

PRIP-TR-053

18. September 1998

Profilschnittermittlung
und bildhafte Erfassung
archäologischer Fundscherben
mittels Laserlicht

Christian Liska

Abstract

Profilschnitte dienen Archäologen als wichtige Entscheidungsgrundlage zur Klassifikation von Fundstücken. In dieser Arbeit wird ein System vorgestellt, das dem Archäologen die Arbeit der manuellen Erfassung dieser Funde abnimmt. Neben der Vermittlung der Grundlagen zur Bildgewinnung wird die Erfassung der Oberflächencharakteristik mittels strukturiertem Licht, speziell der Lichtstreifenprojektion beschrieben und an die Aufgabenstellung der Profilschnittermittlung angepaßt. Das Verfahren wird weiters um eine Komponente zur Erfassung der sichtbaren Objektoberfläche erweitert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen der Bildgenerierung	5
2.1	Das Modell der Lochkamera	5
2.2	Die perspektivische Projektion	6
2.3	Entstehung eines Bildes	6
3	Das Aufnahmesystem	10
3.1	Beschreibung	10
3.2	Kalibrierung	11
4	Berechnung eines Profilschnittes	13
4.1	Detektion der Laserlinie im Kamerabild	13
4.2	Rücktransformation eines einzelnen Bildpunktes	14
4.2.1	Verwendung der Parameter aus Tsai-Kalibrierung	15
4.2.2	Verwendung der 4x3-DLT-Matrix	18
5	Erweitertes Berechnungsmodell	19
5.1	Angepaßtes Aufnahmesystem	19
5.1.1	Kalibrierung der Laserebene	20
5.1.2	Kalibrierung der Linearbewegung	21
5.2	Erweitertes Berechnungsmodell	22
6	Ergebnisse	24
7	Zusammenfassung und Ausblicke	29

Abbildungsverzeichnis

2.1	geometrisches Modell der Lochkamera	5
2.2	perspektivische Projektion eines Objektes	6
2.3	Beziehungen zwischen Objekt-, Kamera- und Bildkoordinaten	7
3.1	Aufnahmesystem zur Profilschnittermittlung	10
3.2	reduziertes Aufnahmesystem	11
3.3	Kamerasicht des 5x5-Kalibrierusters	12
4.1	Reflektion des Laserlichtes auf einer Objektoberfläche	13
4.2	Signalverlauf einer Bildzeile (aus [Joh93])	14
4.3	Signalverlauf nach Schwellwertbildung	15
5.1	Aufnahmesystem zur bildhaften Erfassung	19
5.2	Kalibrierung der Laserebene	20
5.3	Kalibrierung der Linearbewegung	21
5.4	Berechnung eines Oberflächenpunktes	23
6.1	Originalobjekt Quader	24
6.2	Laserschnittlinie auf Quader	25
6.3	Profil des Quaders	26
6.4	Originalobjekt Scherbe	26
6.5	Laserschnittlinie auf Scherbe	27
6.6	Profile der Scherbe (links: außen, rechts: innen)	27
6.7	x-y-Ebenenansicht des rekonstruierten Quaders	28
6.8	rekonstruierter Quader	28

Abschnitt 1

Einleitung

Eine der Aufgaben der Archäologen ist die Erfassung, Archivierung und Katalogisierung von Fundstücken, die an Ausgrabungsstätten gefunden wurden. Bei den Funden handelt es sich oft um Bruchstücke (Scherben) von Gefäßen. Die manuelle Erfassung dieser Funde stellt eine zeitintensive Routinearbeit für den Archäologen dar [Ken90]. Die Scherben werden fotografiert, vermessen und gezeichnet. Zur Klassifikation eines Fundes ist neben der Oberflächencharakteristik und dem Material das Profil des Fundes notwendig. Gerade die graphische Erfassung des Profils eines Fundes stellt dabei eine nicht zu vernachlässigbare Fehlerquelle bei der Erfassung dar [OTV93]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein System erzeugt, welches automationsgestützt einen Profilschnitt eines Fundes ermittelt, sowie die sichtbare Oberfläche einer Scherbe aus einer Menge von Profilschnitten rekonstruiert.

Das System arbeitet mit einer Technik, die als *“shape from structured light”* bekannt ist [Shi87]. Durch die zur Verfügung stehende Hardware und der Anforderung, daß mit diesem System Profilschnitte ermittelt werden soll, wurde das System mittels der *Lichtstreifenprojektion* (auch bekannt unter dem Begriff *Lichtschnittverfahren*, siehe [Sab91]), welche ein Spezialfall des *“shape from structured light”* darstellt realisiert [Joh93].

Andere, hier nicht näher beschriebene, Verfahren zur 3D-Erfassung sind *“shape from stereo”*, *“shape from motion”*, *“shape from shading”*, *“shape from texture”*, *“shape from contour (shape)”* und *“shape from silhouette”*, welche bspw. in [HS89] und [Lis98] kurz zusammengefaßt werden. Ausführlichere Darstellungen zu einzelnen Techniken sind unter anderem in [Shi87, Men91, Dav97, ZF92, Zhe94] zu finden.

Die Systemerstellung gliedert sich in folgende Teilaufgaben:

1. Installation der Hardware
 - Installation der CCD-Kameras (2 Stück)
 - Installation der Laserdioden (2 Stück)
2. Entwicklung des mathematischen Modelles zur Profilschnittermittlung

3. Implementierung des Modelles unter Khoros
4. Erweiterung des Modelles zur Erfassung der sichtbaren Oberfläche eines Fundes
5. Implementierung des erweiterten Modelles

Die Realisierung wurde im Rahmen des Informatikpraktikums 2 (Teilaufgaben 1 bis 3), sowie des Wahlfachpraktikums aus technischer Informatik (Teilaufgaben 4 und 5) absolviert. Die Arbeiten sind Teil des unter der Projektnummer P09954-SPR laufenden Archäologieprojektes [SMD94].

Dieser technische Report soll das zugrundeliegende mathematische Modell, sowie die mit dem System erzielten Resultate dokumentieren und hat folgenden Aufbau: Im nachfolgenden Abschnitt 2 werden die mathematischen Grundlagen der Bildgenerierung definiert. In Abschnitt 3 wird das verwendete Aufnahmesystem, bestehend aus 2 CCD-Kameras und 2 Laserdioden beschrieben und der geometrische Zusammenhang der verwendeten Komponenten zu den in Abschnitt 2 formulierten Grundlagen hergestellt. Weiters wird in diesem Abschnitt auf die Kalibrierung des gesamten Systems eingegangen. Abschnitt 4 beschreibt die Berechnung des Profilschnittes aus dem Kamerabild. Dazu werden zwei Verfahren zur Rücktransformation von zweidimensionalen Rechnerkoordinaten in dreidimensionale Objektkoordinaten gezeigt. In Abschnitt 5 wird das System dahingehend erweitert, daß eine Erfassung der sichtbaren Oberfläche eines Objektes möglich wird. In Abschnitt 6 werden einige Ergebnisse und Resultate gezeigt. Abschließend werden in Abschnitt 7 mögliche Erweiterungen und Ausblicke zur Verbesserung des Systems gegeben.

Abschnitt 2

Grundlagen der Bildgenerierung

In diesem Abschnitt 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 notwendig sind. Es beruht im wesentlichen auf den Büchern [Shi87] und [Kan93].

2.1 Das Modell der Lochkamera

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

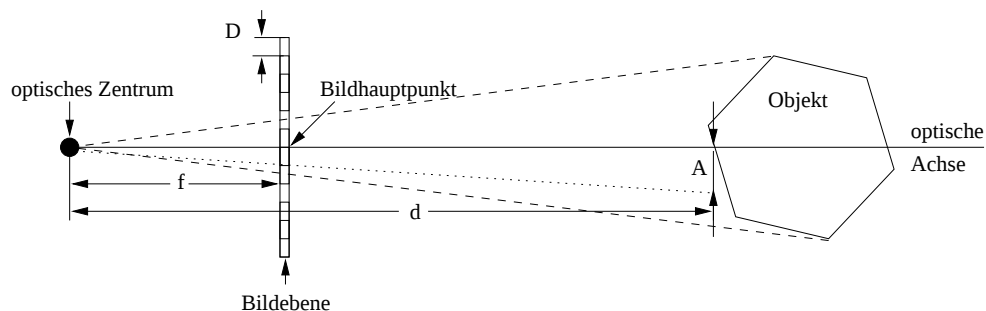


Abbildung 2.1: geometrisches Modell der Lochkamera

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 $P = (x, y, z)^T$ des dreidimensionalen Objektraumes auf Bildpunkte $Q = (u, v)^T$ der zweidimensionalen Bildebene eine *perspektivische Projektion*. Unter der Annahme, daß das Objektkoordinatensystem an der Kamera ausgerichtet ist (*kamerazentriertes Koordinatensystem*), sind die Projektionsgleichungen durch $u = f \cdot x/z$ und $v = f \cdot y/z$ gegeben, was über den *Strahlensatz der Geometrie* herleitbar ist [Kan93]. Bei Verwendung eines *bildzentrierten Koordinatensystems*, wobei hierbei der Ursprung des Koordinatensystems in die Bildebene gelegt wird, dann sind die Projektionsgleichungen entsprechend durch $u = f \cdot x/(f + z)$ und $v = f \cdot y/(f + z)$ gegeben [KKS96]. In weiterer Folge wird jedoch vom kamerazentrierten Koordinatensystem ausgegangen.

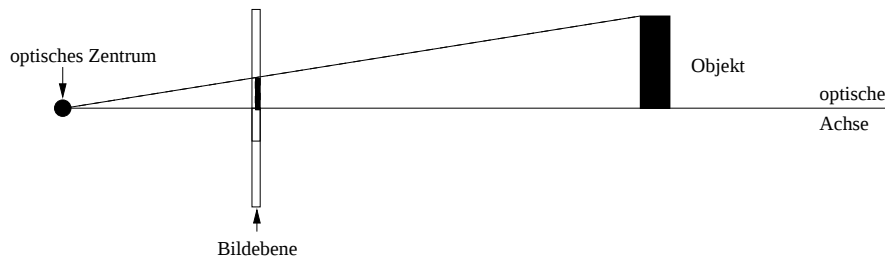


Abbildung 2.2: perspektivische Projektion eines Objektes

2.3 Entstehung eines Bildes

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

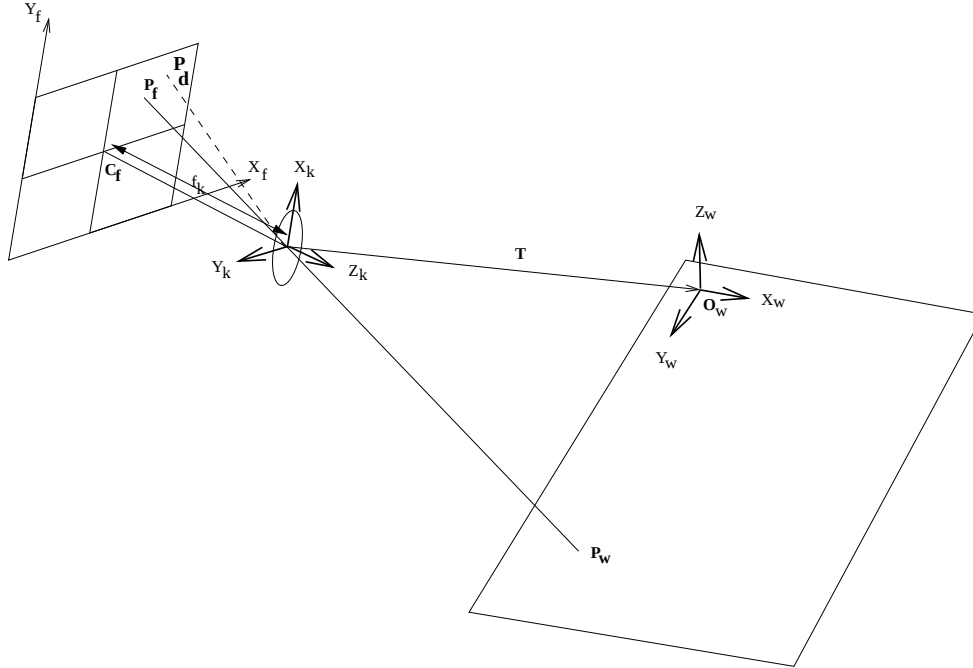


Abbildung 2.3: Beziehungen zwischen Objekt-, Kamera- und Bildkoordinaten

wird durch eine Rotation und anschließende Translation beschrieben.

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

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- (*Kippung*, engl. *pan*), y- (*Neigung*, engl. *tilt*) und z-Achse (*Kantung*, engl. *roll*). Die Rotationsmatrix wird durch Multiplikation gebildet, also $R = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) =$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\beta)\sin(\gamma) & -\sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) - \cos(\alpha)\sin(\gamma) & \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) & \sin(\alpha)\cos(\beta) \\ \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\gamma) & \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\gamma) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

In abgekürzter Schreibweise wird die Rotationsmatrix R als

$$R = \begin{pmatrix} r1 & r2 & r3 \\ r4 & r5 & r6 \\ r7 & r8 & r9 \end{pmatrix}$$

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

$$R^{-1} = R^T = \begin{pmatrix} r1 & r4 & r7 \\ r2 & r5 & r8 \\ r3 & r6 & r9 \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Der Translationsvektor ist durch

$$T = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

definiert. Um die Koordinatentransformation (2.1) ausschließlich in Matrizenform zu ermöglichen, werden Koordinaten in ihrer homogenen Form verwendet, d.h. ein Punkt $(x, y, z)^T$ wird als $(x, y, z, 1)^T$ geschrieben. Gleichung 2.1 lautet dann

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r1 & r2 & r3 & t_x \\ r4 & r5 & r6 & t_y \\ r7 & r8 & r9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

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 lautet

$$P_f = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_k \cdot f_k / z_k \\ y_k \cdot f_k / z_k \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Die homogene Darstellung der perspektivischen Projektion ist durch

$$P_f = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_k / z_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_k / z_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 / z_k & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

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:

$$P_d = \begin{pmatrix} x_d + D_x \\ y_d + D_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

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:

$$\begin{aligned} D_x &= x_d(\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4) \\ D_y &= y_d(\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4) \end{aligned}$$

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

$$D_x = X_d \cdot \kappa_1 \cdot r^2,$$

und

$$\begin{aligned} D_y &= Y_d \cdot \kappa_1 \cdot r^2 \\ r &= \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \end{aligned} \tag{2.9}$$

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

$$\begin{pmatrix} u_f \\ v_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x \cdot \frac{N_{fx} x_d}{d_x N_{cx}} + c_x \\ \frac{N_{fy} y_d}{d_y N_{cy}} + c_y \end{pmatrix} \tag{2.10}$$

gegeben. Die Bedeutungen der Parameter lauten im einzelnen:

- s_x : horizontaler Skalierungsfaktor
- $(u_f, v_f)^T$: Spalte und Zeile eines Bildpunktes im *Framegrabber* (Rechnerkoordinatensystem)
- $(c_x, c_y)^T$: Bildkoordinate des Bildhauptpunktes C_f
- 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.

Abschnitt 3

Das Aufnahmesystem

In diesem Abschnitt wird aufbauend auf die bereits gezeigte Beziehung zwischen Objekt- und Kamerakoordinatensystem (siehe Gleichung 2.1 eine Beschreibung eines Aufnahmesystems zur Profilschnittermittlung gegeben. Dabei wird speziell auf die Anforderungen eines solchen Systems und dessen Kalibrierung eingegangen.

3.1 Beschreibung

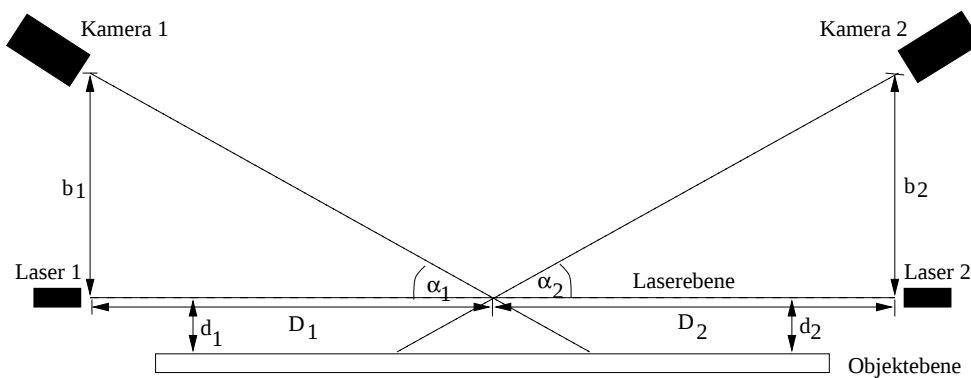


Abbildung 3.1: Aufnahmesystem zur Profilschnittermittlung

Das Aufnahmesystem besteht aus folgenden Geräten, deren geometrische Anordnung in Abbildung 3.1 gezeigt wird:

- 2 CCD-Kameras: schwarz/weiß, 768 x 572 pixel Auflösung, 16 mm Objektiv
- 2 Laserdioden: rotes Laserlicht, Vorsatzlinse zur Projektion einer Ebene

Die Kameras werden einander gegenüber im Abstand $D_1 + D_2$ montiert. Die Laserdioden werden unterhalb der Kameras montiert. Sie müssen so montiert werden, daß ihre projizierten Laserlichtebenen ineinander übergehen. Die Laserlichtebene liegt dabei parallel zur

Objektebene.

In weiterer Folge werden jedoch die geometrischen Beziehungen nur für eine Kamera und einen Laser betrachtet. Die Beziehungen können unmittelbar auf die andere Kamera übertragen werden.

Abbildung 3.2 zeigt das für die weiteren Überlegungen gültige Aufnahmesystem.

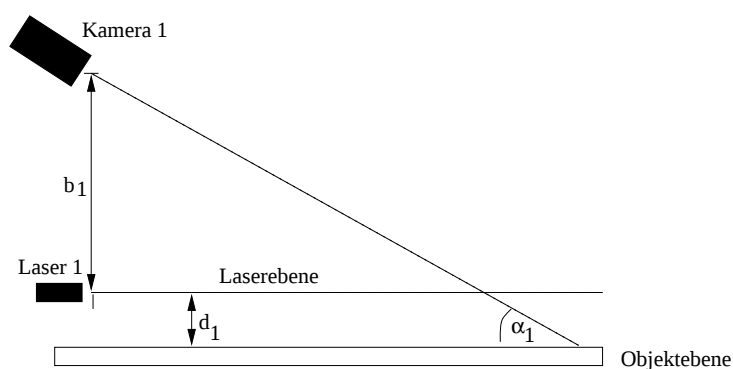


Abbildung 3.2: reduziertes Aufnahmesystem

3.2 Kalibrierung

In diesem Abschnitt wird die *Kalibrierung* des Systems, also die rechnergestützte Ermittlung der *Aufnahmegeometrie*, beschrieben. Erst durch die Kenntnis der Aufnahmegeometrie und damit der Orientierung der einzelnen Komponenten im Raum ist die Berechnung eines Profilschnittes möglich.

Die Kalibrierung der Kamera erfolgt durch *Mehrebenenkalibrierung*. Ein solches Verfahren wurde von [Tsa86] vorgestellt, welches bei Kalibrierung ab zwei Ebenen sowohl die äußere als auch die innere Orientierung einer Kamera ermittelt. Ein anderes Verfahren zur Mehrebenenkalibrierung ist die Kalibrierung mittels direkter dynamischer Transformation (DLT), welches unter anderem in [PU93] beschrieben wird. Die Kalibrierung nach Tsai hat gegenüber der DLT-Kalibrierung den Vorteil, daß auch die Linsenverzerrung parametrisiert wird. Die DLT-Kalibrierung berücksichtigt keine Linsenverzerrung, hat jedoch gegenüber Tsai den Vorteil, daß zur Berechnung der übrigen Parameter im wesentlichen nur lineare Gleichungssysteme zu lösen sind.

Im Rahmen des Praktikums wurden beide Kalibrierungen eingesetzt, da diese bereits als fertige Implementierungen am Institut vorlagen. Die Ergebnisse der beiden Implementierungen sind nicht einheitlich; bei Tsai erhält man einen Satz von siebzehn Parametern,

während bei DLT die Orientierung in einer einzelnen 4x3-Matrix kodiert wird. Die vorliegende Implementierung kann beide Arten verarbeiten.

Zur Kalibrierung des Systems wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Laserebene fällt mit der zweiten Kalibrierebene zusammen.
- Die Laserebene ist 5 cm von der ersten Kalibrierebene entfernt ($z=50$).

Zur Kalibrierung wurde das in Abbildung 3.3 gezeigte *Kalibriermuster* verwendet. Dieses ist auf einer *Kalibrierplatte* derart aufgebracht, daß es in allen Kalibrierebenen vollständig im Kamerabild sichtbar ist.

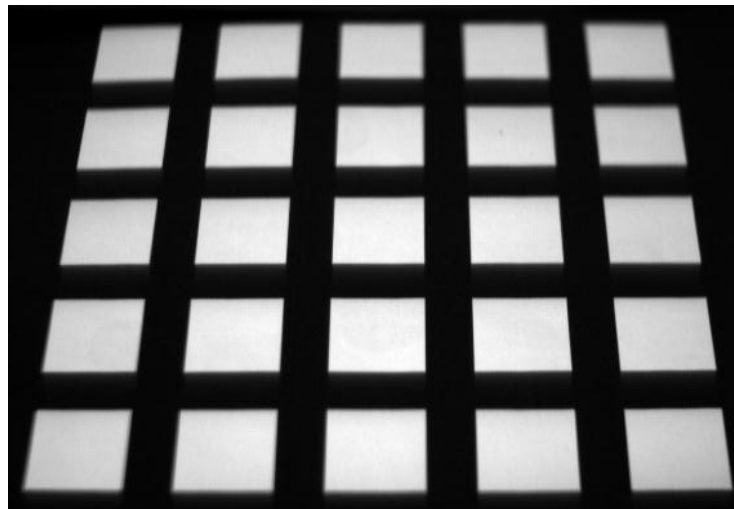


Abbildung 3.3: Kamerasicht des 5x5-Kalibrierusters

Abschnitt 4

Berechnung eines Profilschnittes

In diesem Abschnitt wird die Berechnung eines Profilschnittes ausgehend vom Kameraabbild der projizierten Laserlinie beschrieben. Dazu sind die folgenden Schritte notwendig:

1. Detektion der projizierten Laserlinie
2. Transformation der detektierten Laserlinie im zweidimensionalen Rechnerkoordinatensystem in das dreidimensionale Objektkoordinatensystem

In weiterer Folge werden die angeführten Schritte genauer 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 durch die Kamera aufgenommen wird.

Bei der Aufnahme wird davon ausgegangen, daß die Szene nur mit der Laserlichtquel-

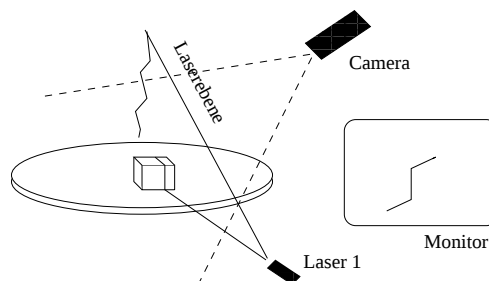


Abbildung 4.1: Reflektion des Laserlichtes auf einer Objektoberfläche

le beleuchtet wird. Tages- bzw. Streulicht ist durch geeignete Maßnahmen 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. Einige Algorithmen zur Detektion von projizierten Laserlinien

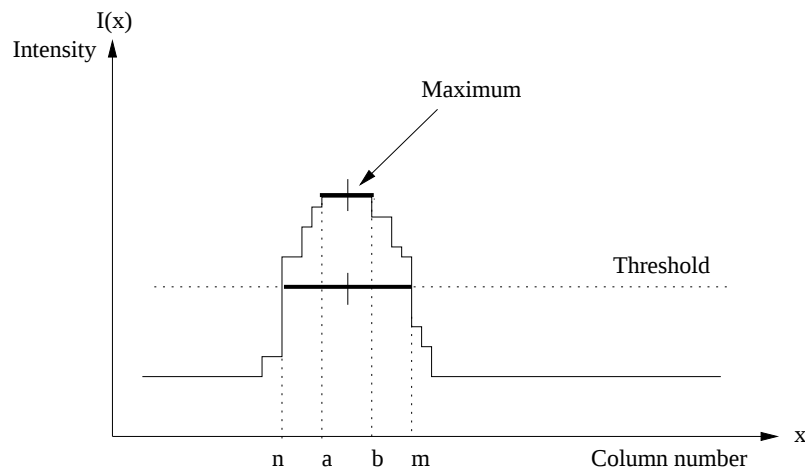


Abbildung 4.2: Signalverlauf einer Bildzeile (aus [Joh93])

in einem Kamerabild sind in [Joh93] erklärt, wobei im Rahmen dieses Praktikums die Detektion über eine einfache Schwellwertbildung realisiert wurde. 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 $p = (n + m)/2$.

4.2 Rücktransformation eines einzelnen Bildpunktes

Durch die Detektion des projizierten Laserlichtes erhält man eine Menge 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. In diesem Abschnitt wird die Rücktransformation dieser Punkte in das Objektkoordinatensystem beschrieben. Die Rücktransformation basiert dabei auf der Technik des “*shape from structured light*” speziell dem *Lichtschnittverfahren*, welche auf dem Triangulationsprinzip beruhen [Shi87]. Eine Definition des Verfahrens “*shape from structured light*” is unter anderem in [HS89] zu finden. Eine genaue Untersuchung des Lichtschnitt-

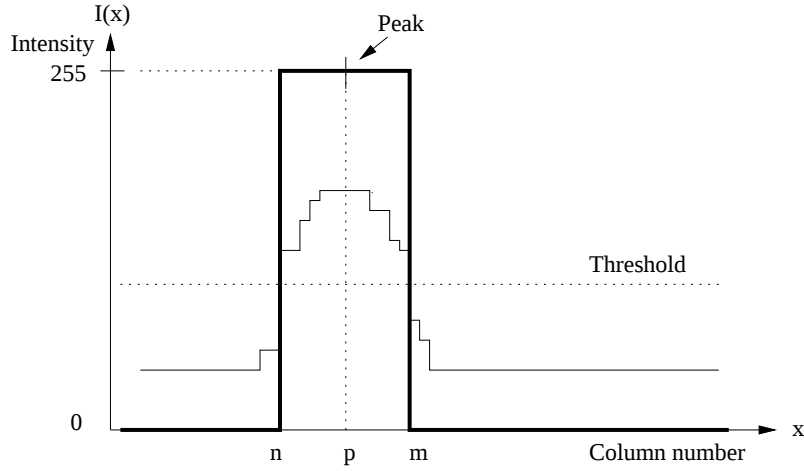


Abbildung 4.3: Signalverlauf nach Schwellwertbildung

verfahrens ist in [Joh93] zu finden. 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:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(u_f - C_x) \cdot d_x \cdot N_{cx}}{N_{fx} \cdot s_x} \\ (v_f - C_y) \cdot d_y \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

2. *Transformation von verzerrten Bildkoordinaten in ideale Bildkoordinaten:* Dies entspricht

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

Die Berechnung erfolgt durch:

$$r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$$

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

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

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

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

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

gegeben ist. Die idealen, unverzerrten Bildkoordinaten werden dann durch

$$x_f = x_d + D_x \quad (4.2)$$

$$y_f = y_d + D_y \quad (4.3)$$

berechnet.

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

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ -f \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

angegeben werden.

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

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = R^T \cdot \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} - T. \quad (4.5)$$

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

1. Transformation des Bildpunktes von Rechnerkoordinatenkoordinaten 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:

$$G = P + t \cdot Q \quad (4.6)$$

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 (4.6 in Koordinatendarstellung lautet also:

$$\begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + t \cdot \left(\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{pmatrix} \right) \quad (4.7)$$

Die Bestimmung des Schnittpunktes der Geraden mit der Laserebene wird durch folgende Berechnung 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

$$t = \frac{d - p_z}{p_z - c_z}. \quad (4.8)$$

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

$$P_w = P + t \cdot Q. \quad (4.9)$$

4.2.2 Verwendung der 4x3-DLT-Matrix

Die Kalibrierung mittels direkter linearer Transformation resultiert in einer 4x3-Matrix A , mit welcher 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

$$Y' = \begin{pmatrix} u'_f \\ v'_f \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

und

$$Y = \begin{pmatrix} u_f \\ v_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u'_f/s \\ v'_f/s \\ s/s \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

gegeben. Die Matrix A ist, wie man aus dem Spalten- und Zeilenrang der Matrix sofort sehen kann, nicht invertierbar. 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 Falle der Profilschnittermittlung ist dies die bekannte *z-Komponente* der Objektpunkte.

Ein Bildpunkt kann durch folgende Vorgangsweise in seine Objektkoordinaten transformiert werden. Gegeben sind die Rechnerkoordinaten $(u_f, v_f)^T$, die bekannte z-Komponente des Punktes im Objektkoordinatensystem, sowie die DLT-Matrix A . Die Berechnung der Objektkoordinaten erfolgt durch folgenden Algorithmus:

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 $(x_w, y_w, z_w)^T = (x_w, y_w, z)^T$

Abschnitt 5

Erweitertes Berechnungsmodell

In diesem Abschnitt wird das Modell zur Profilschnittermittlung dahingehend erweitert, daß eine Erfassung der sichtbaren Oberfläche eines Fundes möglich wird.

5.1 Angepaßtes Aufnahmesystem

Bisher war das System dafür ausgelegt, daß auf einfache Art und Weise Profilschnitte eines Gegenstandes ermittelt werden können. Zur bildhaften Erfassung der sichtbaren Objektoberfläche wird die Laserebene derart positioniert, daß sie senkrecht zur Objektebene steht. Eine graphische Darstellung des angepaßten Aufnahmesystems ist in Abbildung 5.1 zu sehen. Durch die Änderungen ist es möglich, ein Objekt schrittweise durch die Laserebene zu

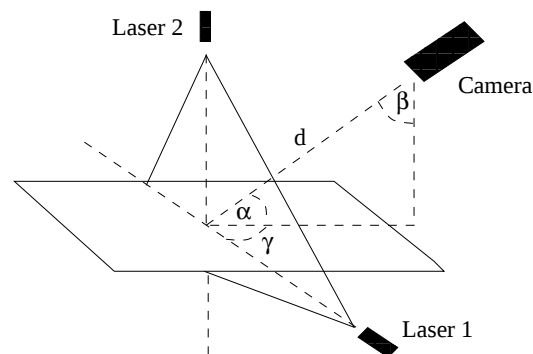


Abbildung 5.1: Aufnahmesystem zur bildhaften Erfassung

führen. Die Kalibrierung dieses Aufnahmesystems erfolgt durch die folgenden drei Schritte:

1. Kalibrierung der Kamera
2. Kalibrierung der Laserebene

3. Kalibrierung der Linearbewegung

Die Kalibrierung der Kamera (Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung) wurde bereits bei der Kalibrierung des Aufnahmesystems zur Profilschnittermittlung beschrieben.

5.1.1 Kalibrierung der Laserebene

Die Kalibrierung der Orientierung der Laserebene erfolgt in zwei Schritten:

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. $z = 50\text{mm}$) zur Objektebene des ersten Schrittes montiert und die Laserebene auf die Objektebene projiziert und ein Punkt S der entstehenden Schnittlinie detektiert.

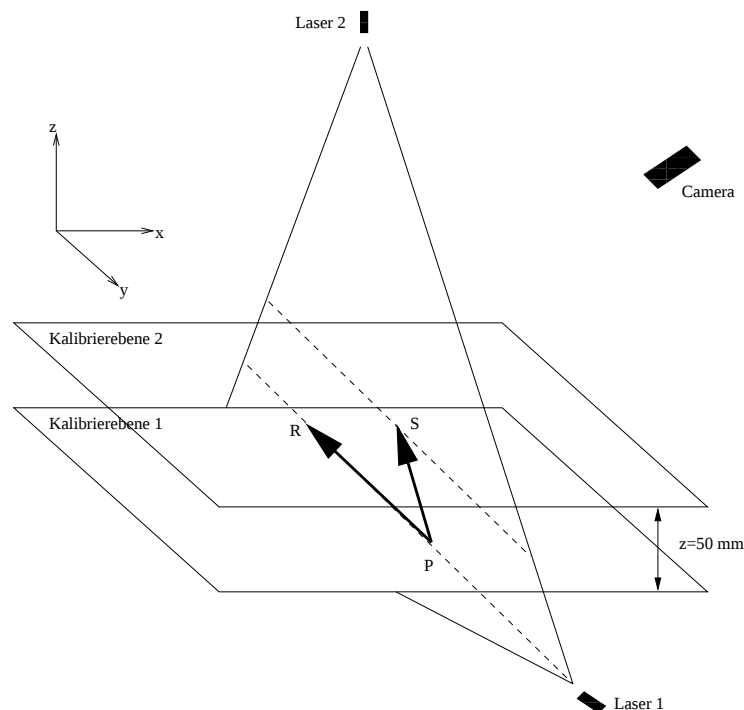


Abbildung 5.2: Kalibrierung der Laserebene

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 5.2). Die Schnittlinie des ersten Kalibrier-schrittes wird durch $L = P + \lambda \cdot (R - P)$ beschrieben. Durch Hinzunahme des Punktes S ergibt sich die Ebenengleichung als

$$E = L + \mu \cdot (S - P) = P + \lambda \cdot (R - P) + \mu \cdot (S - P). \quad (5.1)$$

5.1.2 Kalibrierung der Linearbewegung

Zur Kalibrierung der Linearbewegung wird ein Kalibriermuster auf die Objektebene positioniert, welches einen Schritt der schrittweisen äquidistanten Linearbewegung wiedergibt. Das Kalibriermuster muß dabei Bewegungsrichtung und Bewegungsbetrag eindeutig beschreiben. Das einfachste Muster, das diese Bedingungen erfüllt, besteht aus zwei auf der Objektebene aufgetragenen Punkten F und G . Durch Detektion der beiden Punkte wird die Bewegung durch

$$M = F + i \cdot (G - F) \quad (5.2)$$

beschrieben, wobei i den i -ten Schritt bezeichnet. Abbildung 5.3 zeigt den Vorgang graphisch.

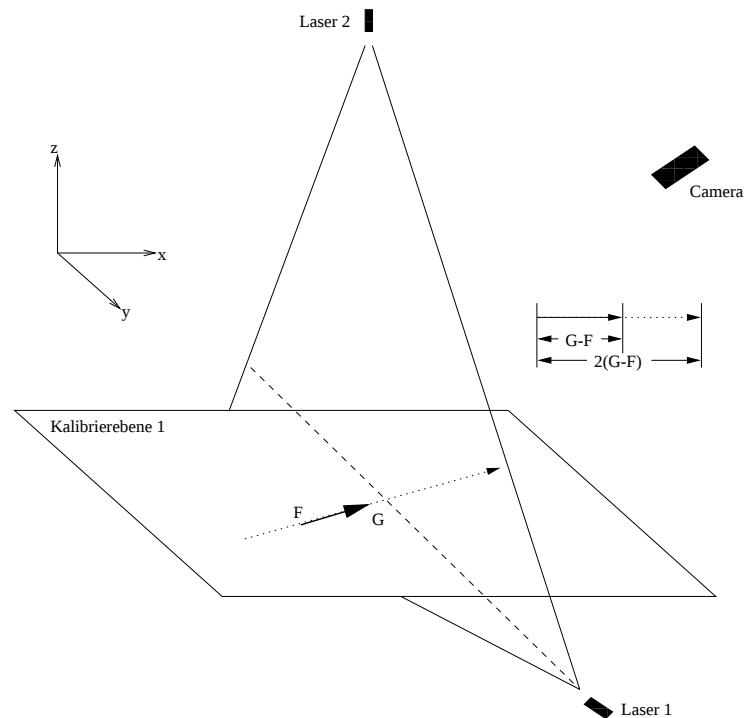


Abbildung 5.3: Kalibrierung der Linearbewegung

5.2 Erweitertes Berechnungsmodell

Folgender Algorithmus beschreibt den Vorgang der bildhaften Erfassung der sichtbaren Oberfläche eines Objektes:

1. Aufnahme der Szene
2. Detektion der projizierten Laserlinie
3. Rücktransformation der detektierten projizierten Laserlichtpunkte in das Objektkoordinatensystem
4. Berechnung der realen Koordinaten der rücktransformierten Oberflächenpunkte
5. Bewegung des Objektes durch die Laserebene
6. Gehe zu Schritt 1, wenn die sichtbare Objektoberfläche noch nicht vollständig erfaßt, sonst Darstellung der erfaßten Objektoberfläche.

Die Schritte 1 und 2 wurden bereits bei der Profilschnittermittlung ausführlich dokumentiert. Die Rücktransformation erfolgt im wesentlichen wiederum mittels der DLT-Matrix. Es wird jedoch für den zur Rücktransformation notwendigen Parameter z jener Wert gesetzt, welcher der z -Komponente der Objektebene entspricht (in unserem Fall $z=0$, da die Objektebene der ersten Kalibrierebene entspricht). Die detektierten Oberflächenpunkte werden durch diese Vorgangsweise auf die Objektebene transformiert. Sei X_{cam} der detektierte Oberflächenpunkt am Kamerasensor, weiters X_{obj} der mittels der DLT-Matrix rücktransformierte Punkt auf der Objektebene. 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 (siehe Formel 5.1), was in Abbildung 5.4 graphisch dargestellt wird.

Der Schnittpunkt X_{surf} wird wie folgt berechnet:

X_{surf} ist jener Punkt für den $L = E$ gilt, also

$$X_{obj} + t \cdot (X_{cam} - X_{obj}) = P + \lambda \cdot (R - P) + \mu \cdot (S - P). \quad (5.3)$$

Anders angeschrieben ergibt sich ein lineares Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \\ z_{obj} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = t \cdot \begin{pmatrix} x_{cam} - x_{obj} \\ y_{cam} - y_{obj} \\ z_{cam} - z_{obj} \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} x_r - x_p \\ y_r - y_p \\ z_r - z_p \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} x_s - x_p \\ y_s - y_p \\ z_s - z_p \end{pmatrix}, \quad (5.4)$$

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

$$X_{surf} = X_{cam} + t_0 \cdot (X_{obj} - X_{cam}) \quad (5.5)$$

beziehungsweise

$$X_{surf} = P + \lambda_0 \cdot (R - P) + \mu_0 \cdot (S - P) \quad (5.6)$$

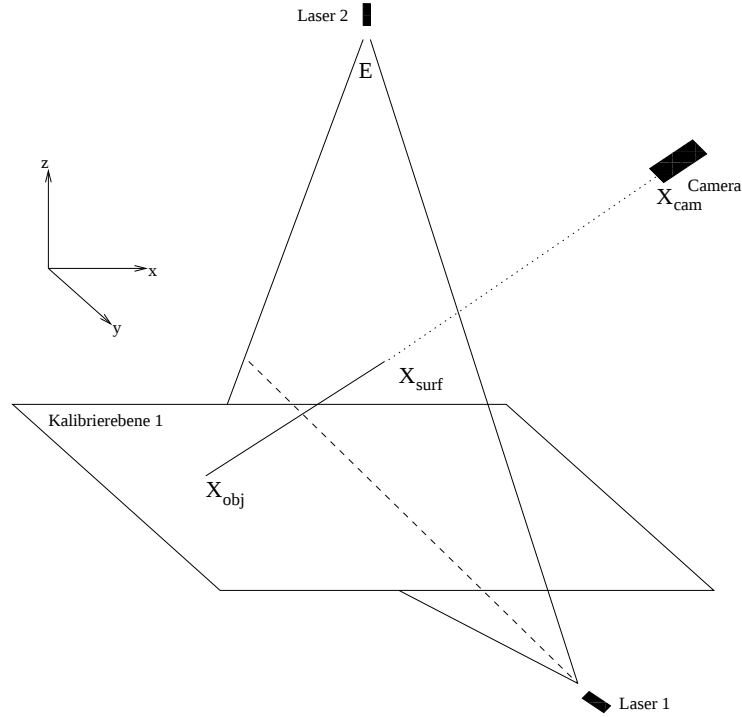


Abbildung 5.4: Berechnung eines Oberflächenpunktes

gegeben.

Nachdem die modifizierte Rücktransformation hergeleitet wurde, wird in weiterer Folge Schritt 4 des oben angeführten Algorithmus modelliert. Zur äquidistanten Bewegung eines Objektes durch die Laserebene ist eine geeignete Vorrichtung zu verwenden (Im Rahmen des Wahlfachpraktikums wurde diese Bewegung manuell unter Zuhilfenahme einer Schablone durchgeführt).

Sei X_{surf} ein rücktransformierter Oberflächenpunkt des Objektes im i -ten Aufnahmeschritt. Sei weiters die Bewegung durch den Vektor $T = G - F$, wobei F und G die kalibrierten Parameter zur Linearbewegung sind. Dann sind seine realen Koordinaten durch

$$X_{real} = X_{surf} - i \cdot T = X_{surf} - i \cdot (G - F) \quad (5.7)$$

gegeben.

Abschnitt 6

Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse und Resultate zusammengefaßt. Zur Untersuchung der Genauigkeit des Systems wurde ein Quader als Referenzobjekt gewählt. Abbildung 6.1 zeigt den Quader mit seinen Dimensionen. In weiterer Folge wird schrittweise der Bearbei-

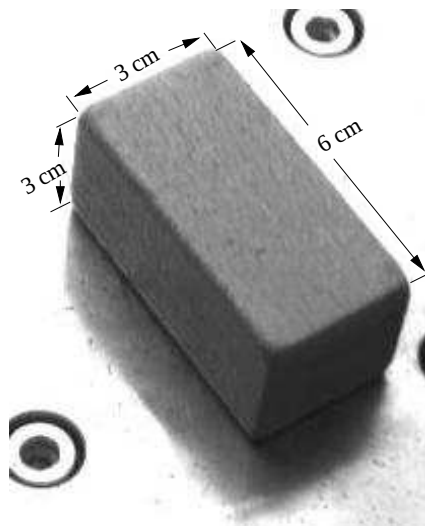


Abbildung 6.1: Originalobjekt Quader

tungsweg von der Aufnahme zur Darstellung des Profiles gezeigt. Im ersten Schritt wird die Laserschnittlinie welche durch Schnitt der Laserebene mit dem Objekt entsteht mit der Kamera aufgenommen (Abbildung 6.2(a)).

Im nächsten Verarbeitungsschritt wird die aufgenommene Laserschnittlinie detektiert und die Rechnerkoordinaten der einzelnen detektierten Bildpunkte ermittelt. Abbildung 6.2(b) zeigt die detektierte Laserlinie. Die Achsen sind mit dem Offset der Koordinaten beschriftet und entsprechen den Koordinaten des Rechnerkoordinatensystems.

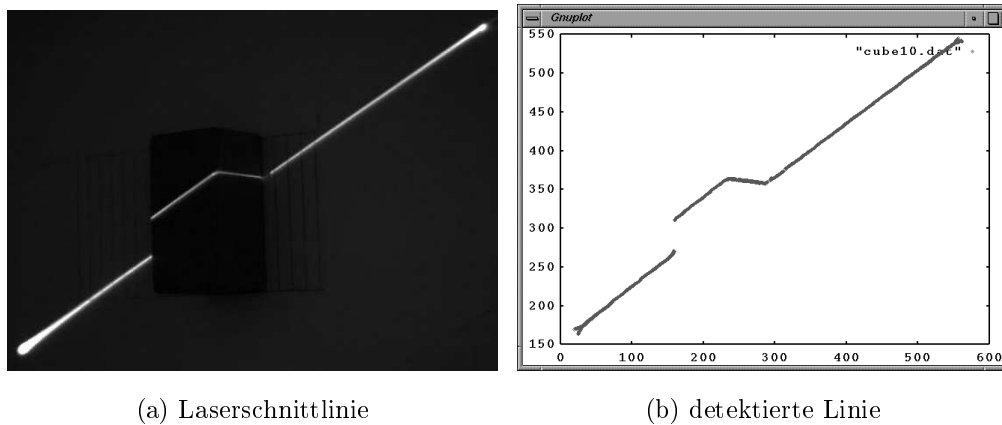


Abbildung 6.2: Laserschnittlinie auf Quader

Im nächsten Schritt werden die detektierten Bildpunkte in das Objektkoordinatensystem transformiert. Abbildung 6.3 ist eine Darstellung der rücktransformierten Bildpunkte. Die Achsen sind mit den realen metrischen Koordinaten des Objektkoordinatensystems beschriftet, was eine Analyse der Genauigkeit erlaubt. Die Rücktransformation wurde mittels der DLT-Matrix berechnet. In diese wird jedoch die Linsenverzerrung nicht enkodiert (siehe Abschnitt 3). Dieser Effekt macht sich speziell am Rand einer Aufnahme bemerkbar. In der Abbildung ist dies am linken und rechten Rand des Profils sichtbar. Der Fehler beträgt hier bis zu 1cm . Die Genauigkeit nimmt zur Bildmitte hin zu. Zu bemerken ist auch, daß die einzelnen Punkte des Profils durch die Rücktransformation zum schwingen beginnen. Eine Verbesserung hier wäre die Hinzunahme eines linearen Ausgleiches der diese Schwingungen glättet.

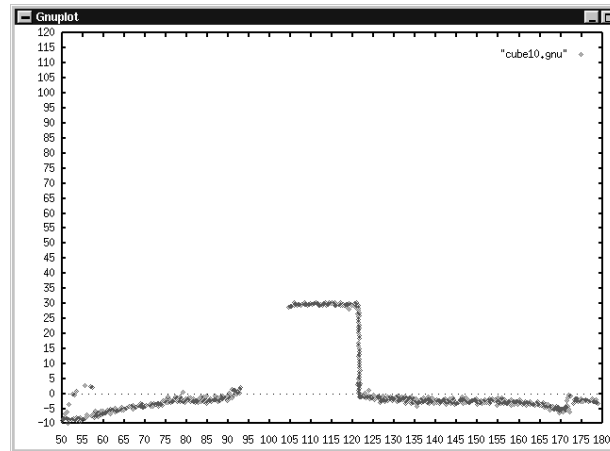


Abbildung 6.3: Profil des Quaders

Als weiteres Beispiel wird in der Folge die Bearbeitung einer Scherbe (Abbildung 6.4) gezeigt. Wieder wird die Laserschnittlinie aufgenommen (Abbildung 6.5), detektiert und rücktransformiert (Abbildung 6.6).



Abbildung 6.4: Originalobjekt Scherbe

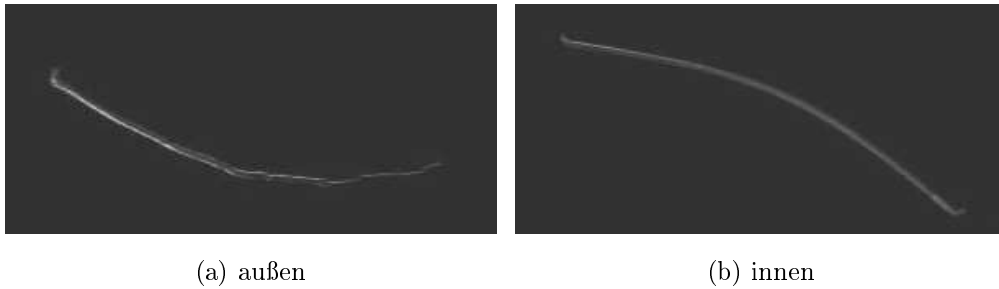


Abbildung 6.5: Laserschnittlinie auf Scherbe

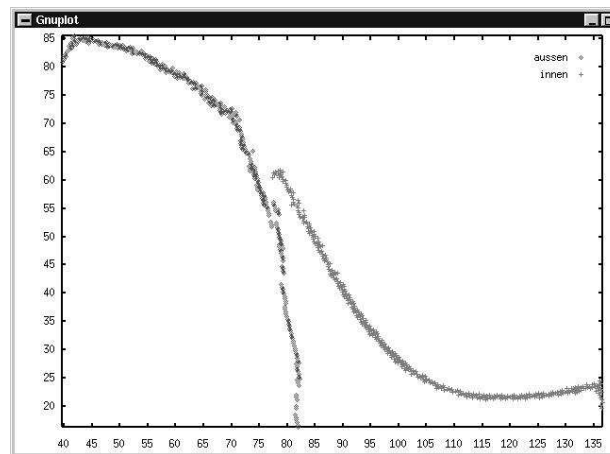


Abbildung 6.6: Profile der Scherbe (links: außen, rechts: innen)

Abschließend sei noch ein Beispiel eines bildhaft erfaßten Quaders (Abbildung 6.8) gegeben. Der Quader wurde durch vierundzwanzig Iterationen des Algorithmus erfaßt. Die Aufnahmen wurden durch manuelle Bewegung des Objektes durch die Laserebene gemacht. Dadurch kommt es zu kleinen Fehlern an den Rändern der Darstellung (siehe Abbildung 6.7 rechter Rand). Durch Verwendung einer präzisen Vorrichtung zur Bewegung des Objektes wären diese Fehler minimal. Die durch die DLT-Rücktransformation auftretenden Fehler in den einzelnen Profilen wurden durch *z-clipping* eliminiert, das heißt, es werden nur die Oberflächenpunkte des Quaders angezeigt, nicht jedoch die detektierten Punkte der auf der Objektebene reflektierten Laserschnittlinie.

Die Genauigkeit der dreidimensionalen Rekonstruktion ist von den zugrundeliegenden Arbeitsgängen abhängig. Je nach Positionierung des Objektes im Kamerabild liegt die Genauigkeit der Rekonstruktion bei Verwendung der DLT-Matrix bei plus/minus 8 mm (siehe

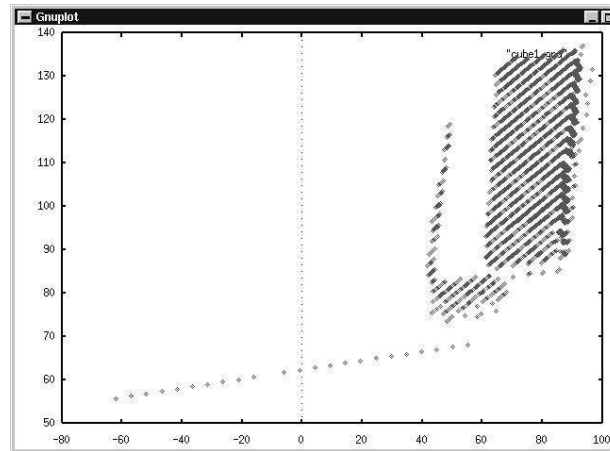


Abbildung 6.7: x-y-Ebenenansicht des rekonstruierten Quaders



Abbildung 6.8: rekonstruierter Quader

Abbildung 6.3). Die Analyse der Rekonstruktion des Quaders ergibt einen Fehler von maximal 1 mm in der x-z-Ebene und 1.8 mm in der y-z-Ebene.

Abschnitt 7

Zusammenfassung und Ausblicke

Ausgehend von der Vermittlung der Grundlagen der Bildgenerierung wurde ein System beschrieben, das die Akquisition von Objektoberflächen auf Basis des Lichtschnittverfahrens ermöglicht. Neben den Erfordernissen der Kalibrierung eines solchen Systems wurde die Rückrechnung der realen Objektkoordinaten aus den Rechnerkoordinaten detailliert beschrieben. Durch Verwendung der DLT-Matrix wurde eine effiziente Vorgangsweise dieser Rücktransformation geschaffen. Da jedoch bei dieser Vorgangsweise die Linsenverzerrung keine Berücksichtigung findet sind Fehler speziell an den Bildrändern unvermeidbar. Eine mögliche Verbesserung wäre es, vor der Rücktransformation die verzerrten Koordinaten in unverzerrte Koordinaten umzurechnen.

Die erzielten Ergebnisse zeigten weiters, daß durch die Rücktransformation die erhaltenen Objektkoordinaten zu Schwingungen neigen. Diese könnten durch lineare Ausgleichsrechnung oder Medianfilterung geglättet werden.

Die Genauigkeit der bildhaften Erfassung gesamter sichtbarer Oberflächen mit diesem System ist aufgrund der äquidistanten Abtastung des Objektes abhängig von der Strukturierung der Oberfläche des zu erfassenden Objektes. Durch die lineare Bewegung ist es außerdem nur möglich, das Objekt von einer Seite her aufzunehmen. Durch Verwendung eines Rotationstellers, der das Objekt in der Laserebene dreht, und variablen Drehwinkeln, welche sich aus der Strukturierung der Objektoberfläche berechnen lassen, kann das System maßgeblich verbessert werden (siehe dazu auch [Lis98]).

Literaturverzeichnis

- [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.
- [HS89] Robert M. Haralick and Linda G. Shapiro. Glossary of computer vision terms. *Pattern Recognition*, 24(1):69–93, 1989.
- [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.
- [Ken90] P.M. Kenrick. *Rim-forms of some Relief-decorated Vessels in Italian Terra Sigillata*. Conspectus formarum terrae sigillatae italico modo confectae, 1990.
- [KKS96] Reinhard Klette, Andreas Koschan, and Karsten Schlüns. *Computer Vision - Räumliche Information aus digitalen Bildern*. Vieweg, 1996.
- [Lis98] Christian Liska. Robuste und adaptive Bildgewinnung mittels Laserlicht, Spezifikation zur Diplomarbeit. Technical Report PRIP-TR. 51, Vienna University of Technology, Institute for Automation, Dept. of Pattern Recognition and Image Processing, 1998.
- [Men91] Christian Menard. Das Stereoaufnahmeverfahren, ein Verfahren zur bildhaften Erfassung von archäologischen Fundgegenständen. Master’s thesis, Vienna University of Technology, Institute for Automation, 1991.
- [OTV93] C. Orton, P. Tyers, and A. Vince. Pottery in Archaeology, 1993.
- [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.

- [Sab91] Robert Sablatnig. Das Lichtschnittverfahren, ein Verfahren zur Erfassung archäologischer Fundgegenstände. Master's thesis, Vienna University of Technology, Institute for Automation, 1991.
- [Shi87] Yoshiaki Shirai. *Three-Dimensional Computer Vision*. Springer-Verlag, 1987.
- [SMD94] R. Sablatnig, C. Menard, and P. Dintsis. Projektantrag: Bildhafte Erfassung von archäologischen Fundgegenständen. Technical Report Projektantrag P09954-SPR, Vienna University of Technology and Vienna University, Institut für Automation, Abt. f. Mustererkennung und Bildverarbeitung and Institut für klassische Archäologie, 1994.
- [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.
- [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.