Technical Report

Pattern Recognition and Image Processing Group
Institute of Computer Aided Automation
Vienna University of Technology
Treitlstr. 3/1832
A-1040 Vienna AUSTRIA
Phone: +43 (1) 58801-18351
Fax: +43 (1) 5054668
E-mail: lis@prip.tuwien.ac.at
URL: http://www.prip.tuwien.ac.at/

PRIP-TR-54 13. April 1999

Das adaptive Lichtschnittverfahren zur Oberflächenrekonstruktion mittels Laserlicht

Christian Liska

Abstract

This thesis describes a system, which allows a dynamic acquisition of the viewable surface of an object. Starting from the mathematic and geometric modeling of the acquisition process, an acquisition system is developed and the calibration process of the equipment used, consisting a turntable, a CCD camera and two laserdiodes, is described. After this, the surface reconstruction and the determination of the real 3d object coordinates out of their 2d projection in the camera plane is derived. Based on this fundamentals, a Next View Planning Technique is motivated and an adaptive algorithm is specified. The thesis concludes with expermimental results and an outlook on future work.

Diese Arbeit wurde vom FWF unter den Projektnummern P9110-SPR und S7002 gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

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 (Rangeimage), 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 [HS89], 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 ermit-

telt. 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.

- *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].

Systeme zur 3D-Erfassung der sichtbaren Objektoberfläche können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

1. statische Systeme, bei denen die Objektoberfläche gleichförmig, das heißt jede Region der Objektoberfläche wird unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit abgetastet, sowie

2. dynamische Systeme, bei denen die Abtastung der Objektoberfläche abhängig von der Strukturierung dieser Oberfläche erfolgt.

Der wesentliche Nachteil statischer Systeme gegenüber dynamischer Systeme liegt darin, daß die Struktur der Objektoberfläche bei der Wahl der Aufnahmepositionen unberücksichtigt bleibt, was zu einem Verlust von Oberflächendetails führt. Ein dynamisches System paßt die Auswahl der Aufnahmepositionen der Struktur der Objektoberfläche an, wodurch der Akquirierungsfehler verringert wird. Die Anzahl der Aufnahmeschritte ist

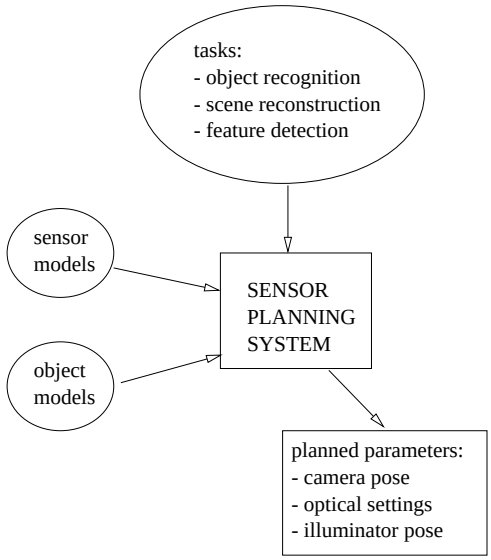


Abbildung 1.1: NVP für Computer Vision Systeme (aus [TAT95])

bei statischen Systemen aufgrund der äquidistanten bzw. äquiangularen Abtastung höher als bei dynamischen Systemen, wodurch die Berechnungskomplexität der Oberflächenrekonstruktion bei statischen Systemen steigt.

In dieser Diplomarbeit wird ein System entwickelt, welches eine aktive, der Oberflächenstruktur angepaßte, Erfassung des Objektes erlaubt. Ein solches System wird in der Literatur als Sensor-Planning bzw. Next-View-Planning-System bezeichnet. Abbildung 1.1 zeigt die Komponenten eines solchen Systems.

Der Aufbau und die Komplexität eines Sensor-Planning-Systemes ist abhängig von

- dem zugrundeliegenden Kameramodell (*Sensor models*),
- den aufzunehmenden Objekten (*Object models*), sowie
- den Anwendungen und Aufgaben, die mit diesem System erfüllt bzw. gelöst werden sollen (*tasks*).

Je nach gestellter Aufgabe, die durch dieses System gelöst werden soll, liefert dieses die Kamerapositionen (Position und Richtung der Kamera zum Objekt), die notwendigen optischen Parameter (fokale Länge, Blende, Belichtungszeit) und die ideale Beleuchtungspostion für einen Aufnahmeschritt als Ergebnis.

In dieser Diplomarbeit wird ein System entwickelt, welches folgende Eigenschaften hat:

- Sensor Modell: lineares Kameramodell
- Objekte: synthetische, kalibrierte und reale Objekte mit einem Durchmesser von bis zu 12 cm und einer Höhe von bis zu 15 cm

- Task: Rekonstruktion der sichtbaren Objektoberfläche
- Ausgabe: nächste Kameraposition zum Objekt, die Beleuchtungsposition und die optischen Parameter der Kamera sind statisch.

Die vorliegende Diplomarbeit besitzt folgenden Aufbau:

- In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Bildgenerierung vermittelt. Dabei wird speziell das Modell der Lochkamera und der mit diesem Modell verbundene mathematische und geometrische Hintergrund der Bildgewinnung beschrieben.
- In Kapitel 3 werden die verwendeten Geräte und deren geometrische Anordung, sowie Verfahren zur Kalibrierung dieser Geräte beschrieben.
- In Kapitel 4 wird der Prozeß der Oberflächenrekonstruktion dokumentiert und in seine einzelnen Schritte zerlegt. Jeder dieser Schritte wird analysiert und mathematisch beschrieben.
- Kapitel 5 baut die in Kapitel 4 gewonnen Erkenntnisse zu einem adaptiven System aus, wobei ein Verfahren zur Planung der nächsten Aufnahmesicht entwickelt wird.
- In Kapitel 6 werden Ergebnisse präsentiert.
- Kapitel 7 faßt die Diplomarbeit zusammen und gibt Ausblicke auf zukünftige Arbeiten.

Kapitel 2

Grundlagen der Bildgenerierung

In diesem Kapitel werden neben dem Modell der Lochkamera die mathematischen Grundlagen zur Bildgenerierung vermittelt. Es werden die geometrischen Beziehungen zwischen den verwendeten Koordinatensystemen hergestellt und damit jene mathematischen Hintergründe erarbeitet, die zur Berechnung eines Profilschnittes und in weiterer Folge zur Oberflächenrekonstruktion notwendig sind.

2.1 Das Modell der Lochkamera

Beim *Modell der Lochkamera* (*pinhole camera model*) wird von einer idealen Kamera ohne Verzerrungen ausgegangen. Es dient dazu, optische und geometrische Zusammenhänge zu erkennen und zu beschreiben [Kan93].

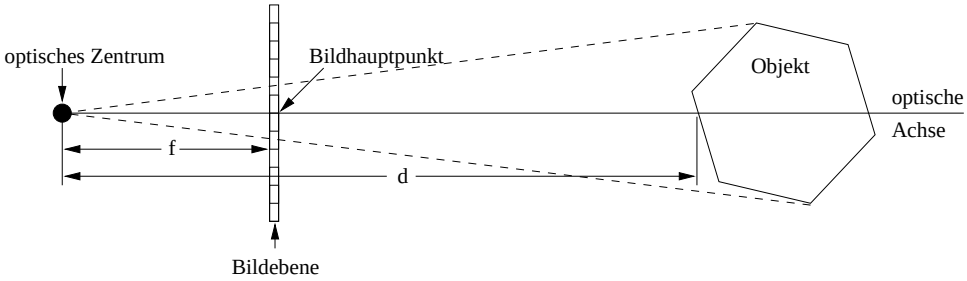


Abbildung 2.1: geometrisches Modell der Lochkamera

Abbildung 2.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen idealen Kamera. Die *fokale Länge* f ist dabei der Abstand zwischen *optischem Zentrum* (*Projektionszentrum*) und der *Bildebene*. Mit d wird die Distanz zwischen *Objektpunkt* und Projektionszentrum angegeben. D ist der *Sensorabstand*, also der Abstand des Zentrums eines *Sensorelementes* zum Zentrum eines benachbarten Elementes. Um die geometrischen Beziehungen der Zustandsgrößen des vorliegenden Modelles besser zu erkennen, wurde die *Bildebene* vor dem optischen Zentrum positioniert.

Zur geometrischen Definition der Ermittlung eines Profilschnittes wird in weiterer Folge vom Modell der Lochkamera ausgegangen.

2.2 Die perspektivische Projektion

Für eine ideale Lochkamera ist die Abbildung von Objektpunkten $P_w = (x_w, y_w, z_w)^T$ des dreidimensionalen Objektraumes auf Bildpunkte $P_f = (u_f, v_f)^T$ der zweidimensionalen Bildebene eine *perspektivische Projektion*. Unter der Annahme, daß das Objektkoordinatensystem an der Kamera ausgerichtet ist (*kamerazentriertes Koordinatensystem*), sind die Projektionsgleichungen durch $u_f = f \cdot x_w/z_w$ und $v_f = f \cdot y_w/z_w$ gegeben, was über den *Strahlensatz der Geometrie* herleitbar ist [Kan93]. Abbildung 2.2 zeigt die geometrischen Zusammenhänge im kamerazentrierten Koordinatensystem. Bei Verwendung eines *bildzentrierten Koordinatensystems*, bei dem der Ursprung des Koordinatensystems in die Bildebene gelegt wird, dann sind die Projektionsgleichungen entsprechend durch $u_f = f \cdot x_w/(f + z_w)$ und $v_f = f \cdot y_w/(f + z_w)$ gegeben [KKS96]. In weiterer Folge wird jedoch vom kamerazentrierten Koordinatensystem ausgegangen, da dessen Ursprung dem optischen Zentrum der Kamera entspricht, wodurch die geometrischen Zusammenhänge leichter erklärt werden können.

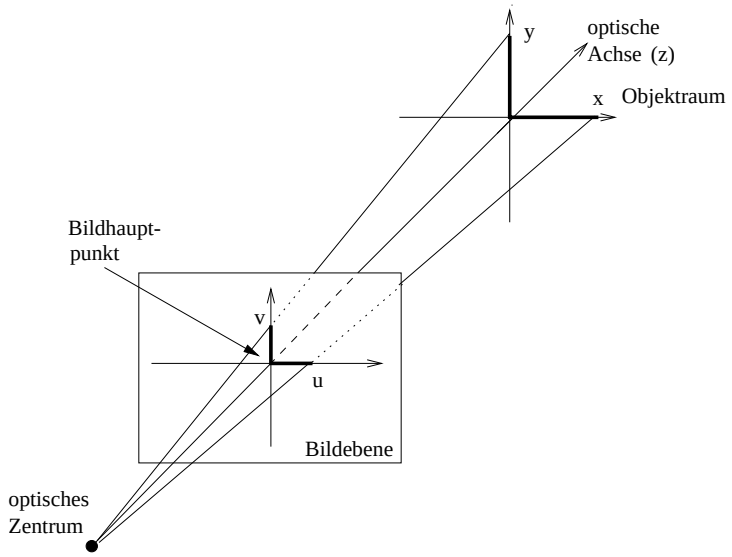


Abbildung 2.2: perspektivische Projektion eines Objektes

2.3 Entstehung eines Bildes

Die Entstehung eines Bildes am *Kamerasensor* (Bildebene) kann mathematisch durch *affine Transformation* des Objektkoordinatensystems in das Kamerakoordinatensystem und

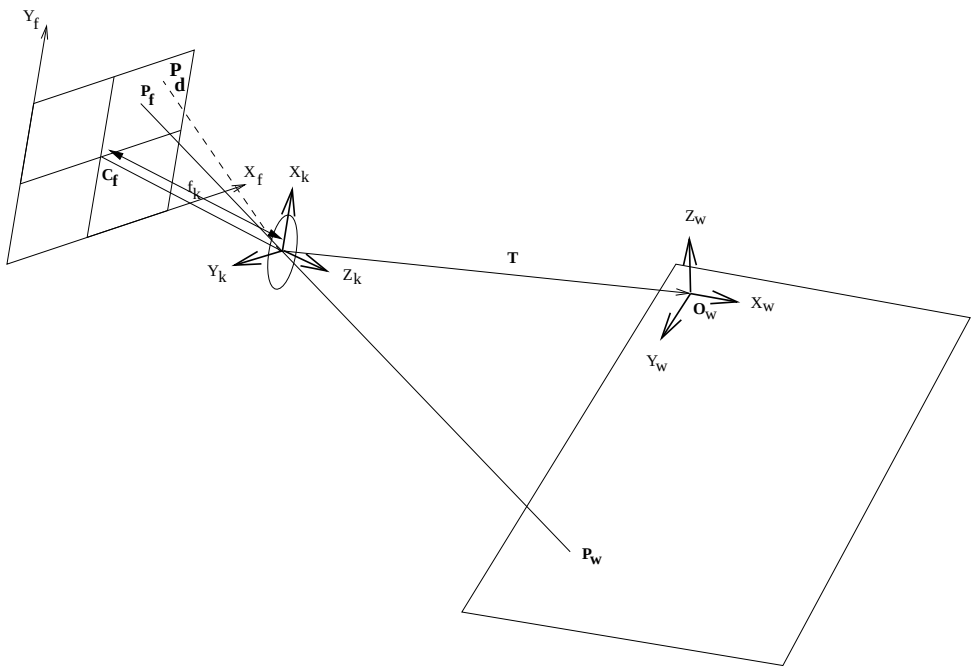


Abbildung 2.3: Beziehungen zwischen Objekt-, Kamera- und Bildkoordinaten

weiters in das Bildkoordinatensystem beschrieben werden. Abbildung 2.3 zeigt die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Koordinatensystemen. Das Objektkoordinatensystem ist dabei am *Eichkörper* (siehe nächster Abschnitt) das Kamerakoordinatensystem am Sensor ausgerichtet. Die Transformation eines Punktes $P_w = (x_w, y_w, z_w)^T$ des Objektkoordinatensystems in den Punkt $(x_k, y_k, z_k)^T$ im kamerazentrierten Koordinatensystem wird durch eine Rotation und anschließende Translation beschrieben.

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} + T \tag{2.1}$$

T bezeichnet dabei den Translationsvektor und R die Rotationsmatrix. Die Rotationsmatrix besteht aus den drei Teiltransformationsmatrizen R_x, R_y und R_z entsprechend den einzelnen Rotationen um die x-, y- und z-Achse. Die Rotation um die X_k-Achse um einen Winkel α (*Kippung, engl. pan angle*) wird durch

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos(\alpha) & sin(\alpha) \\ 0 & -sin(\alpha) & cos(\alpha) \end{pmatrix}, \tag{2.2}$$

die Rotation um die Y_k-Achse um einen Winkel β (*Neigung, engl. tilt angle*) durch

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} cos(\beta) & 0 & -sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ sin(\beta) & 0 & cos(\beta) \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

und die Rotation um die Z_k-Achse (*Kantung, engl. roll angle*) durch

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} cos(\gamma) & sin(\gamma) & 0 \\ -sin(\gamma) & cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

beschrieben. Die Rotationsmatrix wird durch Multiplikation der Teiltransformationsmatrizen gebildet, also

$$R = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix}, \tag{2.5}$$

wobei

$$\begin{aligned}
r_1 &= cos(\beta) \cdot cos(\gamma), && (2.6)\\
r_2 &= cos(\beta) \cdot sin(\gamma), && (2.7)\\
r_3 &= -sin(\beta), && (2.8)\\
r_4 &= sin(\alpha) \cdot sin(\beta) \cdot cos(\gamma) - cos(\alpha) \cdot sin(\gamma), && (2.9)\\
r_5 &= sin(\alpha) \cdot sin(\beta) \cdot sin(\gamma) + cos(\alpha) \cdot cos(\gamma), && (2.10)\\
r_6 &= sin(\alpha) \cdot cos(\beta), && (2.11)\\
r_7 &= cos(\alpha) \cdot sin(\beta) \cdot cos(\gamma) + sin(\alpha) \cdot sin(\gamma), && (2.12)\\
r_8 &= cos(\alpha) \cdot sin(\beta) \cdot sin(\gamma) - sin(\alpha) \cdot cos(\gamma), && (2.13)\\
r_9 &= cos(\alpha) \cdot cos(\beta) && (2.14)
\end{aligned}$$

ist. Die Rotationsmatrix ist orthogonal und kann daher durch Bildung der Transponierten (spiegeln an der Hauptdiagonale) invertiert werden [BK89], d.h.

$$R^{-1} = R^T = \begin{pmatrix} r1 & r4 & r7 \\ r2 & r5 & r8 \\ r3 & r6 & r9 \end{pmatrix}. \tag{2.15}$$

Der Translationsvektor ist durch

$$T = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \tag{2.16}$$

definiert. Während die Rotation eine lineare Transformation Darstellt ist die Translation nicht linear im mathematischen Sinne. Um die Koordinatentransformation (2.1) ausschließlich in Matrizenform zu ermöglichen, muß die Translation in eine lineare Transformation umgewandelt werden. Dies erfolgt durch Verwendung von Koordinaten in ihrer *homogenen* Darstellung. Die homogene Darstellung wird durch Erweiterung der Dimension des zugrundeliegenden Raumes gebildet. Ein Punkt $(x, y, z)^T$ wird somit zu $(X, Y, Z, w)^T$ erweitert, wobei $w \neq 0$ ein beliebiger Skalierungsfaktor ist. Die Berechnung der dreidimensionalen Koordinaten aus der homogenen Form erfolgt durch

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X/w \\ Y/w \\ Z/w \end{pmatrix}. \tag{2.17}$$

Als Skalierungsfaktor wird zumeist $w = 1$ gewälht, wodurch der dreidimensionale Punkt sofort aus seiner homogenen Darstellung ablesbar ist. Gleichung 2.1 lautet in ihrer homogenen Form

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r1 & r2 & r3 & t_x \\ r4 & r5 & r6 & t_y \\ r7 & r8 & r9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix}. \tag{2.18}$$

Die Rotationsmatrix R und der Translationsvektors T beschreiben die zwölf Parameter der *äußeren Orientierung* einer Kamera [Tsa86].

Mit der dargestellten Transformation kann jeder Punkt des Objektkoordinatensystems in das Kamerakoordinatensystem durch Multiplikation eines Punktes mit homogenen Koordinaten $(x, y, z, 1)^T$ mit der Transformationsmatrix transformiert werden. Um den Vorgang der Bildgenerierung vollständig zu beschreiben, muß noch die perspektivische Projektion auf diese Punkte durchgeführt werden. Die Formel zur Projektion der Punkte in das Rechnerkoordinatensystem lautet

$$P_f = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_k \cdot f_k/z_k \\ y_k \cdot f_k/z_k \end{pmatrix}. \tag{2.19}$$

Die homogene Darstellung der perspektivischen Projektion ist durch

$$P_f = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_k/z_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_k/z_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_k & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{pmatrix} \tag{2.20}$$

gegeben. Bisher wurde die Modellierung der Kamera durch Annahme einer idealen Kamera vorgenommen. Durch Verwendung von Linsen treten jedoch auch Fehler hervor, die bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen. In [Tsa86] wird ein mathematisches Modell der *radialen Bildverzerrung* beschrieben. Die verzerrten Bildkoordinaten P_d werden dabei aus den unverzerrten idealen Bildkoordinaten P_f berechnet, formal:

$$P_d = \begin{pmatrix} x_f + D_x \\ y_f + D_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \tag{2.21}$$

Die Fehler D_x und D_y sind vom Abstand zum Bildhauptpunkt $C_f = (c_x, c_y)^T$ abhängige Polynomfunktionen mit den Verzeichnungskoeffizienten κ_1 (*radial*) und κ_2 (*tangential*). Es gelten folgende Formeln:

$$D_x = x_d(\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4)$$

$$D_y = y_d(\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4)$$

Die tangentiale Verzerrung kann jedoch laut [Tsa86] vernachläßigt werden. Es ergeben sich somit folgende Berechnungen:

$$D_x = X_d \cdot \kappa_1 \cdot r^2 \tag{2.22}$$

$$D_y = Y_d \cdot \kappa_1 \cdot r^2 \tag{2.23}$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \tag{2.24}$$

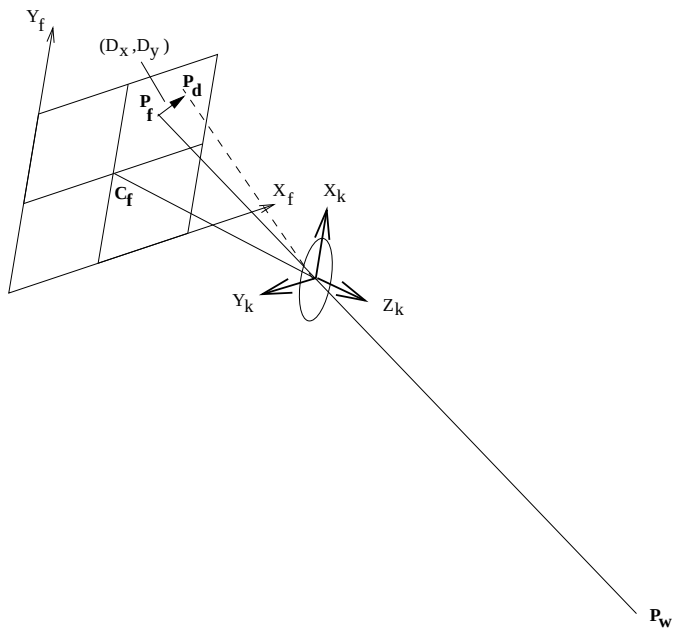


Abbildung 2.4: Bildverzerrung

Abbildung 2.4 zeigt den Zusammenhang zwischen verzerrten und unverzerrten Punkten. Zur Erzeugung eines digitalen Bildes müssen die berechneten verzerrten Punkte noch in die Ebene der Halbleitersensoren (*Rechnerkoordinatensystem*) transformiert werden, womit eine Zuordnung zwischen den Rechnerkoordinaten und den Bildkoordinaten getroffen werden kann. Die Relation zwischen dem Pixel $(u_f, v_f)^T$ des Rechnerkoordinatensystems und dem Punkt $(x_d, y_d)^T$ des Bildkoordinatensystems ist durch

$$\begin{pmatrix} u_f \\ v_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x \cdot \frac{N_{fx} x_d}{d_x N_{cx}} + c_x \\ \frac{N_{fx} y_d}{d_x N_{cx}} + c_y \end{pmatrix} \tag{2.25}$$

gegeben. Die Bedeutungen der Parameter lauten im einzelnen:

- s_x: horizontaler Skalierungsfaktor, der die nicht exakte Synchronisation zwischen dem Framegrabber und der Kamerahardware beschreibt
- $(u_f, v_f)^T$: Spalte und Zeile eines Bildpunktes im *Framegrabber* (Rechnerkoordinatensystem)
- $(c_x, c_y)^T$: Bildkoordinate des Bildhauptpunktes C_f: Dieser entspricht dem Schnittpunkt der optischen Achse mit der Bildebene
- d_x: Abstand zweier benachbarter Sensorelemente in x-Richtung
- d_y: Abstand zweier benachbarter Sensorelemente in y-Richtung
- N_{cx}: Anzahl der Sensorelemente in x-Richtung
- N_{fx}: Anzahl der abgetasteten Pixel einer Linie

Die Parameter $\kappa_1, \kappa_2, f_k, s_x$ und C_f bestimmen gemeinsam die *inneren Parameter* einer Kamera.

Kapitel 3

Das Aufnahmesystem

In diesem Kapitel werden die verwendeten Geräte, sowie deren geometrische Anordnung beschrieben. Weiters werden die Verfahren zur automatischen Ermittlung der geometrischen Parameter dieser Aufnahmeanordnung erklärt und die aufzunehmenden Objekte definiert.

3.1 Geräte

Folgende Geräte werden verwendet:

- Rotationsteller (siehe Abbildung 3.1): 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. Die Bewegung kann sowohl absolut als auch relativ angegeben werden.

- Laser: Die Szene wird durch zwei Laserdioden beleuchtet. Beide Laser sind mit einem Vorsatzprisma zur Aufspaltung des Lichtstrahles in eine Lichtebene ausgestattet und 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 f von 16 mm. Die Kamera ist über eine *Framegrabberkarte* an den PC angeschlossen.

- Intel Pentium PC mit einer Taktfrequenz von 90 MHz und 32 MB Hauptspeicher.

3.2 Geometrische Anordnung

Abbildung 3.2 zeigt die Anordnung (a) und Geometrie (b) 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,

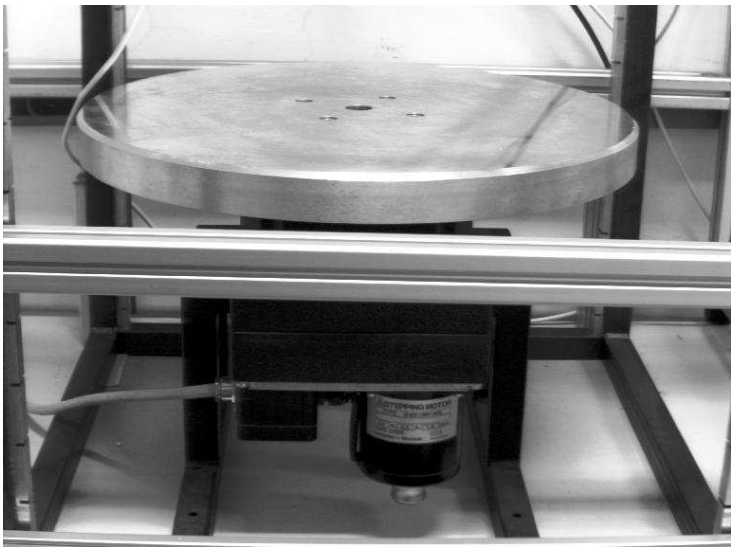


Abbildung 3.1: Rotationsteller

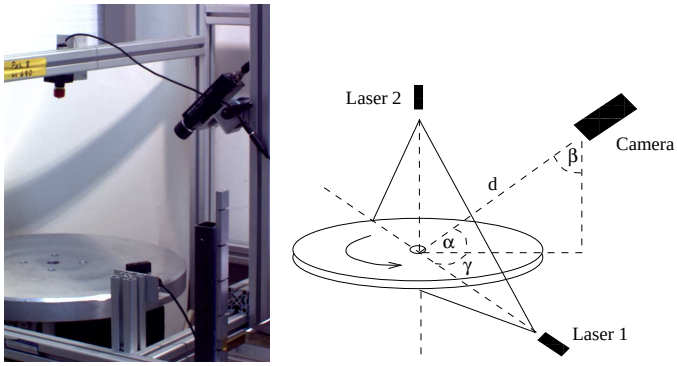
daß die aufgespaltenen Lichtebenen ineinander übergehen und somit eine einzige Lichtebene aufspannen. Die angegebene Anordnung der beiden Laser ist durch die bei der dreidimensionalen Oberflächenrekonstruktion auftretenden Probleme der Verdeckungen bzw. Abschattungen begründet. Es können folgende Arten 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 3.3 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 3.4). Der Einsatz eines Rotationstellers reduziert die Kameraverdeckungen, da das Objekt dadurch auch aus anderen Blickrichtungen aufgenommen werden kann. Die Beziehungen der verwendeten Geräte untereinander ist in Tabelle 3.1 angeführt. Die Distanzen und Winkel wurden derart gewählt, daß der effektive Aufnahmebereich durch Reduktion der Lichtverdeckungen maximiert wird.

3.3 Kalibrierung

In diesem Abschnitt 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



(a) Anordnung (b) Geometrie

Abbildung 3.2: Aufnahmesystem

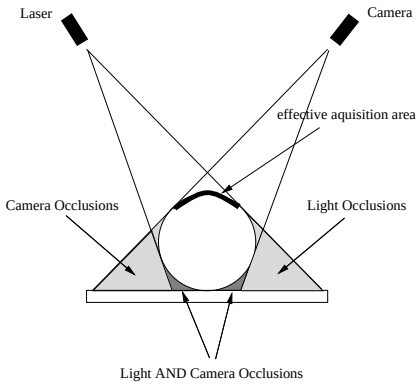


Abbildung 3.3: Licht- und Kameraverdeckungen

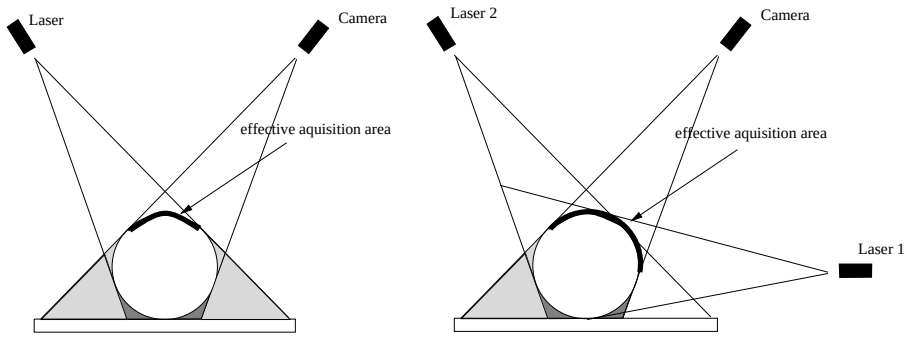
möglich. Zur Kalibrierung des vorgestellten Aufnahmesystems sind drei Schritte notwendig:

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

In weiterer Folge werden diese Schritte detailliert beschrieben.

3.3.1 Kalibrierung der Kamera

Bei der Kamerakalibrierung wird die Orientierung der Kamera ermittelt. Die Orientierung einer Kamera ist durch ihre *äußere* und *innere Orientierung* beschrieben. Um die einzelen Parameter zu bestimmen werden Eichkörper bzw. Kalibriermuster aufgenommen, analysiert und ausgewertet. Die realen Abmessungen der Körper bzw. Kalibriermuster müssen



(a) ein Laser (b) zwei Laser

Abbildung 3.4: Reduktion von Lichtverdeckungen

Normalabstand	Laser 2 / Objektebene	45 cm
Abstand	Laser 1 / Rotationszentrum	48 cm
Abstand	Kamera / Rotationszentrum	d=40 cm
Winkel	Kamera / Rotationszentrum	α=45 Grad
Winkel	Kamera / Laserlichtebene	γ=45 Grad

Tabelle 3.1: Abmessungen der Aufnahmeanordnung

dafür bekannt sein.

Abbildung 3.5 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 linearer Transformation (DLT)*, welche 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 dieser Arbeit zur Kalibrierung der Kamera verwendet werden.

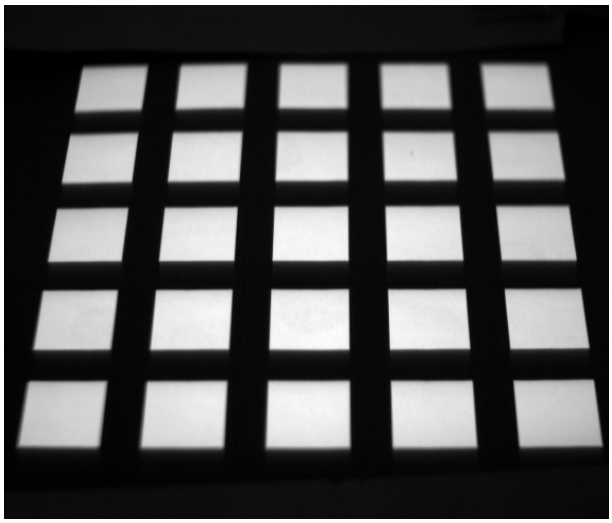


Abbildung 3.5: Kamerasicht eines 5x5 Kalibriermusters

Der Vorteil der DLT-Kalibrierung gegenüber der Tsai-Kalibrierung liegt darin, daß zur Bestimmung der einzelnen Parameter nur lineare Gleichungssysteme zu lösen sind, wodurch das Verfahren eine höhere numerische Stabilität aufweist, als jenes von Tsai.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Repräsentation des Ergebnisses. Dieses liegt in Form einer 3×4-Transformationsmatrix vor, in welcher die innere und äußere Orientierung einkodiert wurden. Durch diese Repräsentationsform können Transformationen von einem Koordinatensystem in ein anderes effizient durch eine einzelne Matrizenmultiplikation durchgeführt werden. Der Nachteil dieser Matrixform ist, daß die kalibrierten Parameter nicht unmittelbar feststellbar sind. Bei Tsai wird jeder einzelne Parameter ausgegeben, wodurch eine Kontrolle der Kalibrierung durch Prüfung auf ihre Plausibilität leichter möglich wird.

Zur exakten Überprüfung der Kalibrierung werden die erhaltenen Parameter zur Rücktransformation eines kalibrierten Objektes bzw. Musters herangezogen. Durch Vergleich der Rücktransformation mit den realen Abmessungen des bekannten Objektes kann auf den Fehler der Kalibrierung geschlossen werden.

Die Genauigkeit der Kamerakalibrierung ist von folgenden Faktoren abhängig:

1. Genauigkeit der Kalibrierebenen: Die zur Kamerakalibrierung notwendige Mehrebenenkalibrierung erfordert eine mechanische Vorrichtung zur Verschiebung des Kalibriermusters in z-Richtung. Im vorliegenden System beträgt der Abstand zwischen den Kalibrierebenen 50 mm.

2. Detektionsgenauigkeit der Eichpunkte am Kalibrierkörper: Zur Feststellung der geometrischen Beziehungen werden die Zentren der Eichpunkte im aufgenommenen Bild detektiert und mit den Sollobjektkoordinaten, die implizit durch das Kalibriermuster und der mechanischen Kalibriervorrichtung gegeben sind, in Relation gesetzt.

Problematisch bei der Detektion der Eichpunktzentren ist vor allem die Tatsache, daß die Aufnahme des Kalibriermusters aufgrund der begrenzten Tiefenschärfe der Kamera unterschiedliche Qualität, abhängig vom jeweiligen Abstand des Objektpunktes zum Kamerazentrum, besitzt.

Die Kalibrierung nach Tsai bzw. DLT ergab folgende Fehlerabschätzungen:

Beschreibung	mean	max
Tsai-Kalibrierung		
Fehler unter Berücksichtigung der Linsenverzerrung	0.5096 mm	1.3052 pix
Fehler ohne Berücksichtigung der Linsenverzerrung	0.5125 mm	1.3201 pix
berechneter Fehler bei Rücktransformation	0.1563 mm	0.3937 mm
DLT-Kalibrierung		
berechneter Fehler bei Rücktransformation	0.1832 mm	0.688 mm

In Tabelle A.2 auf Seite 73 ist eine genaue Aufstellung der in zwei Kalibrierebenen entstandenen Abweichungen von den Sollkoordinaten in x-, y- und z-Richtung für die DLT-Kalibrierung angegeben.

3.3.2 Aufbau und Zerlegung der DLT-Matrix

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der DLT-Matrix und in weiterer Folge ein Algorithmus zur Zerlegung der DLT-Matrix beschrieben. Durch diese Zerlegung wird es möglich das Ergebnis der Kalibrierung auf Plausibilität zu prüfen.

Die DLT-Matrix A wird durch folgende Berechnungsvorschriften aufgebaut:

$$A = \lambda \cdot V^{-1} \cdot B^{-1} \cdot F \cdot M \cdot T \tag{3.1}$$

wobei durch V der Bildhauptpunkt (c_x, c_y) in die Matrix einkodiert wird:

$$V^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & c_x \\ 0 & 1 & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

Durch B wird eine Beziehung des Lochkameramodelles zum *linearen Kameramodell* gegeben, welches eine Erweiterung des Modelles um Koeffizienten zur Beschreibung der Skalierungsdifferenz des Sensors in x- und y-Richtung (b_1, b_2) darstellt[Mel94].

$$B = \begin{pmatrix} 1 + b_1 & b_2 & 0 \\ b_2 & 1 - b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

Die Umkehrmatrix ergibt sich zu

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1-b_1}{1-b_1^2-b_2^2} & -\frac{b_2}{1-b_1^2-b_2^2} & 0 \\ -\frac{b_2}{1-b_1^2-b_2^2} & \frac{1+b_1}{1-b_1^2-b_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{3.4}$$

Durch

$$F = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

wird die fokale Länge der Kamera in die DLT-Matrix einkodiert. M beschreibt die Rotationsmatrix (siehe Formel 2.5, um Mißverständnisse mit der später erfolgenden QR-Faktorisierung zu vermeiden, wird sie hier mit M bezeichnet). Durch T wird die Translation in die Matrix parametrisiert.

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -t_x \\ 0 & 1 & 0 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 & -t_z \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

Die DLT-Matrix ermöglicht eine bis auf einen Skalierungsfaktor λ eindeutige Transformation von Objektkoordinaten in Kamerakoordinaten. Durch die eben angeführten Berechnungsschritte wird die Transformationsmatrix zum linearen Kameramodell beschrieben. Der in weiterer Folge beschriebene Algorithmus zur Zerlegung dieser Matrix ist aus [Mel94] entnommen:

1. Bestimmung von $|\lambda|$:
   Sei A' die linke 3×3-Submatrix der DLT-Matrix A, also

   $$A' = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}.$$

   Dann ist $|\lambda|$ durch

   $$|\lambda| = \sqrt{a_{31}^2 + a_{32}^2 + a_{33}^2} \tag{3.7}$$

   gegeben. Das Vorzeichen von λ wird in Schritt 5 bestimmt.

2. Berechnung der QR-Faktorisierung von $\frac{1}{|\lambda|} \cdot A'$:
   Sei $A'' = \frac{1}{|\lambda|} \cdot A'$. Durch QR-Faktorisierung erhält man eine Dreiecksmatrix R und eine orthogonale Matrix Q, symbolisch

   $$A'' = R \cdot Q = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{23} \\ 0 & 0 & \pm 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{pmatrix}. \tag{3.8}$$

   Die Durchführung der Faktorisierung erfolgt durch Orthogonalisierung mittels *Gram-Schmidt* bzw. durch die in [PTVF94] beschriebene *Householder-Transformation.*

3. Wechsel der Vorzeichen der Diagonalelemente von R:
   Für die weitere Zerlegung müssen die Diagonalelemente von R größer als Null sein, also ein positives Vorzeichen haben. Zu diesem Zweck wird eine Matrix J definiert, die diese Umwandlung der Vorzeichen vornimmt:

   $$J = \begin{pmatrix} j_{11} & 0 & 0 \\ 0 & j_{22} & 0 \\ 0 & 0 & j_{33} \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

Es gilt:
$j_{ii} = +1$, falls r_{ii} das richtige Vorzeichen besitzt, andernfalls ist $j_{ii} = -1$.

4. Bestimmung einer orthogonalen Matrix S mit $G = R \cdot J \cdot S$:
Sei G durch

$$G = V^{-1} \cdot B^{-1} \cdot F = \begin{pmatrix} \frac{(1-b_1)\cdot f}{1-b_1^2-b_2^2} & -\frac{b_2 \cdot f}{1-b_1^2-b_2^2} & c_x \\ -\frac{b_2 \cdot f}{1-b_1^2-b_2^2} & \frac{(1+b_1)\cdot f}{1-b_1^2-b_2^2} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

mit den Zusatzbedingungen $g_{12} = g_{21}$, $g_{11} > 0$ und $g_{22} > 0$ gegeben. Sei weiters $R' = R \cdot J$. Gesucht ist somit eine orthogonale Matrix S, sodaß $G = R' \cdot S$ gilt. Eine solche Matrix S ist durch

$$S = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

Der Winkel ϕ wird durch

$$\tan\phi = -\frac{r'_{12}}{r'_{11} + r'_{22}}$$

berechnet. Die Elemente der Matrix S ergeben sich somit als

$$\sin\phi = \frac{\tan\phi}{\sqrt{1 + \tan^2\phi}} \tag{3.12}$$

und

$$\cos\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\phi}}. \tag{3.13}$$

5. Vorzeichen von λ:
Sei $M' = S^{-1} \cdot J^{-1} \cdot Q$. Dann ist λ durch

$$\lambda = \det M' \cdot |\lambda| \tag{3.14}$$

gegeben und M durch

$$M = \det M' M'. \tag{3.15}$$

Durch den beschriebenen Alorithmus wird die DLT-Matrix komplett zerlegt. Die Orientierung der Kamera ergibt sich wie folgt:

$$b_1 = -\frac{g_{11} - g_{22}}{g_{11} + g_{22}} \tag{3.16}$$

$$b_2 = -2 \cdot \frac{g_{12}}{g_{11} + g_{22}} \tag{3.17}$$

$$f = 2 \cdot \frac{g_{11} \cdot g_{22} - g_{12}^2}{g_{11} + g_{22}} \tag{3.18}$$

$$c_x = g_{13} \tag{3.19}$$

$$c_y = g_{23} \tag{3.20}$$

Aus der Rotationsmatrx M können weiters die drei Winkel extrahiert werden. Es gilt:

$$\gamma = \arctan(m_{21}, m_{11}) \tag{3.21}$$
$$\alpha = \arctan(m_{13} \cdot \sin\gamma - m_{23} \cdot \cos\gamma, m_{22} \cdot \cos\gamma - m_{12} \cdot \sin\gamma) \tag{3.22}$$
$$\beta = \arctan(-m_{31}, m_{11} \cdot \cos\gamma + m_{21} \cdot \sin\gamma) \tag{3.23}$$

Der Translationsvektor T ist durch

$$T = \begin{pmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{pmatrix} \tag{3.24}$$

gegeben.

3.3.3 Kalibrierung des Rotationstellers

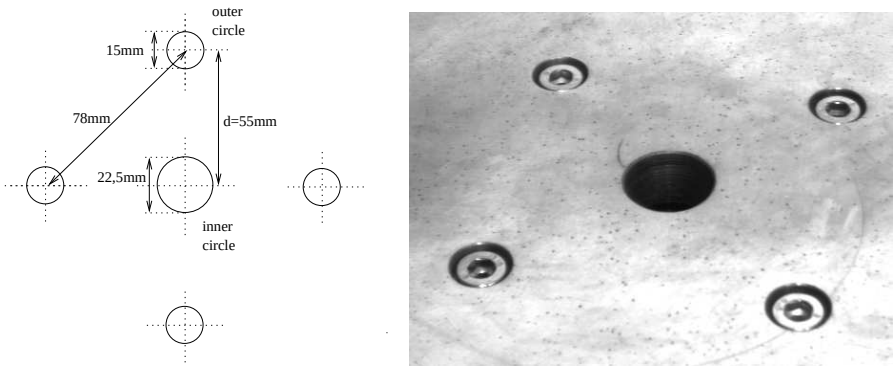
Die Kalibrierung des Rotationstellers erfolgt in zwei Schritten, nämlich

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 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.



(a) Ausstanzungen (b) Kamerasicht

Abbildung 3.6: Rotationsteller

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. In Abbildung 3.6(a) sind diese Ausstanzungen und ihre Abmessungen zu sehen. Abbildung 3.6(b) zeigt die Kamerasicht des Rotationstellers, wobei die Ausstanzungen des Drehtellers durch die Projektion auf die Sensorebene der Kamera zu Ellipsen verformt werden. 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 Ausstanzung

Verfahren zur Detektion von Ellipsen sind unter anderem die Detektion durch *Houghtransformation* oder durch *generische Methoden*.

Die Houghtransformation ist eine robuste Technik zur Detektion parametrischer Kurven [IK88, Dav97]. Sie ist jedoch rechen- und speicherintensiv [Kie92] und liefert für die Kalibrierung zu ungenaue Ergebnisse [Lea92]. Generische Methoden besitzen im Gegensatz dazu eine geringere Rechenintensität, da sie den Suchraum durch Auswahl der besten Hypothesen einschränkt [SL95, RL94]. Ein weiterer Vorteil der generischen Methoden liegt darin, daß sie weitestgehend modellunabhängig sind und somit unmittelbar auf die unterschiedlichsten Kalibriermuster angewandt werden können. In weiterer Folge wird die Methode nach [SL95] kurz zusammengefaßt.

Die generische Detektion von Ellipsen in einem Grauwertbild wird in vier Schritten durchgeführt:

1. Detektion der Kanten und Berechnung der Kantenrichtung für jeden gefundenen Kantenpunkt. Dies kann beispielsweise mittels *Sobel-* oder *Canny-Kantendetektoren* erfolgen. Die beiden Operatoren sind beispielsweise in [BB93] und [Pin94] beschrieben.

2. Exploration der vorliegenden Daten: In diesem Schritt werden Hypothesen aufgestellt. Diese Hypothesen bestehen aus einer Liste von Ellipsen, die durch die detektierten Kantenpunkte verlaufen. Die Suche nach den Hypothesen wird durch einen Mechanismus gesteuert, der Regionen bevorzugt, in welchen noch keine Kandidaten gefunden wurden.

3. Auswahl jener Menge von Hypothesen, die die Szene am besten beschreiben. Diese Auswahl erfolgt durch Formulierung eines Optimierungsproblems und dessen Lösung mittels *Tabu search* (eine Einführung zu dieser Technik ist unter anderem in [DKS96] gegeben).

4. Anpassung der Parameter der gefundenen Ellipsen zur Verbesserung der Genauigkeit mittels der Methode der kleinsten Quadrate (in [PTVF94] ist diese Methode erklärt und effizient implementiert).

Die beschriebene Technik wurde im Bereich der industriellen Kontrolle getestet [SL96] und erwies sich als robust zur Detektion von geometrischen Primitiven in Grauwertbildern [SL96, Sab97].

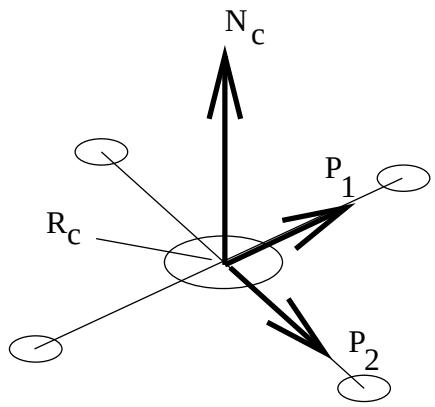


Abbildung 3.7: Rotationszentrum und Normalvektor

Durch Anwendung der beschriebenen Technik erhält man das Rotationszentrum in Form eines dreidimensionalen Punktes R_c in der Objektebene. Der Normalvektor N_c, der durch R_c verläuft und normal auf der Objektebene steht, wird durch folgende Vorgangsweise berechnet (siehe auch Abbildung 3.7):

1. Rücktransformation zweier beliebiger Bildpunkte P_1 und P_2 in die Objektebene

2. Bildung des Normalvektors N_c der orthogonal auf der durch R_c, P_1 und P_2 aufgespannten Ebene $E_c = R_c + \lambda \cdot P_1 + \mu \cdot P_2$ steht durch:

$$N_c = (P_1 - R_c) \times (P_2 - R_c) \tag{3.25}$$

In der nachfolgenden Tabelle ist der Fehler der Rotationstellerkalibrierung angegeben:

Beschreibung	mean	max
Ellipsendetektion		
mittlere Ausstanzung	0.29 mm	0.36 mm
äußere Ausstanzungen	0.93 mm	1.81 mm
Diagonalisierung		
detektiertes Zentrum	0.62 mm	1.42 mm

Die Detektion der äußeren Ausstanzungen ist aufgrund ihrer geringeren Ausdehnung ungenauer, als die Detektion der mittleren Ausstanzung. Bedingt durch die ungenaue Detektion der äußeren Ausstanzungen ist das Verfahren der Diagonalisierung zur Ermittlung des Rotationszentrums nicht anwendbar. Weiters ist aufgrund der abgebildeten Schrauben das Zentrum der äußeren Ausstanzungen nicht eindeutig feststellbar, weshalb die Wahl des korrekten Zentrums nicht voll automatisch ablaufen kann.

3.3.4 Kalibrierung der Laserlichtebene

Bei diesem Schritt der Kalibrierung wird eine Beziehung zwischen dem Kamerakoordinatensystem und der Laserlichtebene hergestellt. Diese ist notwendig, um die Rücktransformation von zweidimensionalen Bildkoordinaten in die jeweiligen dreidimensionalen Objektkoordinaten zu ermöglichen, da durch die perspektivische Projektion beim Bildgewinnungsprozeß eine Dimension verloren geht. Die Kalibrierung der Orientierung der Laserebene erfolgt durch zwei Arbeitsschritte:

1. Im ersten Schritt wird die Laserebene auf die Objektebene projiziert. Es entsteht eine *Schnittlinie* zwischen der Laser- und der Objektebene. Diese Schnittlinie L wird detektiert und deren Parameter (P und R) ermittelt.

2. Für den zweiten Schritt wird die Objektebene in einem bekannten Abstand (bspw. $z = 50mm$) zur Objektebene des ersten Schrittes montiert und die Laserebene auf die Objektebene projiziert und ein Punkt S der entstehenden Schnittlinie detektiert.

Aus der Kombination der beiden Schritte werden die genauen Laserebenenparameter ermittelt. Dies ist dadurch möglich, da eine Ebene durch eine Gerade und einen Punkt eindeutig beschrieben wird (siehe dazu auch Abbildung 3.8). Die Schnittlinie des ersten Kalibrierschrittes wird durch $L = P + \lambda \cdot (R - P)$ beschrieben. Durch Hinzunahme des Punktes S ergibt sich die Ebenengleichung als

$$E = L + \mu \cdot (S - P) = P + \lambda \cdot (R - P) + \mu \cdot (S - P). \tag{3.26}$$

Jeder Punkt der Laserlichtebene ist so durch einen Punkt des Objektkoordinatensystems eindeutig beschrieben.

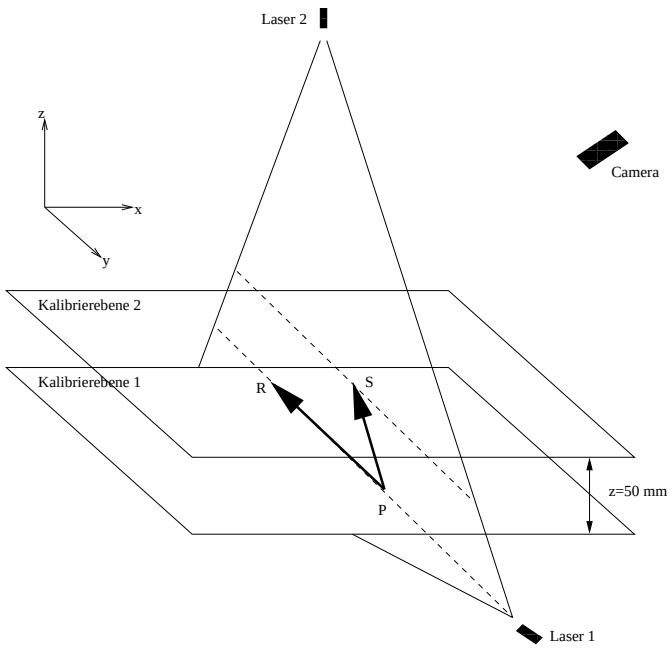


Abbildung 3.8: Kalibrierung der Laserebene

Die Genauigkeit der Laserebenenkalibrierung ist von der Detektion der Laserlinie im Bild abhängig. Im Idealfall ist die Laserlinie im aufgenommenen Bild ein Pixel breit, womit die Detektion der projizierten Laserlinie eindeutig wäre und eine maximale Genauigkeit der Kalibrierung gewährleistet wäre. In der gewählten Aufnahmeanordnung ist jedoch die Repräsentation des Laserstrahles aufgrund des Kamerabstandes größer als ein Pixel (siehe dazu Abbildung 3.9 in der ein vergrößerter Ausschnitt einer Laserlinie zu sehen ist), weshalb die Genauigkeit durch den der Detektion der Linie zugrundeliegenden Algorithmus beschränkt ist. Ein Algorithmus zur Detektion der Laserlinie wird im Kapitel Oberflächenrekonstruktion angegeben. Eine Fehlerabschätzung, sowie die Auswirkungen einer falsch kalibrierten Laserlinie auf die Rücktransformation ist ebenfalls in diesem Kapitel angegeben.

3.4 Aufzunehmende Objekte

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften der aufzunehmenden Objekte diskutiert. 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. Die aufzunehmenden Objekte lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

- *kalibrierte Objekte:* Hierbei handelt es sich um Objekte, deren Abmessungen bekannt sind. In Abbildung 3.10(a) ist ein kalibrierter Quader mit den Abmessungen

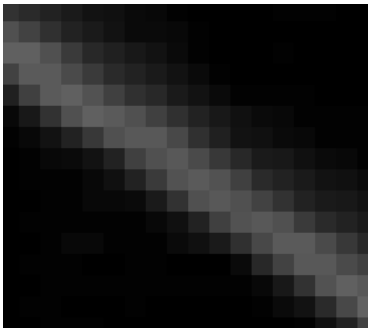
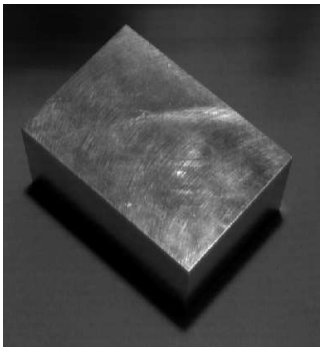


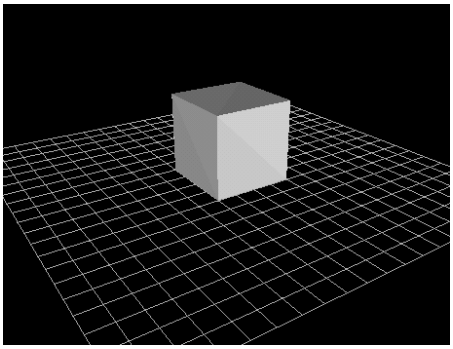
Abbildung 3.9: Repräsentation eines Laserstrahles

7/10/6 cm zu sehen. Kalibrierte Objekte 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 (siehe Abbildung 3.10(b)).
- *reale Objekte:* Dies sind jene Objekte, die mit ihren physikalischen Eigenschaften den erwähnten Einschränkungen genügen und mit dem erzeugten Aufnahmesystem erfaßt werden können. Beispielsweise können dies archäologische Fundstücke, wie zum Beispiel Tonscherben (siehe Abbildung 3.10(c)), sein.



(a) kalibriert



(b) synthetisiert

(c) real

Abbildung 3.10: Aufzunehmende Objekte

Kapitel 4

Oberflächenrekonstruktion

In diesem Kapitel wird der Prozeß der Oberflächenrekonstruktion beschrieben. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

1. Detektion der projizierten Laserlinie
2. Transformation der detektierten Laserlinie vom zweidimensionalen Rechnerkoordinatensystem in das dreidimensionale Objektkoordinatensystem
3. Bewegung des Objektes durch die Laserebene

Die Schritte werden wiederholt, bis das Objekt komplett durch die Laserebene geführt wurde. Die Bewegung kann dabei schrittweise linear oder durch schrittweise Drehung erfolgen. Je nach Bewegungsart kann die Schrittweite bzw. der Winkel variabel (adaptiv) oder äquidistant bzw. äquiangular erfolgen. In weiterer Folge werden die angeführten Schritte zur Oberflächenrekonstruktion analysiert und beschrieben.

4.1 Detektion der Laserlinie im Kamerabild

Wird ein Objekt in der Laserlichtebene positioniert, so wird das Laserlicht an der Objektoberfläche reflektiert. Diese Reflektion verläuft linienförmig entlang der Objektoberfläche. Abbildung 4.1 veranschaulicht dies und zeigt, wie die reflektierte Laserlinie am Monitor sichtbar ist.

Bei der Aufnahme wird davon ausgegangen, daß die Szene nur mit der Laserlichtquelle beleuchtet wird. Tages- bzw. Streulicht ist zu minimieren.

Die Detektion der Laserlinie erfolgt durch zeilenweise Auswertung der Szenenaufnahme. Ein Beispiel des Signalverlaufes in einer solchen Bildzeile mit reflektiertem Laserlicht ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Algorithmen zur Detektion von projizierten Laserlinien in einem Kamerabild sind in [Joh93] erklärt. Die einfachste Art ist das Aufsuchen des Maximums des Signals in einer Bildzeile, welches jedoch, aufgrund der durch die Aufnahmegeometrie bedingten Breite des projizierten Laserstrahles, nicht immer eindeutig feststellbar ist

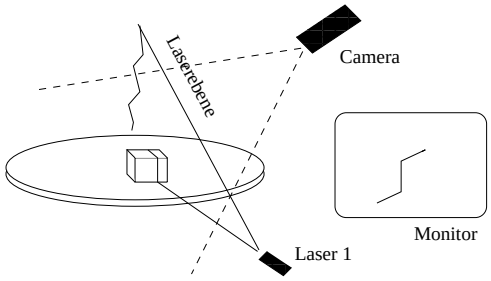


Abbildung 4.1: Reflektion des Laserlichtes auf einer Objektoberfläche

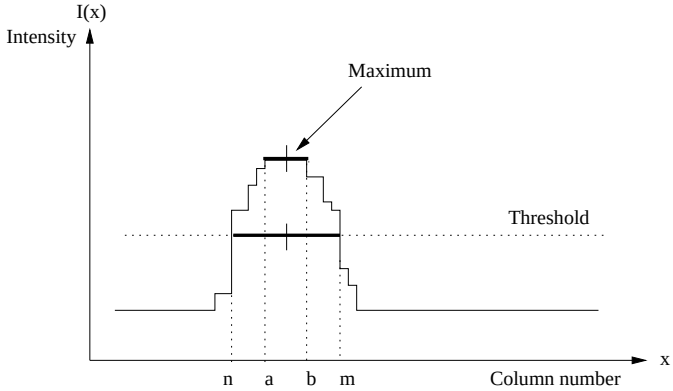


Abbildung 4.2: Signalverlauf einer Bildzeile (aus [Joh93])

(*Maximummethode*). Eine weitere Methode ist die Detektion über einfache *Schwellwertbildung*. Dabei wird das Bild (die Bildzeile) durch Schwellwertbildung *binärisiert*, sodaß die reflektierte Laserlinie den Wert 255, alle anderen Bildpunkte den Wert 0 zugewiesen bekommen. Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf des Signals nach Schwellwertbildung. Das Laserlicht ist dabei durch einen Beginn n und einem Ende m begrenzt. Die *Spitze (Peak)* des Signals wird durch Mittelung dieses Intervalles ermittelt, formal

$$p = \frac{n+m}{2}. \tag{4.1}$$

Der Nachteil dieser Methode ist, daß der gefundene Peak nicht dem realen entspricht und so das Ergebnis zu Schwingungen neigt.

Eine weitere einfache Technik geht von der Annahme aus, daß der Peak flach im Grauwertbild verläuft. Die Spitze des Signals wird dabei durch Mittelung des *Peakintervalles* berechnet, formal also

$$p = \frac{a+b}{2}. \tag{4.2}$$

Auch diese Methode neigt zu starken Schwingungen, da zu wenig Information in die Berechnung des Peaks einfließt. Ein weiterer Ansatz analysiert die komplette Bildzeile.

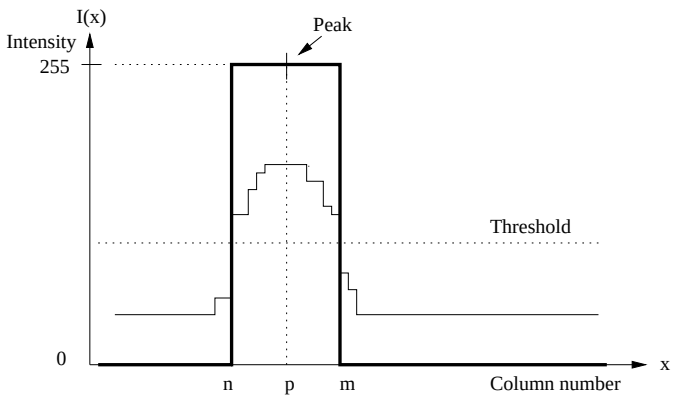


Abbildung 4.3: Signalverlauf nach Schwellwertbildung

Hierbei wird der Schwerpunkt (*center of gravity*) des Signals durch

$$p = \frac{\sum_{x=1}^{n} x \cdot I(x)}{\sum_{x=1}^{n} I(x)} \tag{4.3}$$

berechnet, wobei x die *Spaltennummer* und $I(x)$ der *Intensitätswert* des Signals an dieser Stelle ist. Durch Einbeziehung aller Pixel einer Zeile wird das Ergebnis durch Hintergrundbeleuchtung und Bildrauschen beeinflußt. Durch Glätten des Bildes vor der Berechnung, aber auch durch Kombination der Schwellwert- und der Schwerpunktmethode können diese störenden Einflüsse verringert werden. Ein weiteres Problem dieser Methode liegt darin, daß nur ein einzelner Schwerpunkt in jeder Bildzeile ermittelt wird. Dies ist jedoch im vorliegenden System nicht wünschenswert, da in einer Bildzeile mehrere lokale Maxima und damit lokale Schwerpunkte auftreten können, die durch die vorgeschlagene Berechnung verloren gehen. Dies kann jedoch durch die richtige Wahl der Beziehungen der Geräte untereinander vermieden werden. In Kapitel 3.2 ist eine solche Konfiguration angegeben.

In dieser Arbeit wurde ein kombinierte Ansatz der Schwellwert- und Schwerpunktmethode gewählt. Der Vorgang kann folgendermaßen formal beschrieben werden:

- Gegeben sind zwei Schwellwerte t_{up} und t_{down} mit

  $$0 \leq t_{down} < t_{up} \leq 255$$

- Die Berechnung des Schwerpunktes erfolgt durch

  $$p = \frac{\sum_{x \in \mathcal{J}} x \cdot I(x)}{\sum_{x \in \mathcal{J}} I(x)} \tag{4.4}$$

  mit $\mathcal{J} = \{x | t_{down} \leq I(x) \leq t_{up}\}$.

Durch die Detektion des projizierten Laserlichtes erhält man eine Menge $\mathcal{L}$ von Bildpunkten, die der perspektivischen Projektion der projizierten Laserlinie aus dem dreidimensionalen Objektkoordinatensystem auf das zweidimensionale Bildkoordinatensystem

(*Sensorelement* der Kamera) und weiter auf das zweidimensionale Rechnerkoordinatensystem entspricht.

Die Genauigkeit der Detektion des Zentrums der Laserlinie wurde experimentell in der Art, daß der zugrundeliegende Detektionsalgorithmus auf synthetische Daten angewandt wurde, überprüft. Die Daten wurden dabei so gewählt, daß das Signal als symmetrische *Binomialverteilung* mit eindeutigem Peak vorliegt. Die auf diesem Signal durchgeführte Analyse zeigt, daß der Peak mit dem kombinierten Ansatz im Falle einer symmetrischen Signalform in jedem Fall detektiert wurde. In einem weiteren Experiment wurde der Signalverlauf von der symmetrischen Binomialverteilung in eine *linksschiefe* Verteilungsform geändert. Hierbei zeigte der Detektionsalgorithmus je nach Grad der Verteilungsfunktion (Breite und Anstiegsverhalten) eine Detektionsungenauigkeit von 1 Pixel in x-Richtung. Das Ergebnis schwankte dabei in Subpixelgenauigkeit gemessen mit einem Fehler von maximal $+/-1$ Pixel in x-Richtung. Bei stark ausgeprägtem Peak war der Fehler deutlich geringer als bei weniger ausgeprägtem Peak. Die nachfolgende Tabelle faßt das Verhalten des Detektionsalgorithmus zusammen:

Verteilung	Peakintensität	mean	max
binomial	beliebig	0.000 pix	0.001 pix
linksschief	15	0.650 pix	0.983 pix
linksschief	128	0.542 pix	0.677 pix
linksschief	240	0.310 pix	0.413 pix

Die angewandten Verteilungen mit den Freiheitsgraden *Breite* und *Anstieg* sind in [PTVF94] beschrieben. Zur Erzeugung der synthetischen Daten wurde das Programmpaket MATLAB verwendet.

4.2 Rücktransformation eines einzelnen Bildpunktes

In diesem Abschnitt wird die Rücktransformation der detektierten Laserlichtpunkte in das Objektkoordinatensystem beschrieben. Die Rücktransformation basiert dabei auf der Technik des *"shape from structured light"* speziell dem *Lichtschnittverfahren*, welche auf dem *Triangulationsprinzip* beruht [Shi87]. Eine Definition des Verfahrens "shape from structured light" wird unter anderem in [HS89] gegeben. In [Joh93] wird das Lichtschnittverfahren analysiert. Je nach verwendeter Kamerakalibriertechnik wird die Vorgangsweise zur Rücktransformation beschrieben.

4.2.1 Verwendung der Parameter aus Tsai-Kalibrierung

Die Kalibrierung mittels der von Tsai in [Tsa86] vorgestellten Technik liefert Parameter der inneren (Bildhauptpunkt $(c_x, c_y)^T$, Linsenverzerrung κ_1, κ_2, fokale Länge f, Skalierungsfaktor s_x) und äußeren Orientierung (Kippungswinkel α, Neigungswinkel β, Kantungswinkel γ - beschrieben durch die Rotationsmatrix R, Translationsvektor T). Die Transformation eines Bildpunktes $(u_f, v_f)^T$ des Rechnerkoordinatensystems in das Objektkoordinatensystem erfolgt durch folgende Vorgangsweise:

1. *Transformation von Rechnerkoordinaten in verzerrte Bildkoordinaten:* Dies entspricht

$$\begin{pmatrix} u_f \\ v_f \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix}.$$

Die Berechnung erfolgt durch:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(u_f - C_x) \cdot d_x \cdot N_{cx}}{N_{fx} \cdot s_x} \\ (v_f - C_y) \cdot d_y \end{pmatrix} \tag{4.5}$$

2. *Transformation von verzerrten Bildkoordinaten in ideale Bildkoordinaten*: Dies ent-

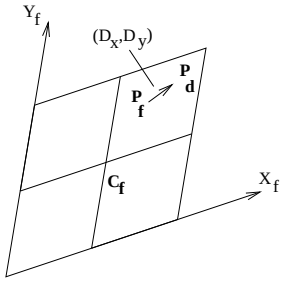


Abbildung 4.4: Transformation verzerrte in ideale Koordinaten

spricht

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix}.$$

Die Berechnung erfolgt durch:

$$r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \tag{4.6}$$
$$D_x = x_d \cdot (\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4) \tag{4.7}$$
$$D_y = y_d \cdot (\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4) \tag{4.8}$$

Nach Tsai [Tsa86] ist jedoch κ_2 vernachlässigbar, womit die Berechnung von D_x und D_y vereinfacht durch

$$D_x = x_d \cdot (\kappa_1 \cdot r^2) \tag{4.9}$$
$$D_y = y_d \cdot (\kappa_1 \cdot r^2) \tag{4.10}$$

gegeben ist. Die idealen, unverzerrten Bildkoordinaten werden dann durch

$$x_f = x_d - D_x \tag{4.11}$$
$$y_f = y_d - D_y \tag{4.12}$$

berechnet. Abbildung 4.4 zeigt den Zusammenhang zwischen den verzerrten und unverzerrten Koordinaten mit eingezeichnetem Verzerrungsvektor $(D_x, D_y)^T$.

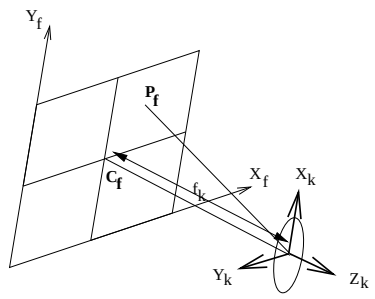


Abbildung 4.5: Transformation idealer Koordinaten in Kamerakoordinaten

3. *Transformation von idealen Bildkoordinaten in Kamerakoordinaten*: Dies entspricht:

$$\begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix}.$$

Unter der Annahme, daß das Kamerakoordinatensystem an der Bildebene ausgerichtet ist und der Ursprung des Kamerakoordinatensystems dem Linsenzentrum entspricht, kann die Transformation durch

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ -f \end{pmatrix} \tag{4.13}$$

angegeben werden. Abbildung 4.5 zeigt den geometrischen Zusammenhang zwischen den idealen Koordinaten und den Kamerakoordinaten.

4. *Transformation von Kamerakoordinaten in Objektkoordinaten*: Dies entspricht:

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix}$$

Aus Gleichung 2.1 folgt, daß diese Transformation durch

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = R^{-1} \cdot (\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} - T)$$

erfolgt. Da die Rotationsmatrix R orthogonal ist, kann die inverse Matrix R^{-1} durch transponieren der Matrix R, also durch Bildung von R^T, gebildet werden. Die Berechnung erfolgt also durch

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = R^T \cdot (\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} - T). \tag{4.14}$$

Die geometrische Beziehung zwischen Kamerakoordinaten und Kamerakoordinaten ist in Abbildung 2.3 auf Seite 11 zu sehen.

Die Berechnung der realen Objektkoordinaten eines auf die Bildebene projizierten Oberflächenpunktes aus den Bildkoordinaten erfolgt durch folgenden Algorithmus:

1. Transformation des Bildpunktes von Rechnerkoordinaten in Kamerakoordinaten
2. Transformation des Punktes und des Linsenzentrums von Kamerakoordinaten in das Objektkoordinatensystem
3. Bestimmung einer Geraden zwischen Bildpunkt und Linsenzentrum
4. Bestimmung des Schnittpunktes zwischen der Geraden und der Laserebene

Die Transformation vom Rechnerkoordinatensystem in das Kamerakoordinatensystem, bzw. des Kamerakoordinatensystems in das Objektkoordinatensystem wurde bereits beschrieben. Eine Gerade kann durch folgende Darstellung parametrisiert werden:

$$G = P + t \cdot Q \tag{4.15}$$

P ist ein Punkt auf der Geraden, Q der Richtungsvektor und t ein Skalar. In unserem Fall ist $P = (p_x, p_y, p_z)^T$ der Bildpunkt (transformiert in das Objektkoordinatensystem), der Richtungsvektor Q wird durch Differenz des Linsenzentrums $C = (c_x, c_y, c_z)^T$ und des Bildpunktes P bestimmt, also $Q = C - P$. Die Gleichung der Geraden (4.15) in Koordinatendarstellung lautet also:

$$\begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + t \cdot (\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{pmatrix}) \tag{4.16}$$

Die Bestimmung des Schnittpunktes der Geraden mit der Laserebene wird durch folgende Berechung vorgenommen:
Die Gerade schneidet die Laserebene genau dann, wenn die z-Koordinate der Geraden gleich der z-Koordinate der Laserebene ist, also ein t existiert, für das $g_z = d$ wird. Aus

$$p_z + t \cdot (p_z - c_z) = d$$

folgt

$$t = \frac{d - p_z}{p_z - c_z}. \tag{4.17}$$

Der 3D-Punkt P_w ergibt sich dann durch Einsetzen von t in

$$P_w = P + t \cdot Q. \tag{4.18}$$

Abschließend werden die Auswirkungen einer falschen Detektion eines Laserlichtpunktes im zweidimensionalen Kamerabild auf die rücktransformierten Objektkoordinaten dieses detektierten Punktes gezeigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden drei repräsentative Punkte der Laserlinie angeführt, die Untersuchung wurde jedoch mit der gesamten im Bild sichtbaren Laserlinie durchgeführt. Zur Analyse wurde die Laserlinie auf die Objektebene ($z = 0$) projiziert.

Beschreibung	$x = u_f$	$y = v_f$	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]
korrekter Punkt $P(x, y)$	72	118	0.0	0.0	0.0
$P(x-1, y)$	71	118	0.2	0.1	0.8
$P(x+1, y)$	73	118	0.2	0.2	0.8
$P(x, y-1)$	72	117	0.8	0.5	1.2
$P(x, y+1)$	72	119	0.9	0.5	1.0
korrekter Punkt $P(x, y)$	256	242	0.0	0.0	0.0
$P(x-1, y)$	255	242	0.1	0.1	0.6
$P(x+1, y)$	257	242	0.1	0.2	0.8
$P(x, y-1)$	256	241	0.6	0.4	1.1
$P(x, y+1)$	256	243	0.7	0.4	1.1
korrekter Punkt $P(x, y)$	422	355	0.0	0.0	0.0
$P(x-1, y)$	421	355	0.1	0.2	0.9
$P(x+1, y)$	423	355	0.1	0.2	0.9
$P(x, y-1)$	422	354	0.4	0.45	1.0
$P(x, y+1)$	422	356	0.5	0.5	1.1

Die Analyse zeigt, daß bei der Rücktransformation mittels Tsai ein maximaler Fehler von 1 mm in x-Richtung, 0.5 mm in y-Richtung und 1.2 mm in z-Richtung auftritt. Die Auswertung des Fehlers in Zusammenhang mit der topologischen Lage des rücktransformierten Punktes zeigte weiters, daß der Fehler in der Bildmitte geringer ist, als an den Bildrändern, was auch durch Berücksichtigung des Verzerrungskoeffizienten nicht kompensiert werden konnte. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß die Bildschärfe auf die Bildmitte hin ausgerichtet wurde und damit die Detektion der Laserlinie am Rand des Bildes ungenauer wurde.

4.2.2 Verwendung der 3x4-DLT-Matrix

Die Kalibrierung mittels direkter linearer Transformation resultiert in einer 3×4-Matrix A, welche eine Transformation dreidimensionaler Objektpunkte X_w in zweidimensionale Bildpunkte Y ermöglicht. Formal, sei $X_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ ein Punkt im dreidimensionalen Objektkoordinatensystem in seiner homogenen Darstellungsform, $Y = (u_f, v_f, 1)^T$ ein Punkt im zweidimensionalen Rechnerkoordinatensystem, so ist diese Transformation durch

$$Y' = \begin{pmatrix} u'_f \\ v'_f \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \tag{4.19}$$

und

$$Y = \begin{pmatrix} u_f \\ v_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u'_f/s \\ v'_f/s \\ s/s \end{pmatrix} \tag{4.20}$$

gegeben. Der Spalten- und Zeilenrang der Matrix A ist unterschiedlich, weshalb A nicht invertierbar ist. Damit verbunden ist auch ein Verlust von Information über das Objektkoordinatensystem, genauer, es findet eine *Dimensionsreduktion* statt. Die Objektkoordinaten eines gegebenen Bildpunktes können nur durch zusätzliches Wissen ermittelt werden.

Im Fall des Lichtschnittverfahrens liegt dieses Zusatzwissen in der Laserlichtebene und der bekannten z-Komponente der Objektebene.

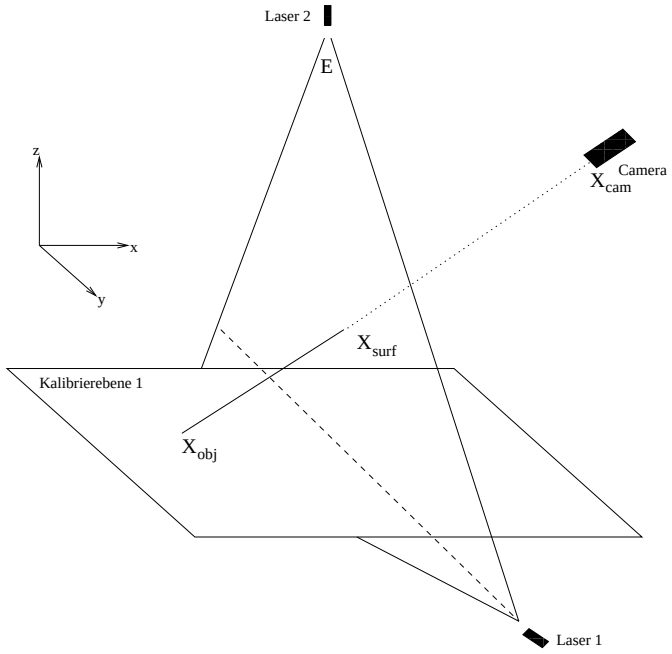


Abbildung 4.6: Berechnung eines Oberflächenpunktes

Ein Bildpunkt kann durch folgende Vorgangsweise in seine Objektkoordinaten transformiert werden. Gegeben sind die Rechnerkoordinaten $(u_f, v_f)^T$, die bekannte z-Komponente der Objektebene, die Parameterform der Lichtebene, sowie die DLT-Matrix A. Die Transformation der Rechnerkoordinaten in die Objektebene erfolgt mit Hilfe der DLT-Matrix:

1. $(a_1, a_2, a_3, a_4) = (1, 0, -u_f) \cdot A$
2. $(b_1, b_2, b_3, b_4) = (0, 1, -v_f) \cdot A$
3. $(m_1, m_2, m_3) = (a_1, a_2, a_3 \cdot z + a_4) \times (b_1, b_2, b_3 \cdot z + b_4)$
4. $x_w = \frac{m_1}{m_3}$
5. $y_w = \frac{m_2}{m_3}$
6. dreidimensionaler Punkt $X_{obj} = (x_w, y_w, z_w)^T = (x_w, y_w, z)^T$

Sei X_{cam} der detektierte Oberflächenpunkt am Kamerasensor und X_{obj} der auf die Objektebene transformierte Kamerapunkt. Die realen Koordinaten des gesuchten Punktes X_{surf} ergeben sich durch Schnitt der Geraden $L = X_{obj} - t \cdot (X_{cam} - X_{obj})$ mit der Laserebene E. Dieser Vorgang ist in Abbildung 4.6 graphisch dargestellt. Für den Schnittpunkt X_{surf}

gilt folgende Berechnung:
X_{surf} ist jener Punkt für den $L = E$ gelten muß, also

$$X_{obj} = t \cdot (X_{cam} - X_{obj}) = P + \lambda \cdot (R - P) + \mu \cdot (S - P). \tag{4.21}$$

Anders angeschrieben ergibt sich das lineare Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \\ z_{obj} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = t \cdot \begin{pmatrix} x_{cam} - x_{obj} \\ y_{cam} - y_{obj} \\ z_{cam} - z_{obj} \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} x_r - x_p \\ y_r - y_p \\ z_r - z_p \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} x_s - x_p \\ y_s - y_p \\ z_s - z_p \end{pmatrix}, \tag{4.22}$$

welches nach t, λ und μ aufgelöst werden kann. Seien t_0, λ_0 und μ_0 Lösungen dieses Systems, dann ist X_{surf} durch

$$X_{surf} = X_{cam} + t_0 \cdot (X_{obj} - X_{cam}) \tag{4.23}$$

beziehungsweise

$$X_{surf} = P + \lambda_0 \cdot (R - P) + \mu_0 \cdot (S - P) \tag{4.24}$$

gegeben.

Die Auswirkungen einer falschen Detektion eines Laserlichtpunktes im zweidimensionalen Kamerabild auf die mittels DLT rücktransformierten Objektkoordinaten werden in der nachfolgenden Tabelle gezeigt. Um die negativen Auswirkungen mit jenen der Tsai-Rücktransformation vergleichen zu können wurden die selben Repräsentanten gewählt, wie in der vorangegangenen Untersuchung der negativen Auswirkungen bei der Tsai-Rücktransformation. Die Untersuchung des Fehlers erfolgte durch Analyse einer auf die Objektebene ($z = 0$) projizierten Laserlinie.

Beschreibung	$x = u_f$	$y = v_f$	d_x	d_y	d_z
korrekter Punkt $P(x, y)$	72	118	0.0	0.0	0.0
$P(x-1, y)$	71	118	0.2	0.1	0.8
$P(x+1, y)$	73	118	0.2	0.1	0.8
$P(x, y-1)$	72	117	0.9	0.5	1.2
$P(x, y+1)$	72	119	0.9	0.5	1.2
korrekter Punkt $P(x, y)$	256	242	0.0	0.0	0.0
$P(x-1, y)$	255	242	0.1	0.05	0.7
$P(x+1, y)$	257	242	0.1	0.06	0.8
$P(x, y-1)$	256	241	0.7	0.4	1.2
$P(x, y+1)$	256	243	0.7	0.4	1.1
korrekter Punkt $P(x, y)$	422	355	0.0	0.0	0.0
$P(x-1, y)$	421	355	0.02	0.01	0.8
$P(x+1, y)$	423	355	0.02	0.01	0.8
$P(x, y-1)$	422	354	0.45	0.45	1.2
$P(x, y+1)$	422	356	0.5	0.5	1.1

Die Analyse zeigt, daß bei der Rücktransformation mittels DLT ein maximaler Fehler von 1 mm in x-Richtung, 0.5 mm in y-Richtung und 1.2 mm in z-Richtung auftritt. Eine weitere Auswertung, bei der wiederum die topologische Lage des rücktransformierten Punktes mitberücksichtigt wurde zeigte, daß der Fehler annähernd linear mit der Entfernung des rücktransformierten Punktes zum Linsenzentrum steigt.

4.3 Oberflächenrekonstruktion durch schrittweise Abtastung

Das Ergebnis der Detektion der auf die Objektoberfläche projizierten Laserlinie ist eine Menge $\mathcal{L}$ von zweidimensionalen Bildpunkten. Durch Transformation dieser Punkte in die Objektebene und weiters in die Laserebene erhält man eine Menge $\mathcal{L}_{surf}$ von dreidimensionalen Punkten, welche den realen Koordinaten der angestrahlten Oberflächenpunkte entsprechen.

In diesem Abschnitt werden die Berechnungsschritte zur Oberflächenrekonstruktion durch *Linear*- und durch *Rotationsbewegung* erläutert, wodurch eine schrittweise Abtastung der Objektoberfläche und damit eine Oberflächenrekonstruktion möglich wird.

4.3.1 Rekonstruktion durch Linearbewegung

Bei dieser wird das Objekt linear durch die Laserebene geführt. Dabei werden jene Teile der Oberfläche aufgenommen, die nicht durch Kameraverdeckungen (siehe Abbildung 3.3) verdeckt sind. Zur Bewegung des Objektes ist eine Vorrichtung notwendig, mit der das Objekt mit definierten Schrittweiten durch die Lichtebene geführt werden kann.

Sei $T_{i,rel}$ jener Bewegungsvektor, der die lineare relative Bewegung im $i-$ten Aufnahmeschritt beschreibt. Der rücktransformierte Oberflächenpunkt X_{surf} beschreibt dabei eine Bewegung mit dem Betrag $|T_{i,rel}|$ in Bewegungsrichtung $T_{i,rel}$. Die realen Objektkoordinaten sind dann durch

$$X_{real} = X_{surf} - T_{i,rel} - T_{abs} \tag{4.25}$$

Mit T_{abs} ist hierbei die gesamte bisherige Bewegung bezeichnet, formal

$$T_{abs} = \sum_{j=1}^{i-1} T_{j,rel} \tag{4.26}$$

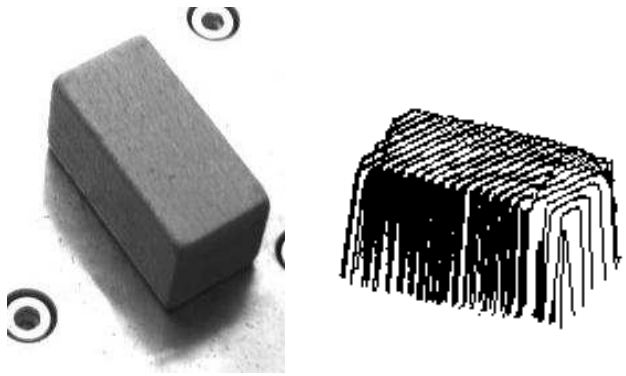
Ist die Bewegungsrichtung T_{rel} und der Bewegungsbetrag $|T_{rel}|$ in jedem Schritt gleich (äquidistant), so können die realen Objektkoordinaten durch

$$X_{real} = X_{surf} - (i-1) \cdot T_{rel} \tag{4.27}$$

berechnet werden, wobei i den $i-$ten Schritt bezeichnet.

Eine Untersuchung der linearen Bewegung zur Rekonstruktion von Objektoberflächen wurde in [Lis98] durchgeführt. Die Abbildung 4.7(b) einer Rekonstruktion eines Quaders mit den Abmessungen 6x3x3 cm ist dieser Untersuchung entnommen. Das Originalobjekt ist in Abbildung 4.7(a) zu sehen.

Bei Verwendung der DLT-Matrix, die keine Linsenverzerrung berücksichtigt, ist die Genauigkeit der Rekonstruktion von der Positionierung des aufzunehmenden Objektes abhängig.



(a) Original (b) Rekonstruktion

Abbildung 4.7: Rekonstruktion durch lineare Abtastung

Wird das Objekt derart positioniert, daß es nahe den Bildrändern der Kamera projiziert wird, so beträgt der maximale Fehler der Rücktransformation bis zu 8 mm. Wird das Objekt derart ausgerichtet, daß es beim Aufnahmeprozeß nahe der Bildmitte projiziert wird, beträgt maximale Fehler der rekonstruierten Objektoberflächen maximal 1 mm in der x-z-Ebene und 1.8 mm in der y-z-Ebene des Objektes.

Bei der Oberflächenrekonstruktion durch lineare Abtastung werden nur die für die Kamera sichtbaren Oberflächen aufgenommen, womit nur maximal die Hälfte der gesamten Objektoberfläche akquirierbar ist.

4.3.2 Rekonstruktion durch Rotationsbewegung

Durch Verwendung eines Rotationstellers zur Bewegung des Objektes durch die Laserebene können die Nachteile der Oberflächenrekonstruktion durch lineare Abtastung verringert werden. Die Bewegung des Objektes erfolgt dabei durch Drehung des Objektes. Oberflächenteile, die zuvor durch Kameraverdeckungen (siehe Abbildung 3.3) nicht akquirierbar waren, werden durch die Drehung in den Aufnahmebereich bewegt und damit für die Kamera akquirierbar.

Zur Berechnung der realen Objektkoordinaten werden die detektierten und rücktransformierten Objektpunkte mit dem absoluten Drehwinkel um die z-Achse gedreht. Der absolute Drehwinkel ist dabei jener Winkel, der zwischen der Nullage und der aktuellen Lage eines Oberflächenpunktes liegt (siehe Abbildung 4.8). Durch diese Vorgangsweise erhält man für jeden detektierten und rücktransformierten Oberflächenpunkt die dreidimensionalen Koordinaten des Punktes in Nullage.

Sei X_{surf} jener Punkt, der aus der Rücktransformation des im Kamerabild detektierten zweidimensionalen Punktes X_{cam} berechnet wurde. Sei weiters $\phi_{i,abs}$ der absolute Drehwinkel im $i-$ten Schritt, der aus der Summe aller Drehwinkel der bisherigen i Auf-

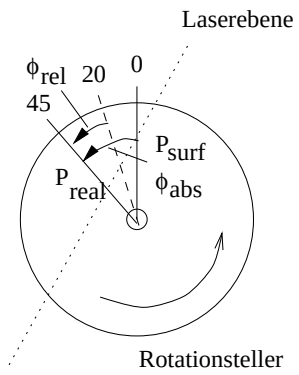


Abbildung 4.8: Rotationsbewegung

nahmeschritte resultiert, formal:

$$\phi_{i,abs} = \sum_{j=1}^{i} \phi_{j,rel} \tag{4.28}$$

Die Drehung des Punktes X_{surf} um die z-Achse und somit die Berechnung der realen Koordinaten in Nullage X_{real} erfolgt durch

$$X_{real} = R_z(-\phi_{i,abs}) \cdot X_{surf}, \tag{4.29}$$

wobei R_z, die Rotationsmatrix für Drehungen um die z-Achse angibt (siehe Formel 2.4). Bei Verwendung äquiangularer Winkel ϕ_{rel} ergibt sich für den $i-$ten Aufnahmeschritt

$$X_{real} = R_z(-\phi_{rel} \cdot (i-1)) \cdot X_{surf} \tag{4.30}$$

zur Berechnung der realen Koordinaten.

4.4 Bewertung von Oberflächenrekonstruktionen

Die Rekonstruktion einer Oberfläche kann durch folgende Vorgangsweisen bewertet werden:

- metrische Bewertung
- algorithmische Bewertung

Bei der *metrischen* Bewertung werden die geometrischen Eigenschaften der rekonstruierten Oberfläche bzw. Teile der rekonstruierten Oberfläche analysiert und mit bekannten Abmessungen, welche durch Verwendung eines kalibrierten Objektes gewonnen werden, verglichen. Die *algorithmische* Bewertung gibt die theoretisch erreichbare Genauigkeit der Oberflächenrekonstruktion basierend auf der Analyse der zugrunde liegenden Algorithmen zur Rücktransformation von Bildkoordinaten in Objektkoordinaten an. Eine weitere Vorgangsweise, die aufgrund ihrer Komplexität jedoch zur Bewertung von Oberflächenrekonstruktionen selten angewandt wird, ist die *parametrische* Bewertung, bei der die

rekonstruierte Oberfläche durch mathematische Modelle, wie z.B. planar patches oder Polygon meshes, beschrieben und mit der Parametrisierung eines kalibrierten Objektes verglichen wird [Wat93].

In weiterer Folge wird ein Verfahren zur Bewertung von Oberflächenrekonstruktionen beschrieben, das eine Mischform der metrischen und algorithmischen Bewertung darstellt. Dazu werden diese beiden Bewertungsverfahren kurz vorgestellt.

4.4.1 Metrische und algorithmische Bewertung

Die *metrische Bewertung* läuft auf die Beurteilung der metrischen Genauigkeit der vorliegenden Rekonstruktion hinaus. Dazu wird ein Objekt mit bekannten Abmessungen akquiriert. Die Rekonstruktion dieses Objektes kann folgendermaßen überprüft werden:

- Untersuchung der Ergebnisse *jedes einzelnen Akquirierungsschrittes*: Bei dieser wird, je nach angewandter Akquirierungstechnik, jedes Einzelergebnis überprüft und so aus der Gesamtheit der Verarbeitungsschritte Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Rekonstruktion gezogen. Im Fall des Lichtschnittverfahrens ist dies die Überprüfung der Genauigkeit der einzelnen Profilschnitte. Bei Verwendung eines kalibrierten Objektes, also einem Objekt mit bekannten Abmessungen, kann so der Fehler der Rekonstruktion abgeschätzt werden.

- Untersuchung der *akquirierten Objektoberfläche*: Bei dieser wird die akquirierte Oberfläche berechnet und mit der als bekannt vorausgesetzten tatsächlichen Objektoberfläche verglichen. Diese Vorgangsweise ist im Fall des Lichtschnittverfahrens nur begrenzt einsetzbar, da die durch zwei Profilschnitte begrenzte Fläche nur näherungsweise bestimmt werden kann. Zur Bestimmung der eingeschlossenen Fläche werden die beiden Profilschnitte durch Triangulierung miteinander verbunden. Durch die Triangulierung wird die Oberfläche in Dreiecke unterteilt, deren Flächen zur Bestimmung der gesamten Objektoberfläche aufsummiert werden.

- Untersuchung des *resultierenden Volumens*: Diese ist der quantitativen Oberflächenbewertung ähnlich. Hierbei wird versucht das Volumen des akquirierten Objektes zu ermitteln und mit dem tatsächlichen Volumen des Objektes verglichen. Die Bestimmung des Volumens ist mit dem in dieser Arbeit verwendeten Lichtschnittverfahren nicht möglich.

Bei der *algorithmischen Bewertung* werden die für die Rekonstruktion angewandten Algorithmen analysiert. Dabei wird versucht, die numerische Stabilität und damit das Fehlerverhalten der zugrundeliegenden Transformationen zu ermitteln. Der Fehler der durch eine Änderung δ an den Eingabedaten auf die Ausgabedaten wirkt kann unmittelbar angegeben werden. In Abschnitt 4.2.1 ist dieser Fehler in Abhängigkeit von $\delta = 1$ Pixel in x- bzw. y- Richtung für die Rücktransformation nach Tsai und in Abschnitt 4.2.2 für die DLT-Rücktransformation angegeben.

4.4.2 Bewertung der rekonstruierten Oberfläche

In dieser Arbeit wird die rekonstruierte Oberfläche durch Analyse der zugrundeliegenden Profilschnitte bewertet. Durch den Kalibrierfehler E_K und dem Detektionsfehler E_D kann ein Toleranzintervall angegeben werden, welches eine Aussage bezüglich einer *guten* bzw. *schlechten* Rekonstruktion zuläßt, abhängig davon, ob die einzelnen Oberflächenpunkte in diesem Intervall liegen oder nicht.

Die Berechnung des Toleranzintervalles erfolgt durch folgende Vorgangsweise:

1. Ermittlung der maximalen Detektionsgenauigkeit des Lasers
2. Ermittlung des mittleren Rücktransformationsfehlers E_A in x-, y- und z-Richtung
3. Angabe des Toleranzintervalles für die einzelnen Koordinatenachsen:

$$[x - E_{Ax}; x + E_{Ax}],$$

$$[y - E_{Ay}; y + E_{Ay}],$$

$$[z - E_{Az}; z + E_{Az}]$$

Fallen rücktransformierte Oberflächenpunkte aus dem Toleranzintervall, so kann dies unterschiedliche Ursachen haben:

- Der rücktransformierte Oberflächenpunkt ist ein *Ausreißer*, das heißt, er hebt sich von seiner Umgebung ab. Ausreißer entstehen im vorliegenden Fall hauptsächlich durch temporäre numerische Instabilitäten, sowie Reflektionen der Laserlinie außerhalb der Laserebene.
- Der rücktransformierte Oberflächenpunkt fügt sich zu einer Reihe weiterer intervallüberschreitender Oberflächenpunkte hinzu. Dies entsteht hauptsächlich durch eine zu geringe Tiefenschärfe, das heißt, die Blende der Kamera ist zu weit geöffnet, weshalb nur bestimmte Regionen scharf auf die Bildebene abgebildet werden. Da Unschärfebereiche den Kalibriervorgang unmittelbar beeinflussen, sollte in diesem Fall das System rekalibriert werden.
- Der Großteil der rücktransformierten Oberflächenpunkte fällt aus dem Toleranzintervall. In diesem Fall ist eine Rekalibrierung unerläßlich, da aufgrund der großen Fehlerdichte eine Falschkalibrierung anzunehmen ist.

Die Oberflächenrekonstruktion aus Abbildung 4.7 wurde durch das System folgendermaßen bewertet:

Schritt	Anteil	Klassifikation
1	61.3 %	Anfangsprofilschnitt
6-11	12.4-13.2 %	mglw. Rekalibrierung
15	5.1 %	Ausreißer
17	5.1 %	Ausreißer
20-23	6.2 %	Ausreißer
24	68.4 %	Rekalibrierung
25	71.4 %	Rekalibrierung
26	74.1 %	Endprofilschnitt

Die Analyse der Auswertung zeigt, daß die Oberflächenrekonstruktion in jenen Regionen fehleranfällig ist, deren Profilschnitte aus einer geringeren Anzahl von rücktransformierten Oberflächenpunkten bestehen. Die schlechte Bewertung des ersten und der letzten drei Profilschnitte resultiert aus der Tatsache, daß in diesen Aufnahmeschritten die Detektion der Laserlinie erschwert ist, da nur eine geringe Anzahl von Oberflächenpunkten diese Linie reflektierten.

Kapitel 5

Next View Planning

Die für die Rekonstruktion der sichtbaren Oberfläche eines Objektes benötigte Anzahl von Aufnahmeschritten zur Erfassung des Objektes, sowie die Orientierung der Kamera zum Objekt in jedem dieser Aufnahmeschritte, ist für beliebige Objekte zu Beginn des Aufnahmeprozesses nicht bekannt [MB93, Tar95]. 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 und somit eine Beziehung zwischen dem zu erfassenden Objekt und dem Sensor herstellen [TAT95]. Diese Techniken sind unter dem Begriff *Next-View-Planning* zusammengefaßt.

In diesem Kapitel wird, neben der Vermittlung der Grundlagen zu *Next View Planning (NVP)*, eine einfache Form einer NVP-Technik motiviert und entwickelt, die eine Bestimmung des NBV aufgrund von Strukturveränderungen der aufzunehmenden Oberfläche erlaubt. Die entwickelte Technik wird abschließend in einen Algorithmus zur adaptiven Bildgewinnung eingearbeitet.

5.1 Überblick

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über Verfahren zur Lösung des NBV-Problemes gegeben. Die Lösungsprinzipien lassen sich dabei in drei Kategorien einteilen [TAT95], wobei diese einander nicht notwendigerweise ausschließen müssen. In weiterer Folge werden die drei Lösungsprinzipien kurz zusammengefaßt:

1. Lösung über die *Analyse von Verdeckungen*: Die nächste Kamera- bzw. Sensorposition relativ zum Objekt wird so gewählt, daß die Anzahl der unbekannten Regionen im Ergebnis minimiert wird. In jedem Aufnahmeschritt wird dabei die Rekonstruktion der Objektoberfläche vervollständigt. In den Arbeiten [Mav92, MB93] und [Mav96] werden zunächst die verdeckten Regionen als gefüllte Polygone interpretiert. Danach wird für jedes Pixel dieser Polygone die Menge jener Aufnahmepositionen und -winkel bestimmt, mit denen dieses Pixel sichtbar ist. Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine Menge von *Sichtbarkeitsintervallen*. Mit diesen Intervallen wird ein *Histogramm*, dessen Dimension der Anzahl zur Verfügung stehender Frei-

heitsgrade entspricht, eingetragen und die nächste Aufnahmeposition durch Zerlegung dieses Histogramms bestimmt. Andere Arbeiten, die auf diesem Prinzip aufsetzen und dieses zum Teil erweitern sind bspw. [SGR96] und [RAS97]. Während in [Mav92, MB93, Mav96, SGR96] und [RAS97] *Range Images* analysiert werden, erfolgt bei [POS97] die Auswertung anhand eines *Volumsmodelles*.

2. Lösung über *geometrische Oberflächeneigenschaften*: Bei dieser werden geometrische Randbedingungen, wie zum Beispiel die Beschaffenheit (Struktur) der Objektoberfläche) zur Berechnung der nächsten Kamera- bzw. Sensorposition herangezogen. In [MBV96] ist die Struktur der Oberfläche in Form von triangulierten Oberflächendaten gegeben. Die Oberfläche wird durch schrittweise Verfeinerung vervollständigt, indem Regionen, welche eine stärkere Strukturierung aufweisen genauer gescannt werden. In der Arbeit von [SP91] erfolgt die Berechnung durch *Volumsschnitt* (*volume intersection*) und Ermittlung der Hauptachse der aufgenommen Silhouette.

3. Lösung durch *Heuristiken* bzw. *Optimierungsprobleme*: Bei dieser wird die Ermittlung der nächsten Aufnahmeposition als Optimierungsproblem formuliert. Dabei wird die Menge der in Frage kommenden nächsten Aufnahmepositionen durch *heuristische Suche* eingeschränkt und die beste Position durch Maximierung einer *objective function*, welche jede Aufnahmeposition eindeutig bewertet, ermittelt. Die Arbeiten von [SGR96] und [ZMHN97] behandeln die Optimierung der Verdeckungsanalyse durch Heuristiken und objective functions.

In dieser Arbeit wird das NBV-Problem durch Analyse der geometrischen Oberflächeneigenschaften gelöst, da das gegebene Aufnahmesystem nur einen Bewegungsfreiheitsgrad zuläßt. Die Analyse der Verdeckungen liefert Informationen über Ort und Lage von Verdeckungen in der Aufnahmeszene. Diese Informationen sind entweder zwei- oder dreidimensional. Um diese Verdeckungen zu reduzieren sind somit mindestens zwei Bewegungsfreiheitsgrade notwendig, weshalb die Anwendung dieser Verfahren bei dem vorliegenden System nicht zielführend ist.

5.2 Grundlagen

Die optimale Anzahl von Aufnahmen und deren Aufnahmenorientierung ist nach [TAT95] abhängig von der

- *Oberflächenstruktur:* Je nach Beschaffenheit einer Objektoberfläche sind in einer einzelnen Aufnahme eines Objektes Teile der Oberfläche verdeckt [Tar95]. Die Arten von Verdeckungen wurden bereits im Kapitel 3.2 veranschaulicht. Um eine komplette Erfassung der sichtbaren Objektoberfläche zu ermöglichen sind 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 sichtbare Oberfläche für die gestellten Anforderungen am *besten* rekonstruiert werden kann.

Je nach gewähltem Lösungsansatz des NBV-Problemes wird mindestens eine der beiden Charakterisierungen zutreffend sein. In dieser Arbeit wird eine Reduktion der Aufnahmeanzahl angestrebt, wobei jedoch die gestellten Anforderungen an die Oberflächenrekonstruktion erfüllt werden.

Die Berechnung des NBV liefert einen Bewegungsvektor, dessen Dimension der Anzahl der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade entspricht. In der vorliegenden Arbeit ist dies ein eindimensionaler Bewegungsvektor, der den nächsten Rotationswinkel angibt.

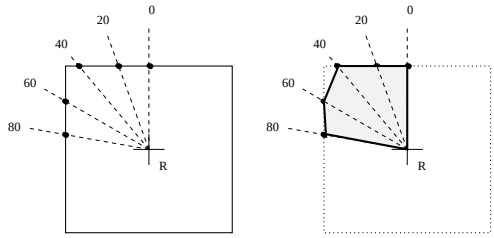
5.3 Next View Planning zur adaptiven Bildgewinnung

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

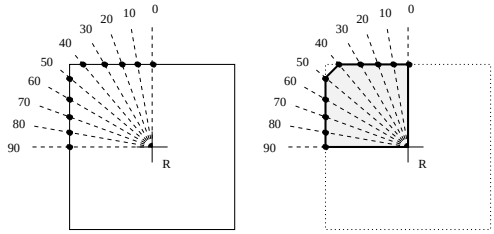
- Der Rotationsteller erlaubt eine Rotation des Objektes um die z-Achse, das heißt eine Bewegung mit *1 Freiheitsgrad.*

- Die CCD-Kamera und die beiden Laserdioden sind fix montiert.

- Als Aufnahmetechnik wird "Shape from structured light", speziell die Lichtstreifenprojektion verwendet.



(a) Abtastwinkel 20 Grad



(b) Abtastwinkel 10 Grad

Abbildung 5.1: Informationsverlust durch äquiangulare Winkel

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 5.1 gibt zwei Beispiele eines Verlustes von Information im zweidimensionalen Fall. Durch Abtastung des abgebildeten Quadrates mit einem konstanten Abtastwinkel von 20 Grad (Abbildung 5.1(a)) geht zwischen den Abtastung bei 40 und 60 Grad eine Ecke verloren. Durch Wahl eines kleineren Abtastwinkels (in Abbildung 5.1(b) wurde ein konstanter Abtastwinkel von 10 Grad verwendet) geht zwar ebenfalls Information verloren, der Fehler im Endergebnis ist jedoch geringer. Die Genauigkeit der Rekonstruktion kann durch Verringerung des Abtastwinkels erhöht werden, wobei jedoch auch die Komplexität und damit der Berechnungsaufwand ansteigt.

5.3.1 Komplexität des NBV

Die Anzahl der maximal möglichen Abtastungen ist abhängig von der Auflösung der Kamera, die wiederum den kleinsten sinnvollen Rotationswinkel impliziert. Die Auflösung der Kamera berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen fokaler Länge f und dem Abstand D des Zentrums eines Sensorelementes zum Zentrum eines benachbarten Elementes zur Distanz eines Oberflächenpunktes zum Projektionszentrum, formal

$$\frac{f}{D} = \frac{d}{A} \Leftrightarrow A = \frac{d \cdot D}{f}. \tag{5.1}$$

Die Auflösung A einer Kamera ist somit eine von d abhängige Funktion $A(d)$. Abbildung 5.2 zeigt das Modell der Lochkamera mit den eingezeichneten Parameter zur Be-

stimmung der Auflösung der Kamera.

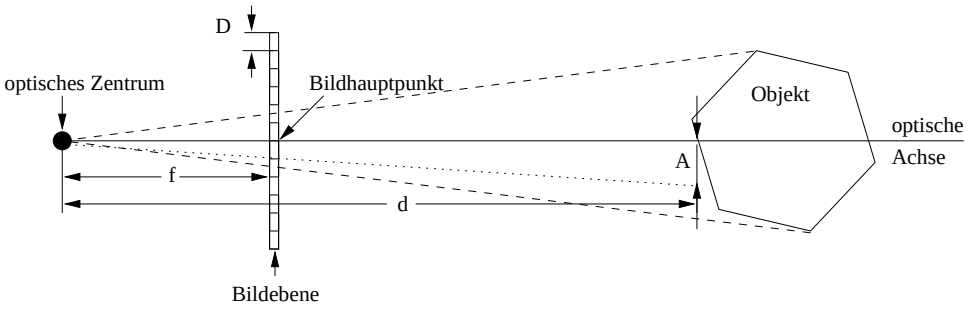


Abbildung 5.2: Auflösungsvermögen einer Lochkamera

Die Berechnung des kleinsten von A abhängigen Rotationswinkels ϕ_{min} erfolgt durch

$$\phi_{min} = \arctan \frac{r}{A}, \tag{5.2}$$

wobei r der Abstand des Oberflächenpunkte zum Rotationszentrum ist. Abbildung 5.3 zeigt die geometrischen Zusammenhänge.

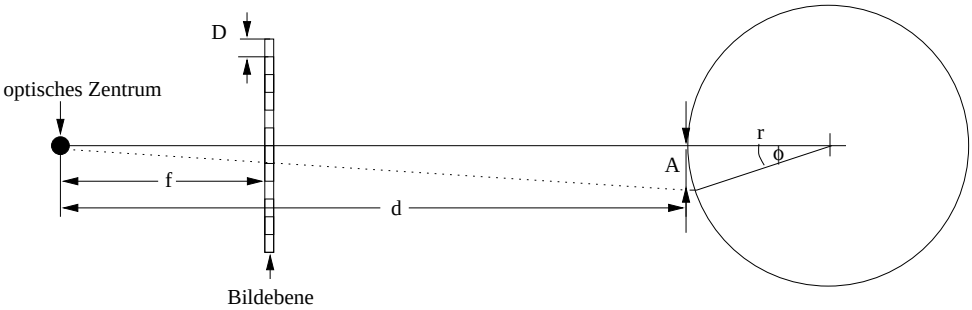


Abbildung 5.3: kleinster sinnvoller Rotationswinkel

Durch ϕ_{min} ist die maximale sinnvolle Anzahl von Aufnahmen nach oben durch

$$N_{max} = \frac{360}{\phi_{min}} \tag{5.3}$$

beschränkt. Sei n die maximale gewünschte Anzahl von Aufnahmen zur Rekonstruktion einer Oberfläche. Dann ist nach [Tar95] die Komplexität der Lösung des NBV-Problemes durch

$$C_{NBV} = \sum_{i=1}^{n} \binom{N_{max}}{i} \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{max}^{(N_{max}+.5)}}{(N_{max}-i)^{(N_{max}-i+.5)} n^{(i+.5)}}, \tag{5.4}$$

gegeben. Das NBV-Problem wurde dabei als das allgemeine Mengentheorieproblem der Bestimmung einer minimalen Teilmenge T einer Menge S, formal $T \subset S$, welche die

Menge S komplett beschreibt, gesehen. Das Finden einer solchen minimalen Teilmenge gehört jedoch in die Klasse der NP-vollständigen Probleme, das heißt, das NBV-Problem, formuliert als das Finden einer minimalen Teilmenge von Aufnahmepositionen, die eine komplette Rekonstruktion der zu akquirierenden Oberfläche erlaubt, ist nicht unter *polynomialen Aufwand* zu lösen. Es müssen daher Algorithmen gefunden werden, mit denen die Anzahl der möglichen nächsten Aufnahmepositionen verringert werden.

Bei einer gegebenen Aufnahmeposition i_j kann die darauffolgende Position i_{j+1} beliebig aus der Menge der möglichen, in den Schritten $i_{1..j-1}$ noch nicht gewählten Positionen, ausgewählt werden. Eine Einschränkung der Komplexität ist durch Vorgabe eines maximal zulässigen Winkels ϕ_{max} gegeben. Dadurch wird die Anzahl der möglichen Positionen i_{j+1} einer Ausgangsposition i_j auf $\frac{\phi_{max}}{\phi_{min}}$ reduziert. Durch Vorgabe einer *Bewegungsrichtung* kann die Komplexität weiter vermindert werden, da dadurch die Anzahl der möglichen Positionen weiter eingeschränkt werden kann.

5.3.2 Berechnungsgrundlagen zum NBV

Wie bereits im letzten Abschnitt gezeigt, ist das Auflösungsvermögen A und damit der kleinste sinnvolle Drehwinkel ϕ_{min} eine von der Distanz d und r abhängige Größe (siehe Formel 5.1 und 5.2). Weiters wurde gezeigt, daß der Verlust von Oberflächendetails vom Abstand dieser Region zum Rotationszentrum abhängt. Regionen die weiter von diesem Rotationszentrum entfernt sind, haben einen höheren Informationsgehalt, als Regionen, die näher zu diesem Zentrum liegen (siehe Abbildung 5.1). Es ist daher notwendig, entfernter liegende Regionen dichter abzutasten.

Zu diesem Zweck wird im zweidimensionalen Fall eine Distanzfunktion $d(P)$ gebildet, welche für jeden absoluten Rotationswinkel ϕ_{abs} die Distanz des Randpunktes P des abzutastenden zweidimensionalen Objektes zum Rotationszentrum R zurückliefert. Der Abstand zwischen P und R wird dabei durch die *euklidische* Distanz berechnet, also

$$d(P) = |P - R| = \sqrt{(p_x - r_x)^2 + (p_y - r_y)^2}. \tag{5.5}$$

Der Informationsgehalt eines Randpunktes ist durch die absolute Steigung der Distanzfunktion $d(P)$ in diesem Punkt charakterisiert, formal

$$g = d'(P).$$

Weitere Punkte mit hohem Informationsgehalt sind jene, bei denen die Distanzfunktion unstetig ist. Zur Berechnung des nächsten Aufnahmewinkels wird somit eine Berechnungsfunktion F, die eine Beziehung zwischen $d'(P)$ und einem Rotationswinkel ϕ_{next} herstellt benötigt. Eine solche Funktion ist formal durch

$$\phi_{next} = F(g) = F(d'(P)) \tag{5.6}$$

gegeben. Der Verlauf der Distanzfunktion und damit die erste Ableitung ist während des Akquirierungsprozesses nicht bzw. nur teilweise bekannt. Die erste Ableitung kann

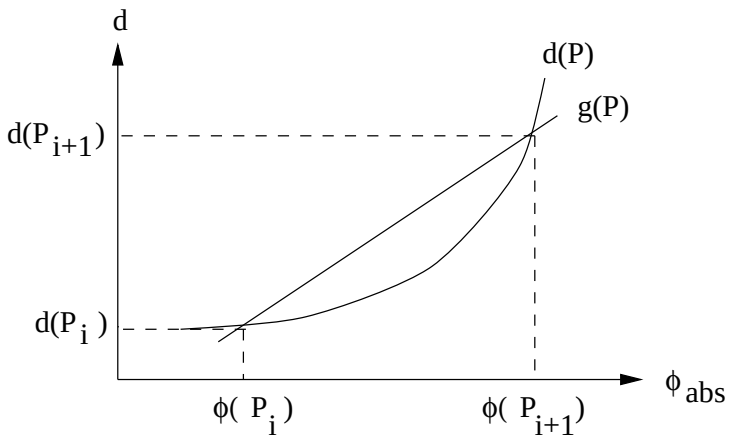


Abbildung 5.4: approximierte Steigung der Distanzfunktion

für den gerade betrachteten Randpunkt nicht gebildet werden, da dieser zum Zeitpunkt der Betrachtung am Rand der bekannten Distanzfunktion liegt. Es ist daher sinnvoll, die Steigung der Geraden, zwischen dem Punkt P_i und P_{i-1} zu betrachten, da damit der aktuelle Verlauf von d im Intervall $[P_{i-1}; P_i]$ angenähert werden kann. Die Steigung dieser Geraden wird durch

$$g_i = \frac{d(P_i) - d(P_{i-1})}{\phi(P_i) - \phi(P_{i-1})} \tag{5.7}$$

berechnet, wobei $\phi(P)$ der dem Punkt P zugewiesene absolute Drehwinkel ist. Der Steigungswinkel wird durch

$$\alpha_i = \arctan g_i \tag{5.8}$$

ermittelt. Abbildung 5.4 zeigt die beschriebenen Zusammenhänge. g_i kann sowohl *positive*, als auch *negative* Werte annehmen. Ein positiver Wert bedeutet hierbei, daß der Informationsgehalt der Region zunimmt, ein negativer, daß der Informationsgehalt abnimmt. Nimmt g_i den Wert 0 an, so ist der Informationsgehalt gegenüber dem vorherigen Aufnahmeschritt gleichbleibend.

Je nachdem, welches Vorzeichen g_i besitzt, soll das System durch Änderung des nächsten Rotationswinkels bzw. Schrittweite reagieren. Bei positivem Vorzeichen (d.h. $g_i > 0$) muß die Region feiner abgetastet werden, das heißt die Schrittweite $\phi_{i,rel}$ wird verringert. Bei negativem Vorzeichen kann die Region gröber abgetastet werden, was eine Vergrößerung von $\phi_{i,rel}$ bedeutet. In Tabelle 5.1 wird die Berechnung der Schrittweite $\phi_{i,rel}$ und des absoluten Drehwinkels $\phi_{i,abs}$ abhängig vom Vorzeichen der Steigung g_i, dem Steigungswinkel α_i und der zuletzt im $i-1$-ten Schritt gültigen Schrittweite $\phi_{i-1,rel}$ dargestellt.

Die Parameter ϕ_{min}, ϕ_{max} und t_α sind den optischen Eigenschaften des Systems sowie den strukturellen Eigenschaften (bspw. Unebenheiten) der aufzunehmenden Oberfläche anzupassen. Die minimale und maximale Schrittweite wurde durch folgende Vorschriften bestimmt:

- minimale Schrittweite ϕ_{min}: Dieser Wert ist physikalisch durch die Auflösung A der

Steigung g_i	Steigungswinkel α_i	Schrittweite $\phi_{i-1,rel}$	Schrittweite $\phi_{i,rel}$	abs. Drehwinkel ϕ_i, abs
$g_i > 0$	$\alpha_i > t_\alpha$	$\phi_{i-1,rel} > \phi_{min} \cdot 2$	$\phi_{i,rel} = \frac{\phi(P_i)-\phi(P_{i-1})}{2}$	$\phi_i = \phi_{i-1} - \phi_{i,rel}$
		$\phi_{i-1,rel} < \phi_{min} \cdot 2$	$\phi_{i,rel} = \phi_{min}$	$\phi_i = \phi_{i-1} - \phi_{i,rel}$
		$\phi_{i-1,rel} = \phi_{min}$	$\phi_{i,rel} = \phi_{min}$	$\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i,rel}$
$g_i > 0$	$\alpha_i \leq t_\alpha$	$-$	$\phi_{i,rel} = \phi_{i-1,rel}$	$\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i,rel}$
$g_i < 0$	$\alpha_i > t_\alpha$	$\phi_{i-1,rel} > \phi_{min} \cdot 2$	$\phi_{i,rel} = \frac{\phi(P_i)-\phi(P_{i-1})}{2}$	$\phi_i = \phi_{i-1} - \phi_{i,rel}$
		$\phi_{i-1,rel} < \phi_{min} \cdot 2$	$\phi_{i,rel} = \phi_{min}$	$\phi_i = \phi_{i-1} - \phi_{i,rel}$
		$\phi_{i-1,rel} = \phi_{min} \cdot 2$	$\phi_{i,rel} = \phi_{min}$	$\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i,rel}$
$g_i < 0$	$\alpha \leq t_\alpha$	$\phi_{i-1,rel} < \phi_{max}/2$	$\phi_{i,rel} = \phi_{i-1,rel} \cdot 2$	$\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i,rel}$
		$\phi_{i-1,rel} \geq \phi_{max}/2$	$\phi_{i,rel} = \phi_{max}$	$\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i,rel}$
$g_i = 0$	0	$\phi_{i-1,rel} < \phi_{max}/2$	$\phi_{i,rel} = \phi_{i-1,rel} \cdot 2$	$\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i,rel}$
		$\phi_{i-1,rel} \geq \phi_{max}/2$	$\phi_{i,rel} = \phi_{max}$	$\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i,rel}$

Tabelle 5.1: Winkelberechnung

Kamera (siehe Formel 5.2 und 5.3) und der minimal erlaubten Schrittweite ϕ_{step} des verwendeten Rotationstellers nach unten hin beschränkt. Im vorliegenden Fall wurde sie durch die maximal erwünschte Anzahl von Aufnahmeschritten I_{max} festgesetzt und ergibt sich daher als:

$$\phi_{min} = \max(\frac{360}{I_{max}}, N_A, \frac{360}{\phi_{step}}) \tag{5.9}$$

N_A ist dabei die durch die Auflösung der Kamera beschränkte Anzahl von Aufnahmeschritten.

- maximale Schrittweite ϕ_{max}: Dieser Wert ist von der kleinsten aufzunehmende Struktur sowie der minimal erwünschten Anzahl von Aufnahmeschritten abhängig. Im vorliegenen Fall wurde die maximale Schrittweite durch folgende Vorgangsweise bestimmt:
  - Sei I_{min} die Mindestanzahl an Aufnahmeschritten. Dann ist $\phi_{max,acq}$ durch $\frac{360}{I_{min}}$ gegeben.
  - Sei die kleinste aufzunehmende Struktur durch ihre Ausdehnung dim_x mit mittlerem Abstand $dist_{avg}$ zum Rotationszentrum gegeben. Um diese Struktur mit Sicherheit aufzunehmen, muß diese Region mindestens einmal abgetastet werden, was nach dem *Nyquist Abtasttheorem* durch Halbierung der Dimensionierung der kleinsten aufzunehmenden Struktur erreicht werden kann. Die Berechnung erfolgt also durch:

$$\phi_{dim} = 2 \cdot \arcsin \frac{dim_x}{2 \cdot dist_{avg}}$$

$$\phi_{max,struct} = \frac{360}{\phi_{dim}}$$

– Die maximale Schrittweite ϕ_{max} wird somit durch Bildung von

$$\phi_{max} = \min(\phi_{max,struct}, \phi_{max,acq}) \tag{5.10}$$

gebildet.

Durch den Schwellwert t_α werden die geometrischen Bedingungen, unter denen das System eine Region feiner abtastet konfiguriert. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 90 Grad, wobei jedoch nur Werte aus der Mitte dieses Intervalles sinnvoll sind. Werden zu kleine Werte gewählt, so reagiert das System zu empfindlich auf kleine Änderungen der Objektoberfläche. Wird der Wert zu groß gewählt, so reagiert das System zu spät auf Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit. Der Schwellwert t_α beeinflußt somit unmittelbar den Rekonstruktionsfehler.

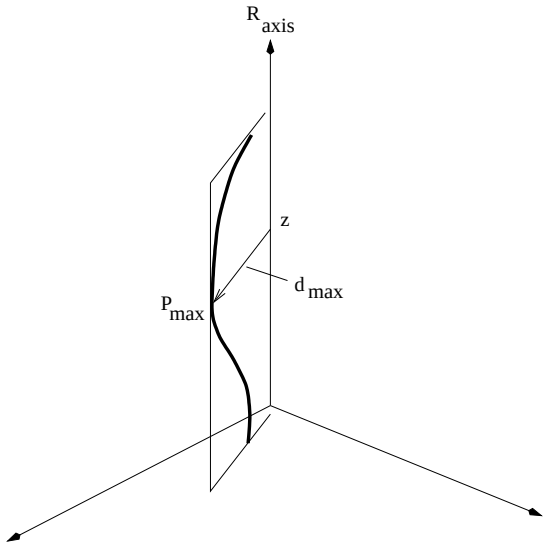


Abbildung 5.5: Normalabstand zur Rotationsachse

Damit dieses Berechnungsmodell auch im dreidimensionalen Fall verwendet werden kann muß es in einigen Punkten erweitert bzw. modifiziert werden. Speziell müssen die Distanzfunktion $d(P)$ und die Steigung g_i angepaßt werden:

- Distanzfunktion: Im zweidimensionalen Fall wurde die Distanz des Randpunktes P zum Rotationszentrum R durch die euklidische Abstandsfunktion berechnet (siehe Formel 5.5). Durch das Lichtschnittverfahren erhält man jedoch nicht einen einzelnen Randpunkt, sondern eine Menge $\mathcal{L}$ von Oberflächenpunkten. Zu jedem dieser Punkte wird der Normalabstand d_{norm} zur Rotationsachse R_{axis}, welche normal auf R steht gemessen. Sei die Rotationsachse durch

  $$R_{axis} = R + v \cdot S$$

  gegeben. Dann ist der Abstand d_{norm} eines Oberflächenpunktes P zu R_{axis} durch

  $$d_{norm} = \frac{|S \times (P - R)|}{|S|} \tag{5.11}$$

gegeben. Jener Oberflächenpunkt P mit maximalem Abstand zur Rotationsachse R_{axis} wird zur Berechnung der Steigung g_i herangezogen. In weiterer Folge wird dieser Punkt mit P_{max} bezeichnet. Der P_{max} im $i-$ten Aufnahmeschritt wird entsprechend mit $P_{i,max}$ bezeichnet. Abbildung 5.5 zeigt die Ermittlung des Normalabstandes zur Rotationsachse.

- Steigung: Die Steigung der Distanzfunktion im $i-$ten Aufnahmeschritt wurde im zweidimensionalen Fall durch Approximation der Distanzfunktion zwischen P_i und P_{i-1} berechnet (siehe Formel 5.7). Zur Berechnung des nächsten Drehwinkels im

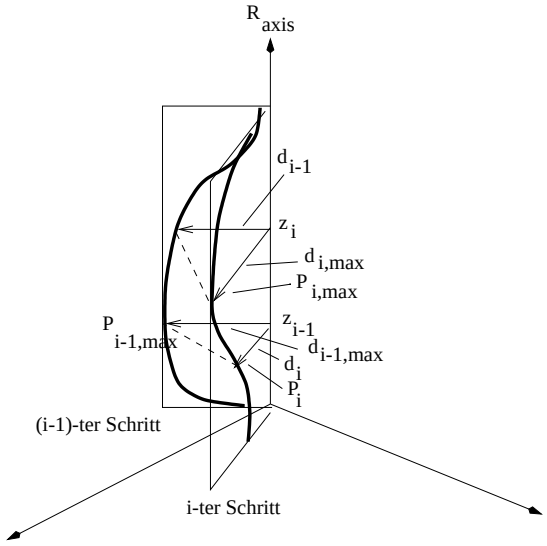


Abbildung 5.6: Ermittlung der Steigung

dreidimensionalen Fall wird der folgende Algorithmus definiert (zur Illustration des Algorithmus sei auf Abbildung 5.6 verwiesen):

1. Ermittlung des maximalen Normalabstandes $d_{i,max}$: Gesucht ist also jener Punkt $P_{i,max}$, dessen Normalabstand zur Rotationsachse R_{axis} maximal wird.
2. Ermittlung des Oberflächenpunktes P_{i-1}, dessen z-Komponente mit jener des Punktes $P_{i,max}$ übereinstimmt. Berechnung des Normalabstandes d_{i-1} dieses Punktes zur Rotationsachse.
3. Berechnung der approximierten Steigung g_a zwischen d_{i-1} und $d_{i,max}$ (siehe Formel 5.7).
4. Berechnung des Steigungswinkels α_a der Steigung g_a (siehe Formel 5.8).
5. Ermittlung des Oberflächenpunktes P_i, dessen z-Komponente mit jener des Punktes $P_{i-1,max}$ übereinstimmt. Berechnung des Normalabstandes d_i dieses Punktes zur Rotationsachse.
6. Berechnung der approximierten Steigung g_b zwischen $d_{i-1,max}$ und d_i.
7. Berechnung des Steigungswinkels α_b der Steigung g_b.

8. Ermittlung von $\max(\alpha_a, \alpha_b)$ zur Ermittlung jener Region mit dem höheren Informationsgehalt.
9. Berechnung des nächsten Drehwinkels nach Tabelle 5.1.

5.4 Algorithmus zur adaptiven Bildgewinnung

Ein iteratives Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion mittels Next View Planning ist durch den in Abbildung 5.7 dargestellten und nachfolgend beschriebenen Algorithmus definiert [SGR96]:

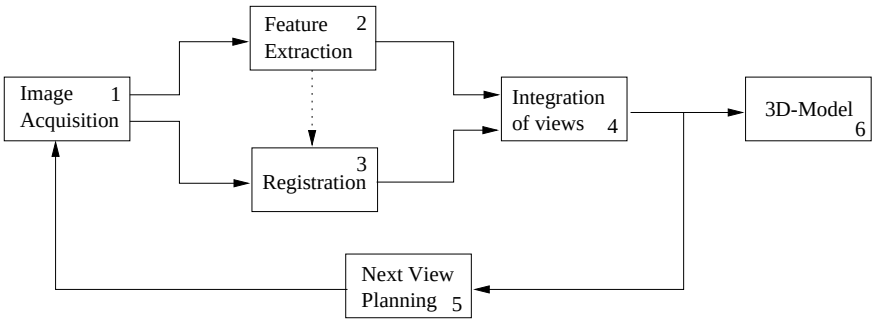
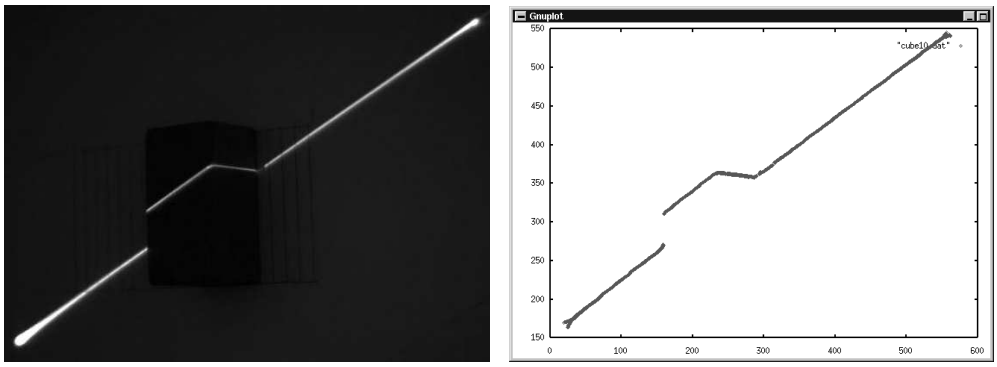


Abbildung 5.7: Iteratives Verfahren zur 3D-Rekonstruktion

1. *Image Acquisition:* Szene mittels Kamera aufnehmen. Das Ergebnis dieses Schrittes ist ein Grauwertbild in dem die Schnittlinie zwischen Laserlichtebene und Objekt sichtbar ist (siehe Abbildung 5.8(a)). Die geometrischen Hintergründe wurden bereits im Kapitel 2.3 erläutert.

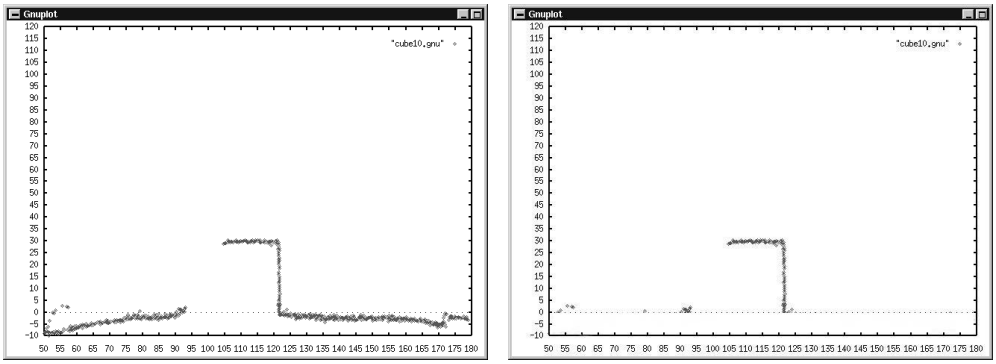


(a) Laserschnittlinie (b) detektierte Linie

Abbildung 5.8: Laserschnittlinie auf Quader

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 (ein Beispiel welches eine solche Menge visualisiert ist in Abbildung 5.8(b) zu sehen). Die Vorgangsweise zur Exktraktion der durch Laserlicht bestrahlten Oberflächenpunkte wurde in Kapitel 4 abgehandelt.

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. In Abbildung 5.9(a) sind die aus dem zweiten Schritt erhaltenen Oberflächenpunkte bereits rücktransformiert und als x-z-Ebenenansicht visualisiert. Durch z-Clipping können jene Punkte entfernt werden, die auf der Rotationsebene liegen, wodurch die eigentliche zu akquirierende Objektoberfläche übrigbleibt (siehe Abbildung 5.9(b)).



(a) Registrierung (b) z-Clipping

Abbildung 5.9: Profil des Quaders

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. Abbildung 5.10(a) zeigt die Rekonstruktion und 5.10(b) zeigt die Visualisierung eines Quaders nach sechs integrierten Profilschnitten.

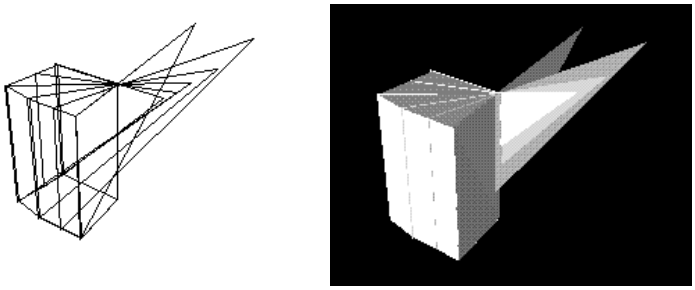
5. *Next View Planning:* Berechnung des NBV mittels der Funktion 5.6. Ergebnis ist ein Winkel, mit dem der Rotationsteller weiterbewegt wird. Überschreitet die Summe aller in den bisherigen ermittelten Rotationswinkel 360 Grad, so ist die sichtbare Objektoberfläche rekonstruiert und kann mit Schritt 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.

Die beschriebene Vorgangsweise führt nach endlich vielen Schritten zu einer Rekonstruktion der sichtbaren Objektoberfläche.
Zum Abschluß dieses Kapitels wird die vollständige Rekonstruktion der sichtbaren Oberfläche eines synthetischen Würfels gezeigt. Dabei wurden folgende Parameter gewählt:

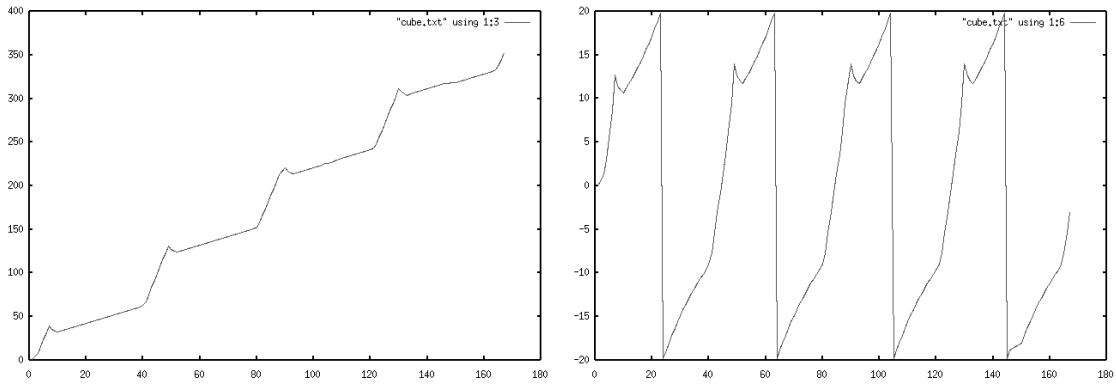
- Winkelschwellwert t_α: 10 Grad
- maximaler Drehwinkel ϕ_{max}: 8 Grad
- minimaler Drehwinkel ϕ_{min}: 1 Grad

Die Seitenlänge des Würfels beträgt $3cm$. Der Würfel wurde zur Simulation am Rotationszentrum ausgerichtet. In Tabelle A.1 sind die einzelnen Schritte der Rekonstruktion angegeben. Der erste Rückschritt bei der Erfassung ist nach 7 Aufnahmeschritten notwendig, da ab dem absoluten Drehwinkel von 39 Grad die Steigung der Distanzfunktion den gesetzten Winkelschwellwert übersteigt. Bei einem konstanten Drehwinkel von 1 Grad



(a) Integration (b) Visualisierung

Abbildung 5.10: integrierte Profilschnitte



(a) (b)

Abbildung 5.11: Analyse des Aufnahmeprozeßes

werden 360 Schritte benötigt, um das Objekt komplett durch die Laserebene zu drehen. Durch Verwendung des beschriebenen Algorithmus und der gewählten Parameter wird das Objekt durch 163 Schritte erfaßt, was einer Reduktion des Aufwandes um 55 Prozent entspricht.

In Abbildung 5.11(a) ist der Fortschritt des Aufnahmeprozeßes zu sehen. An der x-Achse wurde der Aufnahmeschritt, an der y-Achse der absolute Drehwinkel aufgetragen. Der dargestellte Graph ist eine Visualisierung des Aufnahmeprozeßes. Negative Steigungen zeigen, bei welchen Absolutdrehwinkeln und in welchen Aufnahmeschritten das Objekt zur genaueren Erfassung zurück gedreht werden mußte. Der Betrag der Steigung gibt an, ob eine Region mit höherem (flache Steigung) bzw. niedrigerem Informationsgehalt (steile Steigung) abgetastet wurde.

Abbildung 5.11(b) zeigt die berechneten Steigungswinkel in Abhängigkeit des Aufnahmeschrittes. Winkel, deren Betrag größer als der in diesem Beispiel gewählte Schwellwert sind, haben einen Rückschritt im Aufnahmeprozeß zur Folge (siehe auch die dargestellte Vorgangsweise zur Berechnung des nächsten Drehwinkels in Tabelle 5.1).

Bei der Rekonstruktion der Oberfläche wurde das Toleranzintervall nur von numerisch bedingten Ausreißern verlassen, da durch die synthetische Simulation keine Kalibrier- und Detektionsfehler auftreten. Die Ausreißer waren an keinen markanten Stellen festzustellen und sind zufällig über die Menge der Profilschnitte verteilt. Der metrische Fehler der einzelnen Profilschnitte lag im Mittel unter 0.2 mm. Abgesehen von den Ausreißern lag der maximale Fehler bei 0.48 mm.

Das Originalobjekt ist auf Abbildung 3.10(b) zu sehen. Abbildung 5.12 zeigt die Rekonstruktion.

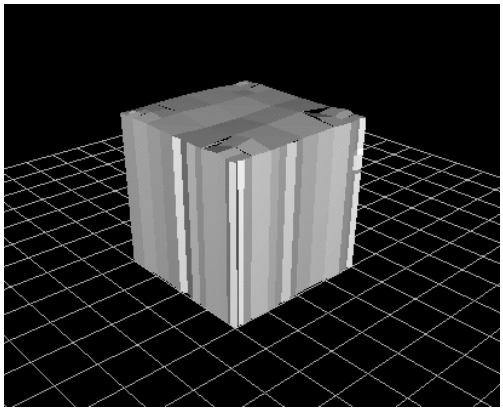


Abbildung 5.12: Rekonstruktion synthetischer Würfel

Kapitel 6

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden Ergebnisse, die mit diesem System erzeugt wurden, zusammengefaßt und diskutiert.

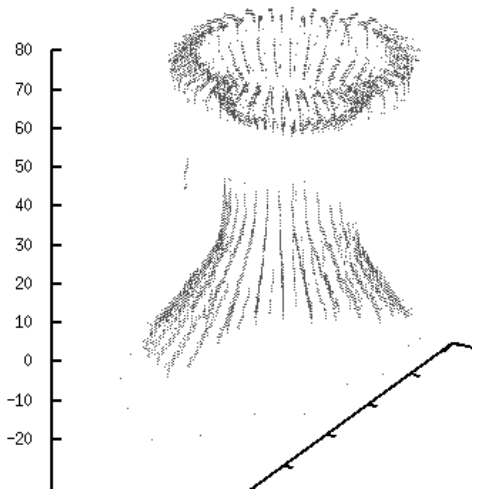


Abbildung 6.1: Rekonstruktion eines Amphorenkopfes

Als erstes Objekt wurde ein Amphorenkopf akquiriert. Dieser wurde am Rotationsteller derart ausgerichtet, daß das Rotationszentrum und die Symmetrieachse des Amphorenkopfes annähernd aneinander ausgerichtet sind. Als Resultat wurde ein Akquirierungsvorgang mit geringer Anzahl von Rückschritten erwartet. Der Akquirierungsprozeß sollte eine gleichmäßige Abtastung des Objektes liefern.

In Abbildung 6.1 ist die Rekonstruktion des Amphorenkopfes nach dem Akquirierungsvorgang zu sehen. Der minimale Winkel wurde mit 4 Grad, der maximale Drehwinkel mit 12 Grad gewählt. Die Analyse der Rekonstruktionsdaten zeigte, daß die Symmetrieachse um 1.8 mm in x-Richtung und 2.1 mm in y-Richtung vom Rotationszentrum verschoben war (die Angaben sind auf die absolute *Nullage* des Objektes bezogen). Durch diese

Verschiebung wurde das Objekt mit variierenden Winkelschrittweiten abgetastet. Zur Akquirierung waren 36 Schritte notwendig.

Abbildung 6.2: Visualisierung eines Amphorenkopfes

Abbildung 6.2 zeigt die Visualisierung der Oberflächenrekonstruktion. Die Visualisierung erfolgte durch einen modifizierten *z-Buffer-Algorithmus* [Wat93]. Der Algorithmus ist auf dem in der Computergraphik gebräuchlichen Koordinatensystem definiert und wurde an das in dieser Arbeit (und allgemein in der Bildverarbeitung gebräuchliche) verwendete Koordinatensystem angepaßt. Der leere Zwischenraum am Flaschenhals entsteht durch Kamera- und Lichtverdeckungen, die durch den Kamerawinkel zur Objektebene begründet sind.

Als nächstes Objekt wurde ein Teil eines Würfels mit Seitenlänge 3 cm erfaßt. Dieser wurde derart auf der Objektebene positioniert, daß seine Zentralachse deutlich vom Rotationszentrum abweicht. Zur Aufnahme wurde ein minimaler Drehwinkel von 1 Grad, sowie ein maximaler Drehwinkel von 8 Grad gewählt. Der Aufnahmeprozeß sollte nach einem absoluten Drehwinkel von 90 Grad anhalten.

In Abbildung 6.3 ist die Rekonstruktion des Würfels zu sehen. Die Akquirierung erfolgte hier gegen den Uhrzeigersinn. Zu sehen ist, daß Regionen mit hohem Informationsgehalt dichter gescannt wurden, als Regionen mit niedrigerem Informationsgehalt. Speziell nach der Erfassung der Ecke des Würfels kann die Inkrementierung des nächsten Drehwinkels beobachtet werden. Interessant ist weiters die Asymmetrie der Aufnahmewinkel, die durch die Rückschritte beim Herantasten an die Ecke (Anstieg des Informationsgehaltes und damit Anstieg der Distanzfunktion) entsteht. Eine Analyse der Rekonstruktion ergab eine Verschiebung der Zentralachse des Würfels um 8 mm in x-Richtung und 4 mm

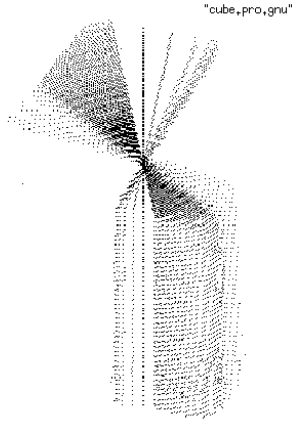


Abbildung 6.3: Teilrekonstruktion eines Würfels

in y-Richtung relativ zum Rotationszentrum. Abbildung 6.4 zeigt die Visualisierung der

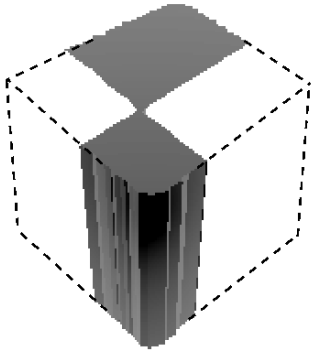


Abbildung 6.4: Visualisierung der Teilrekonstruktion eines Würfels

Teilrekonstruktion des Würfels. Zur besseren Darstellung wurde der Umriß des Würfels eingezeichnet.

Zur Rekonstruktion waren 50 Aufnahmeschritte notwendig, was eine Reduktion des Akquisitionsaufwandes um 45%, gegenüber einer äquiangularen Abtastung von 1 Grad, bedeutet. Bei einer Abtastung des Objektes mit einem konstanten Winkel von 8 Grad, wäre zwar der Aufwand entscheidend geringer (Reduktion um 88 %), die Ecke des Würfels wäre jedoch verloren gegangen. In der dargestellten Rekonstruktion erscheint die Ecke rund. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß die Kanten des Originalobjektes abgerundet sind, was durch die perspektivische Darstellung besonders hervortritt.

Die Unterschiede der äquiangularen Abtastung gegenüber der adaptiven Abtastung sind in der nachfolgenden Tabelle zusammenfaßt:

Abtastung	Schritte	% von 90	Toleranz	Bemerkung
1 Grad äquiangular	90	100	mäßig Ausreißer	maximale Oberfläche
8 Grad äquiangular	11	12	geringe Ausreißer	minimale Oberfläche
NVP - adaptiv	50	55	geringe Ausreißer	*beste* Rekonstruktion

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblicke

In dieser Arbeit wurde ein System zur Oberflächenrekonstruktion entwickelt, daß sich an die Oberflächenstruktur des zu erfassenden Objektes anpaßt.

Ausgehend von den mathematischen und geometrischen Grundlagen der Bildgenerierung anhand des Lochkameramodelles, mit dem zum Verständnis des Aufnahmesystems wichtige Grundlagen, wie die perspektivische Projektion, erklärt wurden, wurde die Entstehung eines Bildes mathematisch modelliert und damit die geometrischen Zusammenhänge zwischen Objekt-, Kamera- und Bildkoordinaten hergeleitet. Weiters wurden die inneren und äußeren Orientierungsparameter einer Kamera spezifiert.

Nach der Vermittlung der Grundlagen zur Bildgenerierung wurde das verwendete Aufnahmesystem, bestehend aus einer Kamera, einem Rotationsteller und zwei Laserdioden vorgestellt und dessen geometrische Anordnung spezifiziert und durch die Eigenschaften von Licht- und Kameraverdeckungen begründet. Um die Lage und Orientierung der einzelnen Geräte zu bestimmen, wurde die Kalibrierung dieser Geräte erklärt und die mathematischen Hintergründe zur Kalibrierung vermittelt.

Danach wurden die verwendeten Methoden und Algorithmen zur Oberflächenrekonstruktion mathematisch hergeleitet und ein Verfahren zur Detektion der Laserlinie im Kamerabild spezifiziert. Weiters wurden Methoden zur Bewertung von Oberflächenrekonstruktionen angegeben.

Kern der Diplomarbeit war der darauffolgende Abschnitt zum Next View Planning. In diesem wurde neben den Grundlagen ein Überblick über gängige NVP-Techniken vermittelt. Danach wurde ein NVP-System, das die geometrischen und physikalischen Eigenschaften des vorliegenden Systems ausnutzt motiviert und durch die Verminderung der Berechnungskomplexität von Oberflächenrekonstruktionen begründet. Das entwickelte NVP-System arbeitet auf dem Prinzip, daß Regionen, die weiter vom Rotationszentrum entfernt liegen, einen höheren Informationsgehalt besitzen, als Regionen, die diesem Zentrum näher liegen. Regionen mit höherem Informationsgehalt müssen daher mit einer höheren Dichte akquiriert werden, als Regionen mit niedrigerem Informationsgehalt.

Abschließend wurden Resultate, die mit diesem System generiert wurden angegeben und analysiert.

Die Arbeit zeigt, daß durch Berücksichtigung des Informationsgehaltes einer Region der Berechnungsaufwand der Rekonstruktion um bis zu 50% reduziert wird, wobei jedoch die Rekonstruktions- und Oberflächenstrukturen erhalten bleiben. Dies ist dadurch begründet, daß Regionen mit höherem Informationsgehalt dichter abgetastet werden, als solche mit niedrigerem Informationsgehalt. Dadurch wird ein System gewonnen, das die variierende Auflösung der akquirierten Oberflächenpunkte kompensiert und eine adaptive, der Oberflächenstruktur angepaßte Abtastung erlaubt.

Bei der Arbeit an diesem System konnten viele Erfahrungen mit adaptiven Systemen gesammelt werden, weshalb in weiterer Folge Ausblicke auf mögliche Erweiterungen gegeben werden:

- Eine der größten, die Flexibiltät des Systems einschränkenden, negativen Eigenschaften, war die Tatsache, daß das Aufnahmesystem nur einen Freiheitsgrad zur Bewegung des Objektes besitzt. Dadurch war die Vielfalt der zu akquirierenden Objekte stark eingeschränkt. Durch Hinzunahme zumindest eines Freiheitsgrades zur linearen Bewegung des Objektes in z-Richtung könnten die auftretenden Kameraverdeckungen weiter reduziert werden. Ein System mit zwei Rotationsfreiheitsgraden und einem linearen Freiheitsgrad könnte die Kameraverdeckungen bei konvexen Objekten nahezu gänzlich reduzieren.

- Die Rekonstruktion könnte durch Verwendung eines Volumensmodelles verbessert werden, da mit diesem die Visualisierung der akquirierten Oberfläche unmittelbar zur Laufzeit erfolgen kann.

- Das vorliegende System verwendet zur Bestimmung des Informationsgehaltes einer Region die beiden zuletzt aufgenommenen Profilschnitte. Dies kann zu einem fehlerhaften Verhalten des Systems bei hochstrukturierten Objekten führen. Eine Verbesserung des Systemverhaltens kann durch Erhöhung der vorliegenden Information zur Bestimmung des Informationsgehaltes erreicht werden. So könnten einerseits mehrere Profilschnitte herangezogen und analysiert werden, andererseits könnte die Bestimmung der Oberflächenstruktur durch Hinzunahme von weiteren Bewertungskriterien (zur Zeit wird nur die 1. Ableitung der Distanzfunktion verwendet) verbessert werden.

Anhang A

Tabellen

A.1 Rekonstruktionsanalyse eines Quaders

$\phi_{abs,j}$	$\phi_{abs,j+1}$	d_j	d_{j+1}	α
0	1	15.000000	15.002285	0.130921
1	3	15.002285	15.020585	0.524243
3	7	15.020585	15.112647	1.318458
7	15	15.112647	15.529142	2.980237
15	23	15.529142	16.295406	5.471271
23	31	16.295406	17.499500	8.559439
31	39	17.499500	19.301394	12.693289
31	35	17.499500	18.311619	11.476744
31	33	17.499500	17.885448	10.922343
31	32	17.499500	17.687675	10.657023
32	33	17.687675	17.885448	11.187189
33	34	17.885448	18.093269	11.740147
34	35	18.093269	18.311619	12.317184
35	36	18.311619	18.541019	12.920145
36	37	18.541019	18.782034	13.550680
37	38	18.782034	19.035273	14.210757
38	39	19.035273	19.301394	14.902220
39	40	19.301394	19.581110	15.627183
40	41	19.581110	19.875195	16.387794
41	42	19.875195	20.184490	17.186611
42	43	20.184490	20.509912	18.026043
43	44	20.509912	20.852453	18.908422
44	45	20.852453	21.213203	19.836920
45	46	21.213203	20.852453	-19.836920
46	47	20.852453	20.509912	-18.908422
47	48	20.509912	20.184490	-18.026043

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung der Tabelle

$\phi_{abs,j}$	$\phi_{abs,j+1}$	d_j	d_{j+1}	α
48	49	20.184490	19.875195	-17.186611
49	50	19.875195	19.581110	-16.387794
50	51	19.581110	19.301394	-15.627183
51	52	19.301394	19.035273	-14.902220
52	53	19.035273	18.782034	-14.210757
53	54	18.782034	18.541019	-13.550680
54	55	18.541019	18.311619	-12.920145
55	56	18.311619	18.093269	-12.317184
56	57	18.093269	17.885448	-11.740147
57	58	17.885448	17.687675	-11.187189
58	59	17.687675	17.499500	-10.657023
59	60	17.499500	17.320507	-10.148090
60	61	17.320507	17.150311	-9.658989
61	63	17.150311	16.834894	-8.962197
63	67	16.834894	16.295406	-7.681243
67	75	16.295406	15.529142	-5.471271
75	83	15.529142	15.112647	-2.980237
83	91	15.112647	15.002285	-0.790360
91	99	15.002285	15.186976	1.322520
99	107	15.186976	15.685376	3.564918
107	115	15.685376	16.550669	6.173203
115	123	16.550669	17.885448	9.472402
123	131	17.885448	19.875195	13.967105
123	127	17.885448	18.782034	12.633822
123	125	17.885448	18.311619	12.028975
123	124	17.885448	18.093269	11.740147
124	125	18.093269	18.311619	12.317184
125	126	18.311619	18.541019	12.920145
126	127	18.541019	18.782034	13.550680
127	128	18.782034	19.035273	14.210757
128	129	19.035273	19.301394	14.902220
129	130	19.301394	19.581110	15.627183
130	131	19.581110	19.875195	16.387794
131	132	19.875195	20.184490	17.186611
132	133	20.184490	20.509912	18.026043
133	134	20.509912	20.852453	18.908422
134	135	20.852453	21.213203	19.836920
135	136	21.213203	20.852453	-19.836920
136	137	20.852453	20.509912	-18.908422
137	138	20.509912	20.184490	-18.026043

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung der Tabelle

$\phi_{abs,j}$	$\phi_{abs,j+1}$	d_j	d_{j+1}	α
138	139	20.184490	19.875195	-17.186611
139	140	19.875195	19.581110	-16.387794
140	141	19.581110	19.301394	-15.627183
141	142	19.301394	19.035273	-14.902220
142	143	19.035273	18.782034	-14.210757
143	144	18.782034	18.541019	-13.550680
144	145	18.541019	18.311619	-12.920145
145	146	18.311619	18.093269	-12.317184
146	147	18.093269	17.885448	-11.740147
147	148	17.885448	17.687675	-11.187189
148	149	17.687675	17.499500	-10.657023
149	150	17.499500	17.320507	-10.148090
150	151	17.320507	17.150311	-9.658989
151	153	17.150311	16.834894	-8.962197
153	157	16.834894	16.295406	-7.681243
157	165	16.295406	15.529142	-5.471271
165	173	15.529142	15.112647	-2.980237
173	181	15.112647	15.002285	-0.790360
181	189	15.002285	15.186976	1.322520
189	197	15.186976	15.685376	3.564918
197	205	15.685376	16.550669	6.173203
205	213	16.550669	17.885448	9.472402
213	221	17.885448	19.875195	13.967105
213	217	17.885448	18.782034	12.633822
213	215	17.885448	18.311619	12.028975
213	214	17.885448	18.093269	11.740147
214	215	18.093269	18.311619	12.317184
215	216	18.311619	18.541019	12.920145
216	217	18.541019	18.782034	13.550680
217	218	18.782034	19.035273	14.210757
218	219	19.035273	19.301394	14.902220
219	220	19.301394	19.581110	15.627183
220	221	19.581110	19.875195	16.387794
221	222	19.875195	20.184490	17.186611
222	223	20.184490	20.509912	18.026043
223	224	20.509912	20.852453	18.908422
224	225	20.852453	21.213203	19.836920
225	226	21.213203	20.852453	-19.836920
226	227	20.852453	20.509912	-18.908422
227	228	20.509912	20.184490	-18.026043

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung der Tabelle

$\phi_{abs,j}$	$\phi_{abs,j+1}$	d_j	d_{j+1}	α
228	229	20.184490	19.875195	-17.186611
229	230	19.875195	19.581110	-16.387794
230	231	19.581110	19.301394	-15.627183
231	232	19.301394	19.035273	-14.902220
232	233	19.035273	18.782034	-14.210757
233	234	18.782034	18.541019	-13.550680
234	235	18.541019	18.311619	-12.920145
235	236	18.311619	18.093269	-12.317184
236	237	18.093269	17.885448	-11.740147
237	238	17.885448	17.687675	-11.187189
238	239	17.687675	17.499500	-10.657023
239	240	17.499500	17.320507	-10.148090
240	241	17.320507	17.150311	-9.658989
241	243	17.150311	16.834894	-8.962197
243	247	16.834894	16.295406	-7.681243
247	255	16.295406	15.529142	-5.471271
255	263	15.529142	15.112647	-2.980237
263	271	15.112647	15.002285	-0.790360
271	279	15.002285	15.186976	1.322520
279	287	15.186976	15.685376	3.564918
287	295	15.685376	16.550669	6.173203
295	303	16.550669	17.885448	9.472402
303	311	17.885448	19.875195	13.967105
303	307	17.885448	18.782034	12.633822
303	305	17.885448	18.311619	12.028975
303	304	17.885448	18.093269	11.740147
304	305	18.093269	18.311619	12.317184
305	306	18.311619	18.541019	12.920145
306	307	18.541019	18.782034	13.550680
307	308	18.782034	19.035273	14.210757
308	309	19.035273	19.301394	14.902220
309	310	19.301394	19.581110	15.627183
310	311	19.581110	19.875195	16.387794
311	312	19.875195	20.184490	17.186611
312	313	20.184490	20.509912	18.026043
313	314	20.509912	20.852453	18.908422
314	315	20.852453	21.213203	19.836920
315	316	21.213203	20.852453	-19.836920
316	317	20.852453	20.509912	-18.908422
317	318	20.509912	20.184490	-18.026043

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung der Tabelle				
$\phi_{abs,j}$	$\phi_{abs,j+1}$	d_j	d_{j+1}	α
318	319	20.184490	19.875195	-17.186611
319	320	19.875195	19.581110	-16.387794
320	321	19.581110	19.301394	-15.627183
321	322	19.301394	19.035273	-14.902220
322	323	19.035273	18.782034	-14.210757
323	324	18.782034	18.541019	-13.550680
324	325	18.541019	18.311619	-12.920145
325	326	18.311619	18.093269	-12.317184
326	327	18.093269	17.885448	-11.740147
327	328	17.885448	17.687675	-11.187189
328	329	17.687675	17.499500	-10.657023
329	330	17.499500	17.320507	-10.148090
330	331	17.320507	17.150311	-9.658989
331	333	17.150311	16.834894	-8.962197
333	337	16.834894	16.295406	-7.681243
337	345	16.295406	15.529142	-5.471271
345	353	15.529142	15.112647	-2.980237

Tabelle A.1: Oberflächenrekonstruktion eines Quaders

A.2 Analyse der DLT-Kalibrierung

Point	Pos	x_{soll}	y_{soll}	z_{soll}	d_x	d_y	d_z
0	0	30.000	30.000	0.000	0.357	0.212	0.683
1	0	60.000	30.000	0.000	-0.063	0.108	-0.268
2	0	90.000	30.000	0.000	-0.010	-0.041	-0.356
3	0	120.000	30.000	0.000	-0.036	-0.091	-0.179
4	0	150.000	30.000	0.000	-0.107	-0.277	-0.430
5	0	30.000	60.000	0.000	0.052	0.079	0.219
6	0	60.000	60.000	0.000	-0.366	0.089	-0.561
7	0	90.000	60.000	0.000	-0.082	0.039	-0.162
8	0	120.000	60.000	0.000	-0.086	-0.006	-0.084
9	0	150.000	60.000	0.000	-0.024	-0.030	-0.124
10	0	30.000	90.000	0.000	-0.179	0.035	-0.083
11	0	60.000	90.000	0.000	-0.283	-0.038	-0.655
12	0	90.000	90.000	0.000	-0.035	0.176	0.016
13	0	120.000	90.000	0.000	0.064	0.074	0.178
14	0	150.000	90.000	0.000	0.207	0.103	0.583
15	0	30.000	120.000	0.000	0.024	-0.407	0.198
16	0	60.000	120.000	0.000	-0.111	-0.312	-0.325
17	0	90.000	120.000	0.000	0.120	-0.286	0.148
18	0	120.000	120.000	0.000	-0.122	-0.143	-0.041
19	0	150.000	120.000	0.000	0.119	-0.059	0.590
20	0	30.000	150.000	0.000	0.458	-0.009	0.688
21	0	60.000	150.000	0.000	0.025	0.095	-0.321
22	0	90.000	150.000	0.000	0.016	0.053	0.058
23	0	120.000	150.000	0.000	-0.098	0.168	-0.059
24	0	150.000	150.000	0.000	0.157	0.279	0.320
0	1	30.000	30.000	50.000	0.532	0.174	1.213
1	1	60.000	30.000	50.000	0.058	0.093	-0.029
2	1	90.000	30.000	50.000	0.140	-0.020	-0.158
3	1	120.000	30.000	50.000	0.057	-0.022	0.027
4	1	150.000	30.000	50.000	0.068	-0.104	0.330
5	1	30.000	60.000	50.000	0.007	0.105	0.350
6	1	60.000	60.000	50.000	-0.314	0.100	-0.518
7	1	90.000	60.000	50.000	0.067	0.082	-0.029
8	1	120.000	60.000	50.000	-0.060	0.012	-0.091
9	1	150.000	60.000	50.000	0.020	0.033	0.122
10	1	30.000	90.000	50.000	-0.149	0.049	-0.084
11	1	60.000	90.000	50.000	-0.372	-0.070	-0.916
12	1	90.000	90.000	50.000	0.113	0.123	0.054

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung der Tabelle							
Point	Pos	x_{soll}	y_{soll}	z_{soll}	d_x	d_y	d_z
13	1	120.000	90.000	50.000	-0.059	0.043	-0.134
14	1	150.000	90.000	50.000	0.027	0.038	0.210
15	1	30.000	120.000	50.000	-0.098	-0.373	0.029
16	1	60.000	120.000	50.000	-0.118	-0.272	-0.495
17	1	90.000	120.000	50.000	0.204	-0.304	0.074
18	1	120.000	120.000	50.000	-0.181	-0.170	-0.210
19	1	150.000	120.000	50.000	-0.003	-0.096	0.355
20	1	30.000	150.000	50.000	0.012	0.356	0.307
21	1	60.000	150.000	50.000	0.084	0.135	-0.357
22	1	90.000	150.000	50.000	0.133	0.046	0.016
23	1	120.000	150.000	50.000	-0.145	0.063	-0.165
24	1	150.000	150.000	50.000	-0.029	0.145	0.129

Tabelle A.2: DLT-Kalibrierung

Literaturverzeichnis

[BB93] Henning Bässmann and Philipp W. Besslich. *Bildverarbeitung - Ad Oculos.* Springer-Verlag, 1993.

[BK89] Gerd Baron and Peter Kirschenhofer. *Einführung in die Mathematik für Mathematiker - Band 1.* Springer-Verlag Wien-New York, 1989.

[Dav97] E. R. Davis. *Machine Vision - Theory, Algorithms, and Practicalities.* Academic Press, 1997.

[DKS96] Wolfgang Domschke, Robert Klein, and Armin Scholl. Taktische Tabus: Durch Verbote schneller optimieren. *c't - Magazin für Computertechnik*, pages 326–331, December 1996.

[HS89] Robert M. Haralick and Linda G. Shapiro. Glossary of computer vision terms. *Pattern Recognition*, 24(1):69–93, 1989.

[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.

[Kan93] Kenichi Kanatani. *Geometric Computation for Machine Vision.* Oxford Science Publications, 1993.

[Kie92] Pär Kierkegaard. A Method for Detection of Circualr Arcs Based on the Hough Transform. *Machine Vision and Applications*, 5:249–263, 1992.

[KKS96] Reinhard Klette, Andreas Koschan, and Karsten Schlüns. *Computer Vision - Räumliche Information aus digitalen Bildern.* Vieweg, 1996.

[Lea92] V. F. Leavers. The Dynamic Generalized Hough Transform: Its Relationship to the Probabilistic Hough Transforms and an Application to the Concurrent Detection of Circles and Ellipses. *CVGIP: Image Understanding*, 56(3):381–398, 1992.

[Lis98] Christian Liska. Profilschnittermittlung und bildhafte Erfassung archäologischer Fundscherben mittels Laserlicht. Technical Report PRIP-TR. 53, Vienna University of Technology, Institute for Automation, Dept. of Pattern Recognition and Image Processing, September 1998.

[Mav92] Jasna Maver. Occlusions and the next view planning. In *Proceedings of the 16th ÖAGM-Meeting*, pages 171–183, Vienna, 1992.

[Mav96] Jasna Maver. Necessary Views for a Coarse Representation of a Scene. In *Proceedings of the 13th ICPR - Track A*, pages 936–940, 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.

[MBV96] M.J. Milroy, C. Bradley, and G.W. Vickers. Automated laser scanning based on orthogonal cross sections. *Machine Vision and Applications*, 9:106–119, 1996.

[Mel94] Trond Melen. Decomposition of the DLT-Matrix with symmetric representation of affine distortion. In *Proceedings of the NOBIM Conference*, pages 111–122, Asker, Norway, 1994.

[Pin94] Axel Pinz. *Bildverstehen.* Springer-Verlag Wien New York, 1994.

[POS97] Dimitri Papadopoulos-Orfanos and Francis Schmitt. Automatic 3-D Digitization Using a Laser Rangefinder with a Small Field of View. In *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 60–67, Ottawa, Canada, May 1997.

[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.

[RAS97] Michael K. Reed, Peter K. Allen, and Ioannis Stamos. 3-D Modeling from Range Imagery: An Incremental Method with a Planning Component. In *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 76–83, Ottawa, Canada, May 1997.

[RL94] Gerhard Roth and Martin D. Levine. Geometric Primitive Extraction Using a Genetic Algorithm. *IEEE-Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(9):901–905, September 1994.

[Sab97] Robert Sablatnig. *A Highly Adaptable Concept for Visual Inspection.* PhD thesis, Vienna University of Technology, 1997.

[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.

[SL96] Robert Sablatnig and Ales Leonardis. A Modular Visual Inspection Concept based on Generic Detection. In *Proceedings of Applied Machine Vision Conference*, pages 339–358, Cincinnati, Ohio, June 1996.

[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.

[SP91] K. Shanmukh and Arun K. Pujari. Volume intersection with optimal set of directions. *Pattern Recognition Letters*, (12):165–170, March 1991.

[Tar95] G. H. Tarbox. Planning for Complete Sensor Coverage in Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(1):84–111, January 1995.

[TAT95] Konstantinos A. Tabanis, Peter K. Allan, and Roger Y. Tsai. A Survey of Sensor Planning in Computer Vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(1):86–104, February 1995.

[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.

[Wat93] Alan Watt. *3D Computer Graphics.* Addison - Wesley, 1993.

[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.

[ZMHN97] Hongbin Zha, Kenichi Morooka, Tsutomu Hasegawa, and Tadashi Nagata. Active Modeling of 3-D Objects: Planning on the Next Best Pose (NBP) for Acquiring Range Images. In *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 68–75, Ottawa, Canada, May 1997.