von 50 cm. Der Rotationswinkel kann variabel bis zu einer Genauigkeit von 0.1 Grad eingestellt werden.
- Laser: Die Szene wird durch zwei Laserdioden beleuchtet. Beide Laser sind mit einem Vorsatzprisma zur Aufspaltung des Lichtstrahles in eine Lichtebene ausgestattet. Beide Laser strahlen rotes Laserlicht aus.
- CCD-Kamera: Mit dieser wird der mittels Laser angestrahlte Teil der Oberfläche aufgenommen. Sie besitzt eine Auflösung von 768 x 572 Pixel und hat eine fokale Länge von 16 mm.
- Intel Pentium PC: Dieser läuft unter dem Betriebssystem Linux und besitzt eine Taktfrequenz von 75 MHz.

2.2 Geometrische Anordnung

Abbildung 2.1 zeigt die Anordnung der verwendeten Geräte. Der eine Laser ist oberhalb des Rotationszentrums, der andere Laser seitlich des Rotationstellers in Richtung des Rotationszentrums montiert. Beide Lichtquellen sind so montiert, daß die aufgespaltenen



Abbildung 2.1: Aufnahmesystem

Lichtebenen ineinander übergehen und somit eine einzige Lichtebene aufspannen. Die angegebene Anordnung der beiden Laser ist durch die bei der dreidimensionalen Oberflächenrekonstruktion auftretenden Probleme der Verdeckungen bzw. Abschattungen begründet. Es können folgende Arten von Verdeckungen auftreten:

- Ein Lichtstrahl kann nicht die gesamte Oberfläche erreichen. Diese Art von Verdeckung wird *Lichtverdeckung* genannt.
- Teile einer Oberfläche sind für die Kamera unsichtbar und können somit nicht aufgenommen werden. Sinngemäß werden diese Verdeckungen Kameraverdeckungen genannt.



Abbildung 2.2: Licht- und Kameraverdeckungen

Abstand	Laser 2 / Objektebene	ca. 45 cm
Abstand	Laser 1 / Rotationszentrum	ca. 48 cm
Abstand	Kamera / Rotationszentrum	ca. 40 cm
Winkel	Kamera / Rotationszentrum	ca. 45 Grad
Winkel	Kamera / Laserlichtebene	ca. 45 Grad

Tabelle 2.1: Abmessungen der Aufnahmeanordnung

Abbildung 2.2 stellt die beiden Verdeckungsarten graphisch dar. Durch die Verwendung von zwei Lasern und der angegebenen Montierung können die durch Abschattung produzierten Lichtverdeckungen reduziert werden (siehe Abbildung 2.3). Der Einsatz eines Rotationstellers reduziert die Kameraverdeckungen, da das Objekt dadurch auch aus anderen Blickrichtungen aufgenommen werden kann. Die Beziehungen der verwendeten Geräte un-



Abbildung 2.3: Reduktion von Lichtverdeckungen

tereinander ist in Tabelle 2.1 angeführt. Die angegebenen Distanzen und Winkel werden im Rahmen der Diplomarbeit noch verifiziert und entsprechend angepaßt.

2.3 Kalibrierung

In diesem Kapitel wird die Kalibrierung des Systems, also die rechnergestützte Ermittlung der Aufnahmegeometrie, beschrieben. Erst durch Kenntnis der Aufnahmegeometrie und damit der Orientierung der einzelnen Komponenten im Raum ist die Rekonstruktion der dreidimensionalen Form der Objektoberfläche aus dem zweidimensionalen Abbild möglich. Zur Kalibrierung des vorgestellten Aufnahmesystems sind drei Schritte notwendig:

- 1. Kalibrierung der Kamera
- 2. Kalibrierung des Rotationstellers
- 3. Kalibrierung der Laserlichtebene

In weiterer Folge werden diese Schritte detailliert beschrieben.

2.3.1 Kalibrierung der Kamera

Bei der Kamerakalibrierung wird die Orientierung der Kamera ermittelt. Die Orientierung einer Kamera ist durch ihre *äußere* und *innere Orientierung* beschrieben. Die äußere Orientierung wird durch drei Rotationswinkel (Kippung, Neigung, Kantung) und drei Translationsparameter $T = (T_x, T_y, T_z)^T$ beschrieben. Durch diese Parameter wird eine Beziehung zwischen dem Objektkoordinatensystem und dem kamerazentrierten Koordinatensystem hergestellt. Die Bildung der Rotationsmatrix R mittels der drei Rotationswinkel kann bspw. in [KKS96] nachgelesen werden. Die Transformation eines Punktes P_w des Objektkoordinatensystems in das Kamerakoordinatensystem erfolgt durch

$$P_k = R \cdot P_w + T. \tag{2.1}$$

Die innere Orientierung wird durch folgende Größen beschrieben: $\kappa_1, \kappa_2, f_k, s_x$ und C_f . κ_1 und κ_2 beschreiben die tangentiale und radiale Bildverzerrung, durch f_k wird die fokale Länge der Kamera, das ist der Normalabstand zwischen Linsenzentrum und Bildebene, s_x beschreibt einen Unsicherheitsfakter, der durch die nicht exakte Synchronisation zwischen Bilddigitalisierungseinheit und der Kamerahardware begründet ist. Mit C_f wird der Bildhauptpunkt bezeichnet [KKS96]. Abbildung 2.4 zeigt die Beziehungen zwischen den drei Koordinatensystemen Bild-, Kamera- und Objektkoordinatensystem.

Die Kalibrierung der Kamera erfolgt durch Analyse und Auswertung von aufgenommenen Eichkörpern bzw. Kalibriermustern ab. Die realen Abmessungen der Körper bzw. Kalibriermuster müssen bekannt sein. Abbildung 2.5 zeigt die Kamerasicht eines 5x5 Kalibriermusters. Auf einer Platte wurden 25 Quadrate mit einer Seitenlänge von jeweils 20 mm angebracht. Der Abstand zwischen den jeweiligen Zentren der Quadrate beträgt 30 mm. Aufgrund der Verzerrung der Quadrate im aufgenommenen Bild kann auf die Orientierung der Kamera zur Kalibrierebene geschlossen werden. Die so erhaltene Orientierung entspricht bis auf einen Skalierungsfaktor der äußeren Orientierung der Kamera. Die Ermittlung der Parameter der inneren Orientierung läuft etwas komplexer ab. Um die gewünschten Parameter zu erhalten, werden die Kalibriermuster in mehreren unterschiedlichen Ebenen aufgenommen und analysiert. Die dabei angewandten Verfahren gehen dabei von einer Näherungslösung aus, welche in jedem Iterationsschritt des Algorithmus verfeinert wird.

Ein iteratives Verfahren zur Kalibrierung einer Kamera ist die Kalibrierung mittels direkter



Abbildung 2.4: Beziehungen zwischen Objekt-, Kamera- und Bildkoordinaten

linearer Transformation (DLT), welches unter anderem in [PU93] beschrieben ist. Es liefert die Parameter der äußeren Orientierung, sowie alle Parameter der inneren Orientierung, außer jene der Linsenverzerrung. Ein Verfahren, welches zusätzlich auch die Parameter der Linsenverzerrung liefert, ist das von Roger Y. Tsai in [Tsa86] vorgestellte Verfahren. Für beide Verfahren existieren bereits fertige Implementierungen, weshalb sie im Rahmen der Diplomarbeit Anwendnung finden werden.

2.3.2 Kalibrierung des Rotationstellers

Die Kalibrierung des Rotationstellers erfolgt in zwei Schritten, nämlich

- 1. die Kalibrierung der Rotationsebene, und
- 2. die Kalibrierung des Rotationszentrums.

Die Orientierung der Rotationsebene wird durch die Gleichung einer Ebene beschrieben. Es wird eine Zuordnung gesucht, die eine Abbildung der einzelnen Punkte der Rotationsebene in Punkte des Kamerakoordinatensystems erlaubt. Zu beachten ist, daß die Rotationsebene für die Kalibrierung als statisch angenommen wird, das heißt, die Ebene rotiert während des Kalibriervorganges nicht.

Der Kalibriervorgang der Rotationsebene ist identisch mit der Vorgangsweise zur Bestimmung der äußeren Orientierung der Kamera. Dazu wird wiederum ein Kalibriermuster auf



Abbildung 2.5: Kamerasicht eines 5x5 Kalibriermusters

die Ebene, in diesem Fall die Rotationsebene, aufgebracht. Aus der Beziehung zwischen den bekannten realen Abmessungen und den beobachteten Abmessungen und Verzerrungen dieser Muster werden die drei Rotationswinkel und der Translationsvektor bestimmt. Fällt die Rotationsebene mit der Objektebene zusammen, das heißt, daß das Rotationsebenenkoordinatensystem identisch mit dem Objektkoordinatensystem ist, so erfolgt die Kalibrierung der Rotationsebene durch Kalibrierung der äußeren Orientierung der Kamera.

Das Rotationszentrum kann durch Analyse der Rotationsbewegung (*Bewegungsfeldanalyse*) oder durch Analyse eines Kalibriermusters gefunden werden. Für die Bewegungsfeldanalyse wird ein leicht detektierbares Objekt (Kreis, Linie, etc.) auf die Rotationsebene außerhalb des Rotationszentrums angebracht. Die Ebene wird mit konstanter Geschwindigkeit rotiert und in diskreten Zeitabständen aufgenommen. Das Objekt beschreibt, bedingt durch die Rotationsbewegung, einen Kreis bzw. eine Ellipse in der aufgenommenen Bildsequenz. Das Zentrum dieses Kreises bzw. dieser Ellipse entspricht dem Rotationszentrum der Rotationsebene. Eine Beschreibung zur Bewegungsfeldanalyse ist beispielsweise in [KKS96] zu finden.

Bei Verwendung eines Kalibriermusters muß darauf geachtet werden, daß aus den erhaltenen Beziehungen das Rotationszentrum eindeutig bestimmbar ist. Der Rotationsteller, der im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet, besitzt ein solches Kalibriermuster. Auf der Rotationsebene sind präzise Ausstanzungen vorhanden, deren Abmessungen bekannt sind. Diese Ausstanzungen sind kreisförmig und so angebracht, daß eindeutige Rückschlüsse auf das Rotationszentrum möglich sind. Abbildung 2.6 zeigt diese Ausstanzungen und ihre Abmessungen. Das Rotationszentrum kann hierbei auf zweierlei Arten bestimmt werden:

- 1. Bestimmung des Zentrums der mittleren Ausstanzung, oder
- 2. Bestimmung des Zentrums durch diagonale Verbindung der äußeren vier Zentren der



Abbildung 2.6: Rotationsteller

Ausstanzung

Verfahren zur Detektion von Ellipsen sind unter anderem die Detektion durch Houghtransformation (beispielsweise in [IK88]) und durch generische Methoden [SL95].

2.3.3 Kalibrierung der Laserlichtebene

Bei diesem Schritt der Kalibrierung wird eine Beziehung zwischen dem Kamerakoordinatensystem und der Laserlichtebene hergestellt. Die Bestimmung der Ebenenparameter erfolgt in zwei Schritten:

- 1. Die beiden Laser projizieren eine Ebene. Die Schnittgerade zwischen der Rotationsebene und der projizierten Laserebene wird detektiert und deren Parameter ermittelt.
- 2. In die projizierte Laserebene wird ein Objekt positioniert. Um die Laserlichtebene beschreiben zu können wird ein Punkt des auf dem Objekt reflektierten Laserlichtes detektiert. Abbildung 2.7 gibt eine schematische Darstellung eines Objektes in der Laserlichtebene und dessen Kamerasicht.

Eine Ebene ist durch eine Gerade G und einem Punkt P, wobei G nicht durch P verlaufen darf, eindeutig beschrieben. Jeder Punkt der Laserebene ist so durch einen Punkt des Objektkoordinatensystems beschrieben. Die Beziehung des Objektkoordinatensystems zum Kamerakoordinatensystem wurde bereits in den Abschnitten zur Kamera- beziehungsweise Rotationsebenenkalibrierung beschrieben.



Abbildung 2.7: Objekt in Laserlichtebene positioniert

2.4 Aufzunehmende Objekte

Das System soll flexibel hinsichtlich der Arten aufzunehmender Objekte sein. Die minimalen und maximalen Abmessungen der aufzunehmenden Objekte sind unter anderem vom Sichtfeld und damit von der Positionierung und der verwendeten Optik der Kamera, der Tiefenschärfe und dem geometrischen Auflösungsvermögen der verwendeten Kamera abhängig. Neben diesen, physikalisch bedingten, Einschränkungen werden folgende Objekte aufzunehmen sein:

- *kalibrierte Objekte:* Hierbei handelt es sich um Objekte, deren Abmessungen bekannt sind. Sie dienen hauptsächlich dazu, die Genauigkeit des Systems abschätzen zu können und die Robustheit des Systems experimentell nachzuweisen.
- *synthetisierte Objekte:* Diese stellen keine realen Objekte dar. An diesen Objekten werden die Berechnungsmodelle zur Rekonstruktion getestet und der Aufnahmevorgang simuliert.
- archäologische Objekte: Dies sind archäologische Fundstücke. Von diesen soll die Oberfläche im Rechner rekonstruiert werden. Es handelt sich vorwiegend um Tonscherben.

Durch die Verwendung von rotem Laserlicht können nur jene Objekte aufgenommen werden, deren Färbung das rote Laserlicht ausreichend reflektiert und damit die Schnittlinie zwischen Laserlichtebene und Objekt detektierbar macht. So sind Objekte mit grüner Oberflächenfärbung mit diesem System nicht erfaßbar.

Kapitel 3 Next View Planning

Die zur Rekonstruktion beliebiger Objektoberflächen benötigte genaue Anzahl notwendiger Aufnahmen des Objektes, sowie die jeweilige optimale Orientierung der Kamera zum Objekt, ist für beliebige Objekte nicht bekannt [MB93]. Es werden daher Techniken benötigt, welche die nächste beste Aufnahmesicht (*next best view - NBV*) und damit die nächste Positionierung des Sensors, aufgrund von Messungen der bisher getätigten Aufnahmen der Oberfläche, ermitteln. Diese Techniken sind unter dem Begriff *Next-View-Planning* zusammengefaßt.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zu Next-View-Planning vermittelt. Weiters wird auf die Problematik des zur Objektbewegung verwendeten Rotationstellers in Bezug zur Oberflächenauflösung eingegangen, womit eine Next-View-Planning-Technik motiviert und vorgestellt wird. Abschließend wird ein Algorithmus zur adaptiven Bildgewinnung formuliert.

Das Problem der Bestimmung der nächsten besten Aufnahmesicht wird in weiterer Folge kurz NBV-Problem genannt.

3.1 Grundlagen

Die optimale Anzahl von Aufnahmen und deren Aufnahmenorientierung ist abhängig von der

• *Oberflächenstruktur:* Je nach Beschaffenheit einer Objektoberfläche sind in einer einzelnen Aufnahme eines Objektes mehr oder weniger Teile der Oberfläche verdeckt. Die Arten von Verdeckungen wurden bereits im Kapitel 2-Aufnahmegeometrie veranschaulicht. Um eine komplette Erfassung der sichtbaren Objektoberfläche zu ermöglichen sind somit mehrere Aufnahmen des Objektes aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen notwendig.

- Geometrie der Kamera: Auch die verwendete Kamera hat Einfluß auf die Anzahl benötigter Aufnahmen. Das Auflösungsvermögen, der Fokus, sowie das Sichtfeld der Kamera beeinflussen diese Anzahl. Ist beispielsweise das Sichtfeld der Kamera klein, so wird eine größere Anzahl von Aufnahmen notwendig sein, als bei großem Sichtfeld.
- Anzahl der Freiheitsgrade der Aufnahmeanordnung: Der Freiheitsgrad einer Aufnahmeanordnung ist durch die zur Verfügung stehenden Bewegungsarten des Objektes bzw. der Kamera bestimmt. Ein System, welches eine Rotation um die drei Hauptachsen, sowie eine lineare Bewegung entlang dieser drei Hauptachsen erlaubt, besitzt sechs Freiheitsgrade (drei Rotationswinkel plus drei lineare Bewegungsrichtungen). Ein System, welches nur eine Rotation um die z-Achse zuläßt hat demnach nur einen Freiheitsgrad.
- Aufnahmetechnik: Die eingesetzte Technik zur 3D-Erfassung beeinflußt ebenfalls die Anzahl der notwendigen Aufnahmen zur Oberflächenrekonstruktion. Bei der Lichtstreifenprojektion wird die Oberfläche durch Projektion von Lichtstreifen abgetastet, wodurch eine höhere Anzahl von Aufnahmen gemacht werden muß, als beispielsweise bei "Shape from stereo", wo mit einer Aufnahme größere Teile der Oberfläche erfaßt werden können.

Der Begriff der nächsten besten Aufnahmesicht kann zweierlei Bedeutungen haben:

- 1. Es soll eine minimale Anzahl von Aufnahmepositionen erreicht werden.
- 2. Es sollen jene Aufnahmepositionen und -richtungen berechnet werden, mit denen die Oberfläche am *besten* rekonstruiert werden kann.

Je nach gewähltem Lösungsansatz des NBV-Problemes wird mindestens eine der beiden Charakterisierungen zutreffend sein. Die Berechnung des NBV liefert einen Bewegungsvektor, dessen Dimension der Anzahl der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade entspricht.

3.2 Next View Planning zur adaptiven Bildgewinnung

Die eingesetzte Aufnahmeanordnung, bestehend aus einem Rotationsteller, zwei Laserdioden und einer CCD-Kamera, besitzt folgende Eigenschaften:

- Der Rotationsteller erlaubt eine Rotation des Objektes um die z-Achse, das heißt eine Bewegung mit 1 Freiheitsgrad.
- Die CCD-Kamera und die beiden Laserdioden sind fix montiert.
- Als Aufnahmetechnik wird "Shape from structured light", speziell die Lichtstreifenprojektion verwendet.

Die Verwendung eines Rotationstellers in Verbindung mit der Lichtstreifenprojektion führt zu einer unterschiedlichen Auflösung der akquirierten Oberflächenpunkte hinsichtlich ihres Abstandes zur Rotationsachse, wodurch Oberflächenmerkmale, wie zum Beispiel Ecken, verloren gehen können. Abbildung 3.1 gibt ein Beispiel eines Verlustes von Information im zweidimensionalen Fall. Hierbei geht durch Verwendung eines konstanten Winkels von 10 Grad eine Ecke des abgebildeten Quadrates verloren. Durch Verwendung variabler



Abbildung 3.1: Informationsverlust durch äquiangulare Winkel

Winkel kann dieser Informationsverlust vermieden werden. Zu diesem Zweck wird eine Distanzfunktion d(x), welche die mittlere Distanz der akquirierten Oberflächenpunkte zur Rotationsachse zurückliefert, definiert. Gesucht ist eine Funktion, welche eine Beziehung zwischen der ersten Ableitung von d(x), also d'(x), und einem Rotationswinkel α herstellt. Allgemein, gesucht ist eine Funktion F mit

$$F(d'(x)) = \alpha. \tag{3.1}$$

Eine solche Funktion ist im Rahmen der Diplomarbeit zu finden und zu evaluieren.

3.3 Algorithmus zur adaptiven Bildgewinnung

Ein iteratives Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion mittels Next View Planing ist durch den in Abbildung 3.2 dargestellten und nachfolgend beschriebenen Algorithmus definiert [SGR96]:

1. *Image Acquisition:* Szene mittels Kamera aufnehmen. Das Ergebnis dieses Schrittes ist ein Grauwertbild in dem die Schnittlinie zwischen Laserlichtebene und Objekt sichtbar ist.



Abbildung 3.2: Iteratives Verfahren zur 3D-Rekonstruktion

- 2. Feature Extraction: Merkmale aus dem Kamerabild extrahieren. Es werden jene Punkte des Kamerabildes extrahiert, welche die Schnittlinie zwischen Laserlichtebene und Objektoberfläche darstellen. Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine Menge zweidimensionaler Punkte.
- 3. *Registration:* Die in Schritt 2 erhaltenen Punkte werden in das Objektkoordinatensystem rücktransformiert. Das Ergebnis dieses Schrittes sind die dreidimensionalen Koordinaten der einzelnen das Laserlicht reflektierenden Oberflächenpunkte im Objektkoordinatensystem.
- 4. Integration: Integration der registrierten Daten zu den bereits in den vorigen Iterationsschritten berechneten Oberflächenpunkte. Ergebnis ist eine Menge von Oberflächenpunkten, erweitert um jene Punkte, die in diesem Iterationsschritt berechnet wurden.
- 5. Next View Planning: Berechnung des NBV mittels der Funktion 3.1. Ergebnis ist ein Winkel, mit dem der Rotationsteller weiterbewegt wird. Überschreitet die Summe aller in den bisherigen ermittelten Rotationswinkel 360 Grad, so ist die sichtbare Objektoberfläche rekonstruiert und kann mit Schritt 6 visualisiert werden. Ist diese Summe kleiner als 360 Grad, so erfolgt eine neue Iteration (Schritt 1).
- 6. 3D-Modell: Darstellung und Visualisierung der rekonstruierten Objektoberfläche.

Kapitel 4 Fehlerabschätzung

In diesem Kapitel werden die Arten der Fehler, die in dem vorgestellten Aufnahmesystem auftreten können, beschrieben, sowie eine Vorgangsweise zu deren Abschätzung beziehungsweise deren Vermeidung angegeben. Die Fehler dieses Systems können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- 1. Kalibrierfehler K_e
- 2. Rekonstruktionsfehler R_e

Jede der beiden Kategorien kann für sich alleine stehen, jedoch treten Rekonstruktionsfehler auch als unmittelbare Folge von Kalibrierfehlern auf. Das heißt, eine fehlerhafte Kalibrierung führt zu fehlerhaften Rekonstruktionsergebnissen. Der umgekehrte Schluß ist jedoch nicht zulässig. Ist das Rekonstruktionsergebnis fehlerhaft, so heißt dies im allgemeinen nicht, daß die Kalibrierung fehlerhaft durchgeführt wurde, formal, $K_e \Rightarrow R_e$ aber $R_e \Rightarrow K_e$.

4.1 Kalibrierfehler

Die Genauigkeit der Kalibrierung ist abhängig von der:

- Genauigkeit der Kalibriereinrichtung
- Genauigkeit der Detektion der aufgebrachten Merkmale des Kalibriermusters

Die Genauigkeit der Kalibriereinrichtung kann nicht mit hundertprozentiger Sicherheit angegeben werden. Die Abmessungen der aufgebrachten Kalibriermuster (Passpunkte) werden immer mit einem Messfehler behaftet sein. Bedingt durch das Auflösungsvermögen der zu kalibrierenden Kamera, sind jedoch Messfehler ab einer gewissen unteren Schranke vernachlässigbar. Ebenso ist die Detektionsgenauigkeit der aufgebrachten Merkmale vom Auflösungsvermögen der Kamera nach unten hin beschränkt. Die Detektion kann auch durch andere Faktoren negativ beeinflußt werden. Solche negativen Faktoren sind beispielsweise falsche bzw. ungenügende Beleuchtungsverhältnisse.

4.2 Rekonstruktionsfehler

Die Genauigkeit der rekonstruierten Objektoberfläche ist abhängig von der:

- 1. Genauigkeit der Kalibrierung
- 2. Detektionsgenauigkeit der projizierten Laserlinie
- 3. Winkelschrittweite des Rotationstellers
- 4. Numerische Stabilität des Berechnungsalgorithmus

Die Genauigkeit der Kalibrierung wurde im letzten Abschnitt bereits beschrieben. Während der Kalibrierfehler hauptsächlich durch physikalische Eigenschaften bestimmt ist, ist die Detektionsgenauigkeit der projizierten Laserlinie algorithmisch bestimmt. Die gewählte Winkelschrittweite (berechnet durch NVP) beeinflußt die Genauigkeit der rekonstruierten Objektoberfläche. In weiterer Folge wird der Rekonstruktionsfehler genauer analysiert.

Sei S_i eine ideale und S_r eine fehlerbehaftete Oberflächenrekonstruktion. Sei E(x, y) jenes Fehlermaß, durch welches der Unterschied zwischen der idealen und der fehlerbehafteten Rekonstruktion ausgedrückt werden kann, formal $E(S_i, S_r) = diff(S_i, S_r)$ ist also der Abstand von S_r zu S_i . Das Ziel eines Rekonstruktionsalgorithmus ist es, den Rekonstruktionsfehler E zu minimieren. Die Minimierung bei einem statischen, nicht adaptiven System erfolgt dabei durch Auswahl des kleinsten möglichen Winkels R_m , der durch die technische Spezifikation des Rotationstellers möglich wird. Die Anzahl der Aquisitionsschritte beträgt dabei 360/ R_m , das heißt die Anzahl wird maximiert. Der Rekonstruktionsfehlerminimierung sind also physikalische Grenzen gesetzt. Diese sind einerseits durch den Rotationswinkel und andererseits durch die Objektausdehnung gegeben.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird kein statisches, sondern ein adaptives System implementiert, welches dadurch charakterisiert ist, daß ein Mittelweg zwischen minimalem Rekonstruktionsfehler und maximaler Abtastung des Objektes gewählt wird. Der vorgestellte Algorithmus beschreitet diesen Weg, wobei Änderungen in der Oberflächenstruktur und in der Wahl des nächsten Rotationswinkels berücksichtigt werden und diese Regionen mit einer höheren Auflösung abgetastet werden, als Regionen mit geringerer Änderung der Oberflächenstruktur.

Eine wichtige Fehlerquelle liegt in der numerischen Stabilität des gewählten Berechnungsvorganges zur Rücktransformation der 2D-Kamerakoordinaten eines Oberflächenpunktes in seine 3D-Objektkoordinaten. Im wesentlichen handelt es sich bei dieser Koordinatentransformation um Matrizenoperationen, deren Stabilität unter anderem in [PTVF94] untersucht sind.

Kapitel 5 Zielsetzung der Diplomarbeit

In diesem Kapitel werden die Ziele der Diplomarbeit zusammengefaßt, sowie die wichtigsten Meilensteine und Termine definiert. Die Diplomarbeit ist in einen praktischen und einen theoretischen Teil aufgeteilt. Der Praxisteil besteht im wesentlichen in der Umsetzung der theoretischen Konzepte.

5.1 Zieldefinition

Ziel der Diplomarbeit ist die Schaffung eines robusten und adaptiven Oberflächenerfassungssystems. Dabei soll die **sichtbare** Oberfläche eines Objektes erfaßt werden können. Die Visualisierung der erfaßten Oberfläche ist **nicht** Inhalt dieser Diplomarbeit. Ziel ist vielmehr, die wissenschaftliche Ausarbeitung einer Next-View-Planning-Technik zur Abtastung und Rekonstruktion einer Objektoberfläche.

5.2 Teilziele

Aufgrund der Spezifikation der Diplomarbeit ergeben sich folgende Punkte die praktisch und theoretisch bearbeitet werden müssen:

- Aufbau der benötigten Geräte: Hierbei muß darauf Rücksicht genommen werden, daß der Versuchsaufbau, sich in den bereits bestehenden Aufbau der 3D-Station integriert und speziell eine Fortführung der anderen Arbeiten (bspw. Lichtprojektor) möglich bleibt. Die genaue Anordung der eingesetzten Geräte muß experimentell ermittelt und rechnerisch geprüft werden. Folgende Geräte werden für den Versuchsaufbau benötigt:
 - 1 CCD-Kamera: schwarz/weiss, 768 x 572 pixel Auflösung, 16 mm Optik
 - 1 Rotationsteller: Bewegung um z-Achse
 - 2 Rotlichtlaserdioden: Aufspaltung des Laserstrahles zu einer Ebene durch Vorsatzlinse

- 1 Framegrabber
- 1 Pentium-PC mit Betriebssystem Linux
- 2. Kalibrierung des Systems
 - Kalibrierung der Kamera: Dabei wird auf die bereits bestehenden Algorithmen zurückgegriffen und deren Funktionalität geprüft und bewertet.
 - Kalibrierung der Rotationsebene des Rotationstellers: Im Rahmen der Diplomarbeit wird angenommen, daß die Rotationsebene mit der Objektebene identisch ist und deren Parameter durch Kalibrierung der Kamera ermittelt werden.
 - Kalibrierung des Rotationszentrums des Rotationstellers: Spezifikation, Implementierung und Bewertung eines Verfahrens zur Detektion des Rotationszentrums. Hierzu wird die spezifizierte Bohrmaske des Rotationstellers herangezogen.
 - Kalibrierung der Laserebene: Spezifikation, Implementierung und Bewertung eines Verfahrens zur Laserebenenkalibrierung.
- 3. Akquisition von Objektoberflächen
 - Detektion der projizierten Laserlinie: Spezifikation, Implementierung und Bewertung eines Verfahrens zur Laserliniendetektion.
 - Rücktransformation der detektierten Oberflächenpunkte in das Objektkoordinatensystem: Spezifikation, Implementierung und Bewertung eines Verfahrens zur Rücktransformation
 - Next View Planning: Spezifikation, Implementierung und Bewertung einer NVP-Technik zur Oberflächenrekonstruktion.
 - Integration von rücktransformierten Oberflächenpunkten zu bereits bestehenden in vorhergehenden Akquisitionsschritten integrierten Oberflächenpunkte zur Rekonstruktion der gesamten Oberfläche.
 - Aufbereitung der rekonstruierten Oberfläche in ein Dateiformat zur Visualisierung.

Als Plattformen der programmtechnischen Umsetzung (Implementierung) dienen die Programmpakete Matlab und Khoros.

5.3 Zeitplan

In diesem Abschnitt wird ein grober Zeitplan zur Realisierung der Diplomarbeit gegeben. Dieser dient als Richtlinie zur Kontrolle des Fortschrittes der Arbeit. Ziel ist die Beendigung der Diplomarbeit mit 30. September 1998.

- April:
 - Kalibrierung: Überblick und Recherche
 - Next View Planning: Überblick und Recherche
- Mai:
 - Kalibrierung Rotationszentrum: Realisierung
 - Laserebenenkalibrierung: Recherche und Realisierung
 - Dokumentation der Recherche
 - Test der realisierten Module
- Juni:
 - Next View Planning: Evaluierung und Spezifikation
- Juli:
 - Next View Planning: Realisierung
 - Test des realisierten Moduls
- August:
 - Experimente
 - Verbesserungen
 - Dokumentation
- September:
 - Dokumentation
 - Präsentation des Systems
 - Präsentation der Diplomarbeit

Literaturverzeichnis

- [Dav97] E. R. Davis. Machine Vision Theory, Algorithms, and Practicalities. Academic Press, 1997.
- [Gra92] Aldo A. Grattarola. Volumetric reconstruction from object silhouettes: A regularization procedure. *Signal Processing*, 27:27–35, 1992.
- [HS91] Robert M. Haralick and Linda G. Shapiro. Glossary of computer vision terms. Pattern Recognition, 24(1):69–93, 1991.
- [IK88] J. Illingworth and J. Kittler. A Survey of the Hough Transform. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 44:87–116, 1988.
- [Joh93] Mattias Johannesson. Sheet-of-light Range Imaging. Master's thesis, Linköping University, Department of Electrical Engineering, S-581 83 Linköping, November 1993.
- [KKS96] Reinhard Klette, Andreas Koschan, and Karsten Schlüns. Computer Vision -Räumliche Information aus digitalen Bildern. Vieweg, 1996.
- [MB93] Jasna Maver and Ruzena Bajcsy. Occlusions as a Guide for Planning the Next View. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15(5):417-432, May 1993.
- [PTVF94] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 1994.
- [PU93] Wolfgang Pölzleitner and Michael Ulm. Robust Camera Calibration for Spacecraft Motion Estimation. In Image Analysis and Synthesis, Schriftenreihe der österreichischen Computergesellschaft, Bd. 68, pages 115–136, 1993.
- [SGR96] Vitor Sequeira, João G. M. Gonçalves, and M. Isabel Ribeiro. Active View Selection for Efficient 3D Scene Reconstruction. In Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition - Track A, pages 815–819, 1996.
- [Shi87] Yoshiaki Shirai. Three-Dimensional Computer Vision. Springer-Verlag, 1987.

- [SL95] Markus Stricker and Ales Leonardis. From edgels to parametric curves. In Proceedings of the 9th Scandinavian Conference on Image Analysis, pages 749– 758, Uppsala, Sweden, June 1995.
- [SMD91] R. Sablatnig, C. Menard, and P. Dintsis. A preliminary study on methods for a pictorial acquisition of archaeological finds. Technical Report PRIP-TR-10, University of Technology, Dept. for Pattern Recognition and Image Processing, Institute for Automation, 1991.
- [Tsa86] Roger Y. Tsai. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 364–374, Miami Beach, FL, 1986.
- [YCZB98] Daoshan Yang, Jihong Chen, Huichen Zhou, and Shawn Buckley. New algorithm to calculate the center of laser reflections. In Ning Chang Ravishankar Rao, editor, Machine Vision Applications in Industrial Inspection VI, pages 54–58. Proceedings of SPIE Vol. 3306, 1998.
- [ZF92] Z. Zhang and O. Faugeras. 3D Dynamic Scene Analysis. Springer-Verlag, 1992.
- [Zhe94] J.Y. Zheng. Acquiring 3-D Models from Sequences of Contours. *IEEE-PAMI*, 16(2):163–178, February 1994.