

Tiefendatenregistrierung von rotationssymmetrischen Objekten

Problemstellung der Diplomarbeit

21. Juli 1998

Martin Kampel

Abstract

The aim of the master thesis is to develop an algorithm for registration of two different views of rotational symmetric objects. The method proposed uses the axis of rotation of the viewed objects to bring multiple range images into alignment. The task of the system is the construction of models of archaeological finds.

After a general introduction including the 3D acquisition technique different, methods of registration are explained. The structure of the system and its tasks are presented.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. Einleitung | 2 |
| 2. Bildaufnahme | 3 |
| 2.1. Aufnahmegeometrie | 3 |
| 2.2. Kodierte Lichtschnitttechnik | 4 |
| 2.3. Tiefenbilder | 7 |
| 2.4. Fehler und Ungenauigkeiten | 7 |
| 3. Kalibrierung | 9 |
| 3.1. Kamerakalibrierung | 10 |
| 3.2. Projektorkalibrierung | 11 |
| 3.3. Systemkalibrierung | 12 |
| 3.4. Fehler und Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung | 13 |
| 4. Bestimmung der Rotationsachse | 14 |
| 5. Registrierung | 15 |
| 5.1. Bildregistrierung | 16 |
| 5.2. Tiefendatenregistrierung | 17 |
| 5.3. Fehler und Ungenauigkeiten | 20 |
| 6. Ziele der Diplomarbeit | 21 |
| 7. Zusammenfassung | 22 |
| 8. Literatur | 23 |

1. Einleitung

Am Institut für Bildverarbeitung und Mustererkennung wurde im Rahmen des Projektes "Bildhafte Erfassung von archäologischen Fundgegenständen" [SMD94] ein System zur rechnerunterstützten Vermessung der dreidimensionalen Struktur von archäologischen Scherben entwickelt. Dieses System soll dem Archäologen als Werkzeug dienen und den Zeit- und Arbeitsaufwand am Ausgrabungsort reduzieren, sowie eine objektive, wiederholbare Erfassung des Materials liefern. Die gefundenen Scherben werden vermessen, gezeichnet und katalogisiert.

Die Gesamtheit aller Oberflächenpunkte eines Objektes wird Objektoberfläche genannt. Die Konstruktion eines 3D-Oberflächenmodells eines Scherbens ist für die Objekterkennung (z.B. Klassifizierung von archäologischen Fundstücken) von Bedeutung, da durch die Dreidimensionalität der zu interpretierenden Bildinhalte Rückschlüsse auf die Objektform, Objektgröße und Objektgeometrie vereinfacht werden [KKS96].

Die aus dem Aufnahmesystem (Abschnitt 3) resultierenden Tiefendaten ergeben jedoch noch kein vollständiges 3D Oberflächenmodell, da die aus einer Aufnahmerichtung sichtbare Objektfläche nur einen Teil des Objektes darstellt. Die Objekte werden aus mindestens zwei Richtungen aufgenommen und in getrennten Tiefenbildern abgespeichert. Um ein 3D Oberflächenmodell zu konstruieren, müssen die verschiedenen Ansichten des Objektes in ein einheitliches Koordinatensystem übertragen werden. Dieser Schritt wird Registrierung genannt.

Archäologische Fundstücke, wie Scherben oder Vasen, haben die Eigenschaft, daß sie rotationssymmetrisch sind, da sie auf Töpferscheiben gefertigt wurden. Durch diese charakteristische Form ist eine Bestimmung der Rotationsachse möglich [Hal97], [YM97].

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll eine Methode entwickelt werden, die mit Hilfe der Lage der Rotationsachse verschiedene Ansichten eines Scherbens registriert.

Dieses Dokument ist folgendermaßen aufgebaut: Im Abschnitt 2 wird die Bildaufnahme und die 3D-Aufnahmetechnik mit Hilfe von kodierten Lichtstreifen beschrieben. In Abb. 1 ist diese Stufe als "3D-Aufnahme" von Objektansicht 1 und Objektansicht 2 eingezeichnet.

Im Abschnitt 3 wird das geometrische Modell des Aufnahmesystems, welches aus einer CCD-Kamera und einem Lichtprojektor besteht, erklärt. Die Berechnung der Parameter zur Beschreibung des geometrischen Modells wird Kalibrierung genannt und wird in nachfolgender Abbildung als erster Arbeitsschritt zur Berechnung eines 3D-Oberflächenmodells gezeigt.

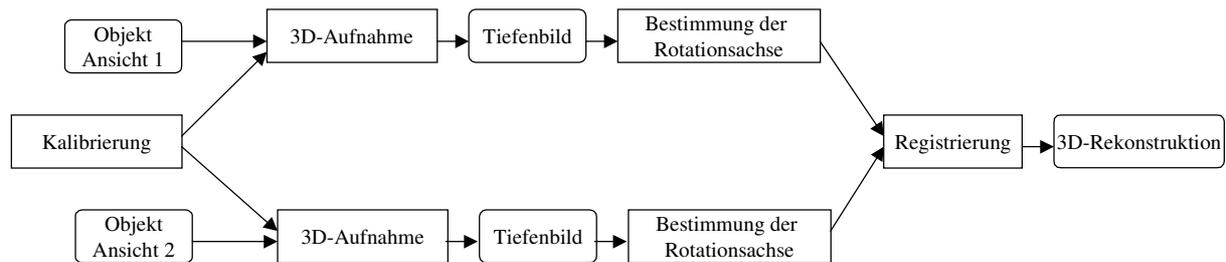


Abb. 1: Arbeitsschritte einer 3D-Oberflächenrekonstruktion aus 2 Objektansichten

Mittels den aus der Aufnahme resultierenden Tiefenbildern von Objektansicht 1 und Objektansicht 2 wird für jede Ansicht eine Rotationsachse bestimmt. Dieser Vorgang wird im Abschnitt 4 beschrieben. Mit Hilfe der beiden Achsen werden die beiden Objektansichten registriert und ein Oberflächenmodell berechnet. Im Abschnitt 5 wird auf die Thematik der Registrierung eingegangen.

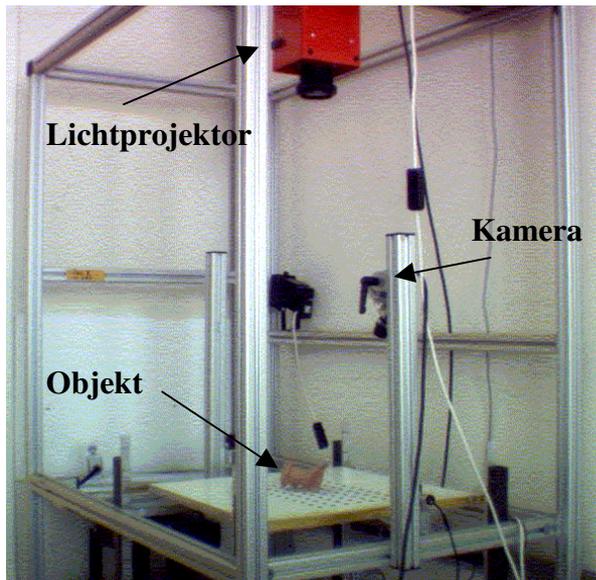
Im letzten Abschnitt wird ein Zeitplan für den Ablauf der Diplomarbeit angegeben und es werden die Ziele der Diplomarbeit zusammengefaßt.

2. Bildaufnahme

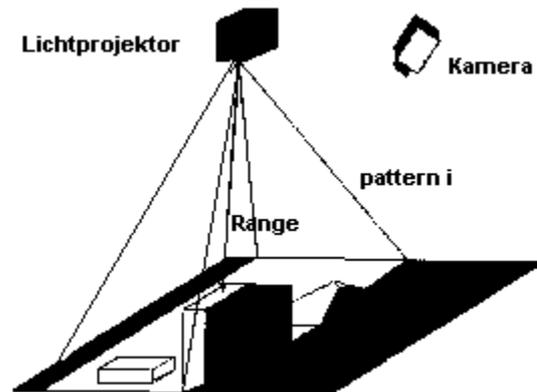
In diesem Abschnitt wird das Bildaufnahmeverfahren vorgestellt. Es werden die Geräteanordnung des Aufnahmesystems, die angewandte Technik und deren Nachteile, sowie die aus der Aufnahme resultierenden Tiefenbilder beschrieben.

2.1. Aufnahmegeometrie

Das Aufnahmesystem besteht aus einer CCD-Kamera und einem LCD-640 Streifenprojektor [Wol95]. Der Projektor wird zur Generierung von Lichtebenen benötigt und die Kamera dient als visueller Sensor. Die Aufnahmeanordnung ist in Abb. 2 dargestellt.



Anordnung im Labor



Anordnung skizziert

Abb. 2: Versuchsaufbau mit Streifenprojektor, Kamera und Objekt

Der Lichtprojektor projiziert mehrere unterschiedliche Lichtstreifen auf die im Blickfeld der Kamera liegende Objektoberfläche. Anschließend werden Aufnahmen der an den Objektoberflächen reflektierten Lichtmuster erzeugt. Durch Auswertung der beobachteten Struktur in den Bildern läßt sich die Entfernung eines Objektes zur Kamera und die Lage des Objektes im Raum bestimmen. Die verwendete Technik wird im nächsten Abschnitt erklärt.

2.2. *Kodierte Lichtschnitttechnik*

Bei der kodierte Lichtschnitttechnik werden binär kodierte Lichtstreifen auf das zu betrachtende Objekt projiziert (Abb. 3). Damit die einzelnen Lichtebenen unterschieden werden können, werden sie in einer zeitlichen Abfolge erzeugt und aufgenommen. Durch Anwendung einer Schwellenwertoperation auf die aufgenommenen Bilder lassen sich die vom Projektor beleuchteten Szenenbereiche von den unbeleuchteten trennen und es werden Binärbilder erzeugt. Der Schwellenwert wird durch die zusätzliche Aufnahme der Szene im vollbeleuchteten und im unbeleuchteten Zustand ermittelt, indem der Durchschnitt dieser beiden Grauwertbilder berechnet wird. Dadurch wird auch eine relative Unabhängigkeit von der Umgebungsbeleuchtung erreicht.

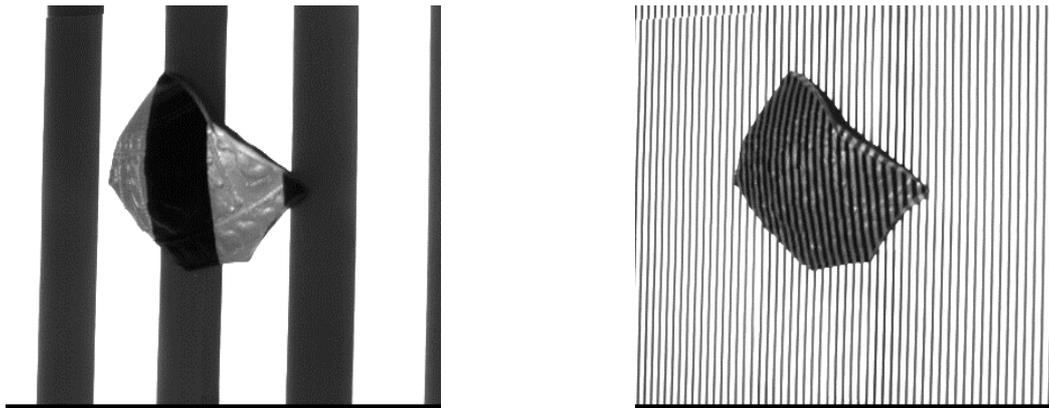


Abb. 3: Scherbe mit kodiertem Streifenmuster

Mehrere Lichtmuster können nicht gleichzeitig auf das Objekt projiziert werden, da aufgrund von möglichen Verdeckungen eine eindeutige Zuordnung zwischen projiziertem und im Kamerabild sichtbarem Muster nicht gewährleistet ist. Diese Eindeutigkeit der Zuordnung wird durch die Codierung des Musters erreicht, weil die Identifizierung des Musters im Kamerabild mit Hilfe der Codierung des projizierten Musters möglich ist (siehe Abb. 4). Die erhaltenen Binärbilder werden als Bitebenen im Bildspeicher zum sogenannten Bit-Plane-Stack zusammengefaßt. Nachdem für jeden projizierten Lichtcode ein Binärbild eingefügt wurde, enthält jedes Pixel (x_k, y_k) im Bit-Plane-Stack für den an dieser Position abgebildeten Szenenpunkt eine n -stellige Bitfolge, die die Beleuchtungsrichtung des Projektors zu diesem Szenenpunkt eindeutig charakterisiert.

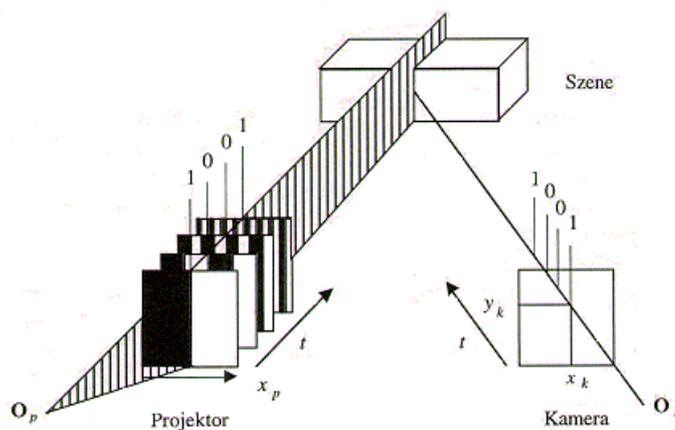


Abb. 4: Binärcodierte Lichtschnitttechnik [KKS96]

Die 3D-Koordinaten der in den aufgenommenen Bildern abgebildeten Objektoberflächenpunkte ergeben sich bei bekannter Aufnahmegeometrie (Abschnitt 3) durch Anwendung der Triangulation (Abb. 5).

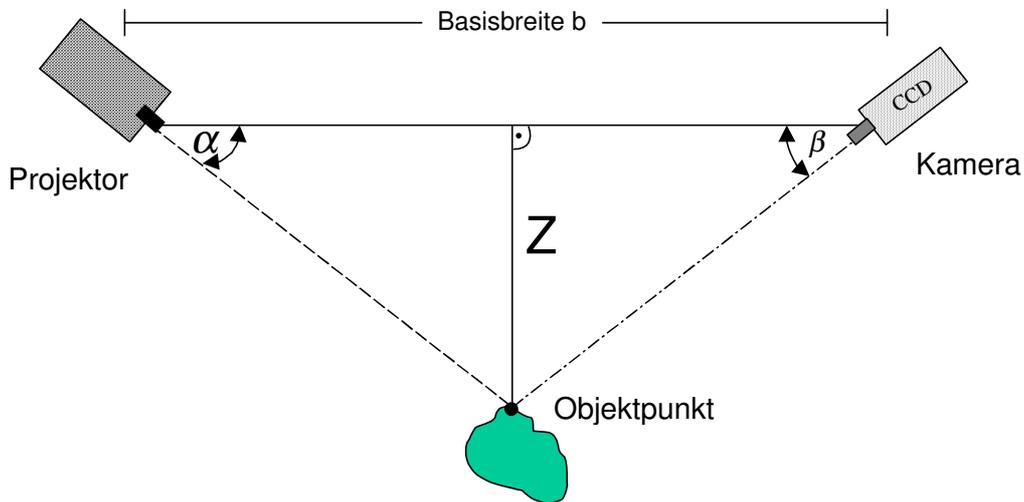


Abb. 5: Triangulationsprinzip

| | | |
|----------------------|----------|--|
| Bekannte Parameter: | α | Winkel zwischen Basis und Lichtstrahl |
| | β | Winkel zwischen Basis und Kameranormalen |
| | b | Abstand zwischen Projektor und Kamera |
| Gesuchter Parameter: | Z | Abstand zwischen Objektpunkt und Basisbreite |

Der Objektpunkt, der Projektor und die Kamera bilden eine Ebene. Die Winkel α , β und der Basisabstand b sind durch die Kalibrierung gegeben. Dann läßt sich der Abstand Z des Objektpunktes und der Basisbreite unter Verwendung des Sinussatzes wie folgt ermitteln:

$$Z = \frac{b \sin \alpha \sin \beta}{\sin(180 - \alpha - \beta)} \quad (1)$$

Als Ergebnis werden Tiefenbilder erzeugt, die im folgenden Abschnitt genauer beschrieben werden.

2.3. Tiefenbilder

Das Ergebnis der Aufnahme sind Tiefenbilder (oder Range Images). In einem Tiefenbild werden Abstandswerte zwischen den sichtbaren Punkten der Objektoberfläche und dem Ursprungspunkt (siehe Abschnitt 3.1) gespeichert.

Die Daten werden als $2\frac{1}{2}D$ im Gegensatz zu 3D bezeichnet [KKS96], da in einem, nur aus einer Richtung aufgenommenen Tiefenbild, nur die aus dieser Richtung sichtbare Objektoberfläche beschrieben werden kann. Der Begriff $2\frac{1}{2}D$ veranschaulicht daher eine in bezug auf das Objekt unvollständige räumliche Information.

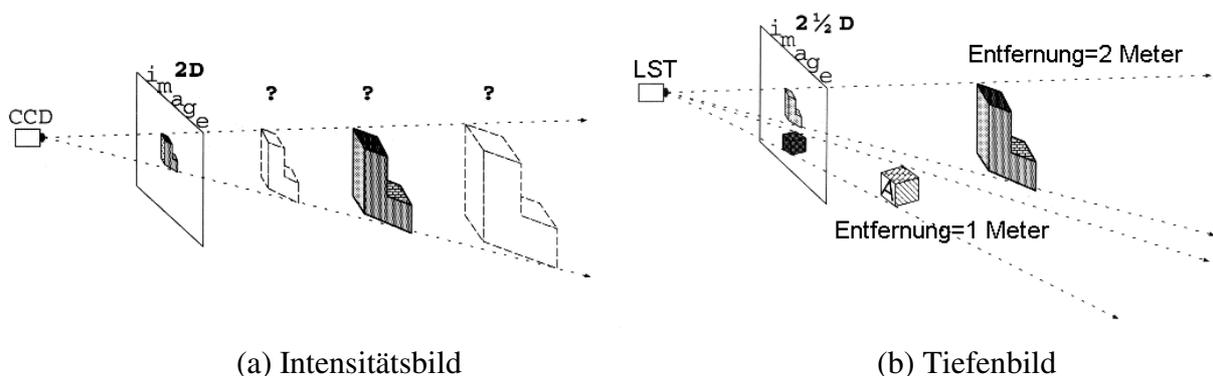


Abb. 6: Vergleich: Aufnahme eines Intensitätsbildes und eines Tiefenbildes.

In einem Intensitätsbild werden Grau- oder Farbwerte von Bildpunkten abgespeichert. Ein Objektpunkt einer dreidimensionalen Szene wird in der zweidimensionalen Bildebene abgebildet (mittels Zentral- oder Parallelprojektion). In Abb. 6 werden die Unterschiede zwischen Intensitätsbild und Tiefenbild veranschaulicht. Die Abkürzung CCD bedeutet, daß eine CCD-Kamera als „2D- Sensor“ dient.

In einem Tiefenbild ist im Gegensatz zum Grauwertbild räumliche Information vorhanden. In obiger Abbildung ist mit der Abkürzung LST die Lichtschnitttechnik als Aufnahmeverfahren gemeint.

2.4. Fehler und Ungenauigkeiten

Bei der Anwendung der kodierten Lichtschnitttechnik wird die Genauigkeit des berechneten Tiefenbildes durch eine Reihe von Bedingungen beeinflusst. Diese werden in den nächsten Abschnitten erläutert.

2.4.1. Verdeckungen und Ungenauigkeiten an den Kanten

Für einige Oberflächenpunkte (in Abb. 7 schraffiert eingezeichnet) ist es aufgrund von Abschattungen bzw. Verdeckungen nicht möglich Tiefenwerte zu berechnen. Es können zwei Arten von Verdeckungen auftreten:

- Lichtverdeckung: Teile des Objektes werden nicht beleuchtet.
- Kameraverdeckung: Teile des Objektes sind für die Kamera unsichtbar

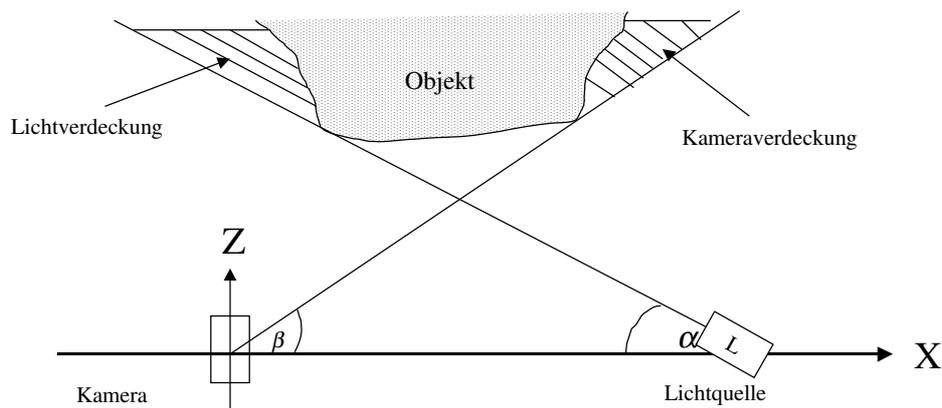


Abb. 7: Nichtsichtbarkeit von Objektpunkten aufgrund von Verdeckungen

Folgende Faktoren beeinflussen die Genauigkeit des berechneten Tiefenbildes:

- die große Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Bestimmung von α und β (Abschnitt 2.2)
- die Genauigkeit der Kalibrierung (Abschnitt 3)
- Korrekte Detektion der Lichtstreifen im Kamerabild [Tro95]

2.4.2. Falsches Bezugssystem

Bei der Berechnung von Tiefenwerten ist zu beachten, daß sich die Daten auf unterschiedliche Koordinatensysteme beziehen können. Ein Tiefenwert könnte einerseits die Entfernung zur Kamera und andererseits die Entfernung zur Ebene $z = 0$ angeben. Im folgenden Beispiel ist dieser Unterschied veranschaulicht.

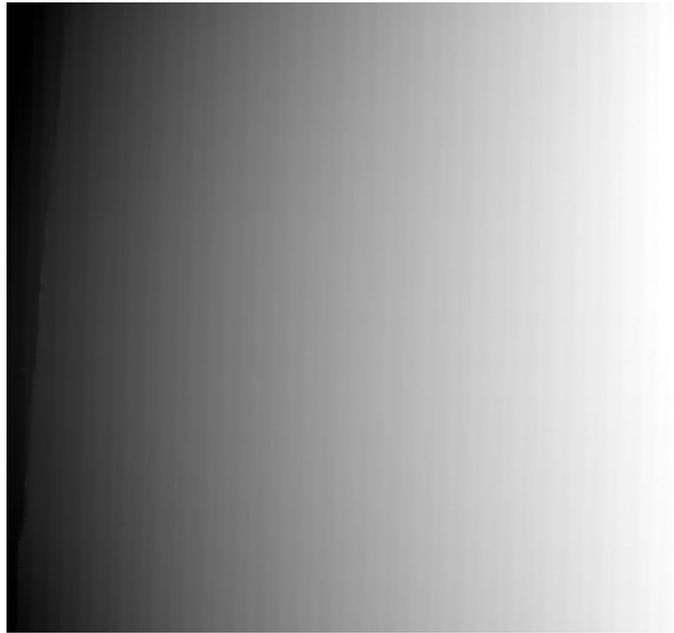


Abb. 8: Tiefenbild einer Ebene bezogen auf das Kamerakoordinatensystem

Das Tiefenbild einer Ebene sollte für jeden Punkt der Ebene gleiche Tiefenwerte besitzen. In Abb. 8 sieht man jedoch, daß sich die Tiefenwerte von rechts nach links in konzentrischen Kreisen verändern. Das bedeutet, daß hier das Kamerakoordinatensystem im Gegensatz zum Objektkoordinatensystem als Bezugssystem verwendet wurde. Die unterschiedlichen Werte geben die steigende Entfernung zur Kamera wieder, die sich bei der Aufnahme am rechten Rand befand.

3. Kalibrierung

Für die Auswertung und Weiterverarbeitung digitaler Bilder ist es wichtig, die Lage des Sensors bezüglich eines Referenzkoordinatensystems, sowie die Parameter zur Beschreibung der Abbildungsgeometrie zu kennen, da diese die Entstehung des Bildes beeinflussen. Um die Parameter zur Beschreibung der Aufnahmegeometrie zu bestimmen, muß eine Kalibrierung durchgeführt werden. Das Aufnahmesystem besteht aus einer Kamera und einem Projektor. Es müssen daher beide Komponenten kalibriert werden. Die folgenden Abschnitte befassen sich mit dem geometrischen Modell der Kamera und des Projektors.

3.1. Kamerakalibrierung

Es wird zwischen zwei Klassen von Parametern zur Beschreibung des Kameramodells unterschieden:

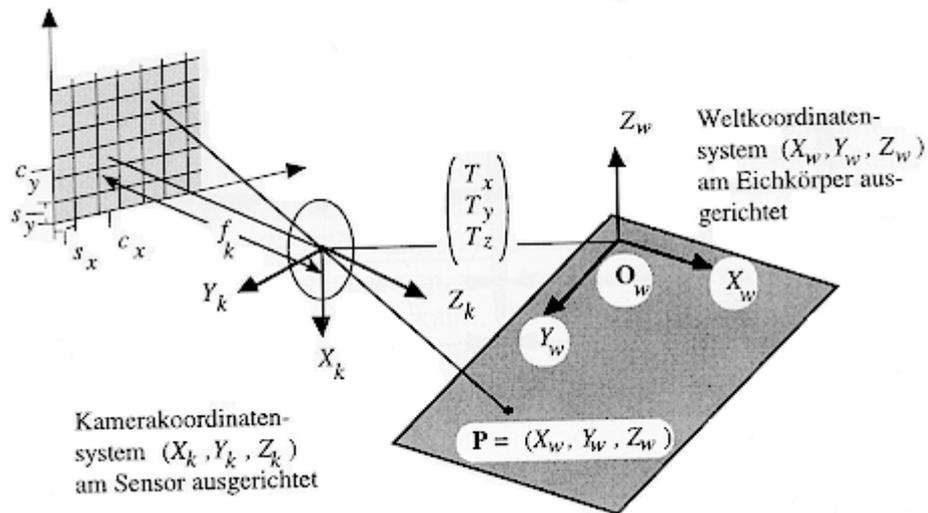


Abb. 9: Geometrisches Kameramodell

Äußere Parameter: Diese beschreiben die Lage des kamerazentrierten Koordinatensystems bezüglich eines durch den Eichkörper vorgegebenen Weltkoordinatensystems. Die Transformation eines Punktes (X_w, Y_w, Z_w) im Weltkoordinatensystem in den Punkt (X_k, Y_k, Z_k) im Kamerakoordinatensystem (siehe Abb. 9) wird durch eine Rotation und eine anschließende Translation beschrieben:

- drei Rotationsparameter $\omega \dots$ Rotation um X_k - Achse
 $\phi \dots$ Rotation um Y_k - Achse
 $\kappa \dots$ Rotation um Z_k - Achse
- drei Translationsparameter T_x, T_y, T_z

Innere Parameter: Diese beschreiben die Abbildungseigenschaften des Sensors und werden für die Transformation von 3D-Kamerakoordinaten in 2D-Bildpunkten verwendet.

- *Fokale Länge f_k :* bezeichnet den Normalabstand der Bildebene vom Projektionszentrum

- *Bildhauptpunkt* (c_x, c_y) : Schnittpunkt der Bildebene mit der optischen Achse der Kamera
- κ_1, κ_2 : Koeffizienten der Linsenverzerrung
- s_x : Skalierungsfehler, der durch die nicht exakte Synchronisation zwischen der Bilddigitalisierungseinheit und der Kamerahardware begründet ist.

Für die Abbildung realer Szenenpunkte (X, Y, Z) des XYZ-Raumes auf 2D-Bildpunkte $p = (x, y)$ wird die Zentralprojektion [KKS96] angenommen. Folgende Formel beschreibt den Zusammenhang mittels der projektiven Koordinaten $\tilde{m} = (x, y, t)^T$, $\tilde{M} = (X, Y, Z, T)^T$ und der Transformationsmatrix \tilde{P} .

$$\tilde{m} = \tilde{P} \cdot \tilde{M} \quad (2)$$

3.2. Projektorkalibrierung

Das Projektormodell kann analog zum Kameramodell beschrieben werden. Es wird ebenso mit Hilfe der Zentralprojektion berechnet. Formel 3 beschreibt den Zusammenhang zwischen einem Szenenpunkt (X, Y, Z) und der Projektorkoordinate s (Abb. 10), wobei $\tilde{n} = (s, t)^T$ und $\tilde{N} = (X, Y, Z)^T$ in projektiven Koordinaten gegeben sind. \tilde{P} entspricht der Transformationsmatrix.

$$\tilde{n} = \tilde{P} \cdot \tilde{N} \quad (3)$$

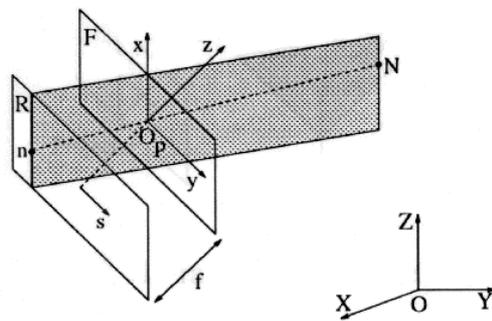


Abb. 10: Geometrisches Projektormodell

Die Projektorkoordinate s (entspricht im Kameramodell den Bildkoordinaten) steht senkrecht zu den Lichtstreifen (Abb. 10). Die fokale Länge f bezeichnet den Abstand zwischen der Projektorbildebene R und der Fokalebene F.

3.3. Systemkalibrierung

Das Aufnahmesystem (siehe Abschnitt 2) besteht aus einem Projektor und einer Kamera. Es müssen daher die Parameter für beide Komponenten berechnet werden. Abb. 11 veranschaulicht die Aufnahmegeometrie.

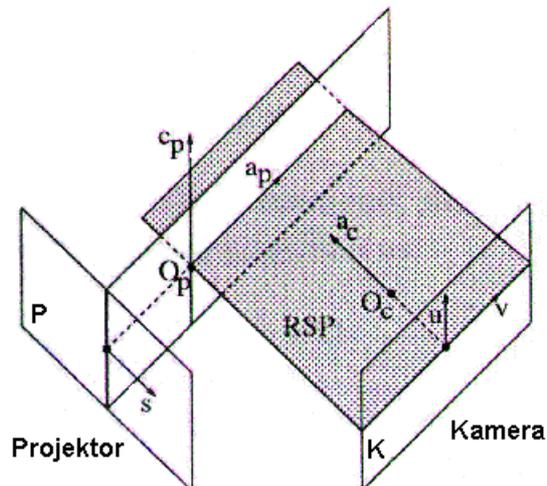


Abb. 11: Sensormodell

Es werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die Projektorstreifen stehen parallel zu den Bildspalten, um "gerade" Schnitte in der Ebene RSP (range sensor plane) zu bekommen.
- Die Lichtstreifen sind binär kodiert, um eine eindeutige Zuordnung Lichtstreifen - Bildpunkt zu ermöglichen.
- Die optischen Achsen der Kamera und des Projektors liegen in derselben Ebene.

Das Sensormodell besteht aus einer Projektorbildebene P und einer Kamerabildebene K. a_p bzw. a_c bezeichnen die optischen Achsen des Projektors und der Kamera. O_p bzw. O_c markieren die optischen Zentren.

Die RSP-Ebene ist definiert durch jene Bildspalte, die durch den Bildhauptpunkt ($u = u_0$) geht.

Eine genaue Beschreibung zur Berechnung aller Parameter ist in [Tro95] angegeben. Weitere Informationen zum Thema Kalibrierung befinden sich in [Tsa86], [LT87] und [Wen92].

3.4. Fehler und Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung

Die Robustheit der Kalibrierung hängt von der Exaktheit der gemessenen Bildkoordinaten der Kalibrierpunkte und der gemessenen Projektorkoordinaten an den Kalibrierpunkten ab. Ebenso führt ein unpräziser Kalibrierkörper zu instabilen Ergebnissen, weil dadurch die Genauigkeit der a priori bestimmten 3D-Koordinaten der Kalibrierpunkte nicht gewährleistet ist. Die Lage des Bildhauptpunktes ist nicht notwendigerweise mit dem Bildmittelpunkt identisch, da der CCD-Chip nur annähernd parallel zur Bildebene liegt.

Die genannten Fehler und Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung beeinflussen die Bildaufnahme (Abschnitt 2). Die Berechnung der Tiefenwerte erfolgt mittels der Parameter der Kalibrierung. Zum Beispiel führt ein falsch berechneter Winkel α zwischen Basis und Lichtstrahl zu einem falschen Abstand Z zwischen Objektpunkt und Basisbreite (siehe Abschnitt 2.2).

4. Bestimmung der Rotationsachse

Für rotationssymmetrische Objekte gilt, daß alle Oberflächennormalen ihre Rotationsachse schneiden [YM97]. Gefäße, die mit Hilfe eines Drehtellers gefertigt wurden sind rotationssymmetrisch. Dies gilt ebenso für Teile von rotationssymmetrischen Objekten (z.B. Scherben, Abb. 12.b).

Die Berechnung der Rotationsachse ist für jede in einem Tiefenbild gespeicherte Objektansicht notwendig, da mit Hilfe der Achsen verschiedene Ansichten eines Scherbens registriert (Abschnitt 5.2) werden.

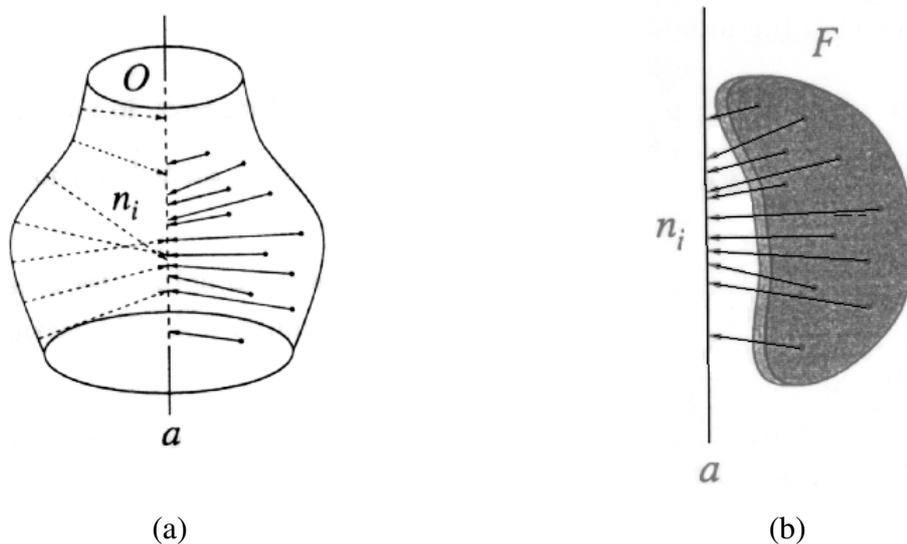


Abb. 12: [Hal97] Die Oberflächennormalen n_i eines rotationssymmetrischen Objektes O schneiden die Rotationsachse a ; dies gilt für ganze Objekte (a) und für Teile eines Objektes (b).

In [YM97] wird eine auf die Hough-Transformation basierende Methode vorgestellt. Mehrere Oberflächenpunkte werden zu ebenen Patches zusammengefaßt. Die Abstände zwischen Oberflächenpunkten und dem zugehörigen Patch werden iterativ minimiert, um einen ebenen Patch zu erhalten. Für jeden Objektpunkt i wird so eine Oberflächennormale n_i berechnet. Alle n_i ($P(x, y, z) \in n_i$) werden in einen 3D-Parameterraum übertragen: Alle Punkte, die zu einer der Geraden n_i gehören, werden im Akkumulator gewichtet, indem ein Zähler erhöht wird. Jene Punkte, die zu mehreren Geraden n_i gehören (die Punkte der Rotationsachse) haben dadurch ein höheres Gewicht und werden als Maximum bezeichnet. Diese Maxima bilden die Rotationsachse a .

Diese Methode gilt als robust gegen Ausreißer (z.B. ungenau berechnete Oberflächennormalen), der Nachteil ist der durch die Hough-Transformation verursachte Speicherbedarf und die lange Rechenzeit [Hal97].

In [Hal97] wird die Achse direkt nach der Annahme berechnet, daß die Oberflächennormalen die Rotationsachse schneiden. In der Realität trifft diese Annahme jedoch nur bedingt zu, da die Objekte entweder nicht genau rotationssymmetrisch sind oder die Oberflächennormalen ungenau berechnet wurden. Daraus folgt, daß die Oberflächennormalen n_i den Abstand d_i zur Rotationsachse a haben. Die Position von a wird mittels des kleinsten Quadratabstands so berechnet, daß die Summe der Abstände d_i minimal ist. Der Vorteil dieses Optimierungsverfahrens ist die verkürzte Rechenzeit, jedoch wirken sich Ausreißer bei den Oberflächennormalen stark auf das Ergebnis aus [Hal97].

In meiner Diplomarbeit wird die auf die Hough-Transformation basierende Methode verwendet werden, da für die Registrierung verschiedener Ansichten archäologischer Gefäße die Robustheit des Verfahrens wichtiger ist als die Geschwindigkeit der Berechnung.

Evaluierung der Lage der Rotationsachse

Fehler bei der Berechnung der Rotationsachse führen zur falschen oder ungenauen Lage der Rotationsachse. Die Genauigkeit der Achsenbestimmung kann mit Hilfe von synthetischen Tiefendaten überprüft werden. Es wird die Achse von einem Objekt mit bekannter Rotationsachse berechnet und dann werden "Ist-" und "Sollwerte" verglichen.

5. Registrierung

Das Ziel einer Registrierung ist es, zwei oder mehrere Ansichten eines Objektes in Übereinstimmung zu bringen. Dabei werden die aufgenommenen Objektpunkte mittels Translation und Rotation in ein einheitliches Koordinatensystem übertragen. In einem registrierten Bild befinden sich die korrespondierenden Punkte einer aufgenommenen Szene an der selben Position.

Um zwei Ansichten P und Q in Übereinstimmung zu bringen, müssen die Transformationsparameter T so berechnet werden, daß folgende Gleichung erfüllt ist.

$$Tp = q \quad (4)$$

mit (p, q) , $p \in P, q \in Q$, $T = (\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$

Es wird zwischen Bildregistrierung und Tiefendatenregistrierung unterschieden. Diese beiden Ansätze werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

5.1. Bildregistrierung

Bei der Bildregistrierung werden im Gegensatz zur Tiefendatenregistrierung nur zweidimensionale Daten erfaßt. Mehrere Teilansichten einer Szene werden zu einer Gesamtansicht zusammengefaßt. Dies ist von besonderer Bedeutung bei Analysen von Luftaufnahmen und in den Bereichen der automatisierten Kartographie.

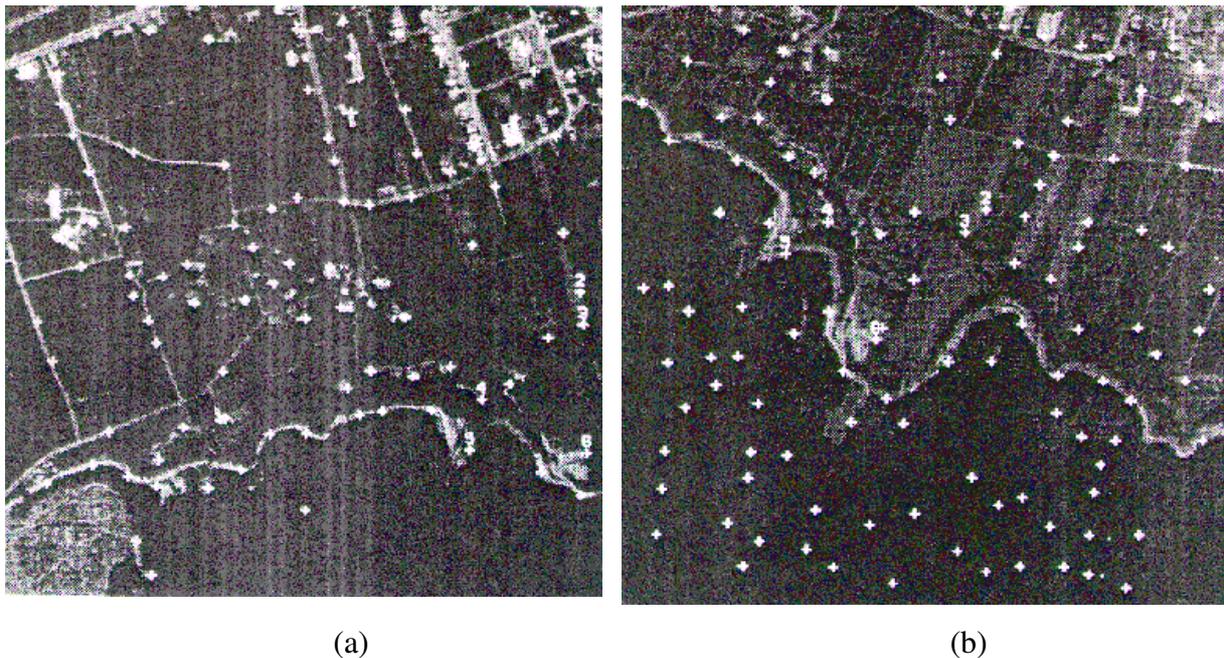


Abb. 13: Luftaufnahme eines Küstengebietes

Abb. 13 (a) und (b) stellen zwei verschiedene Ansichten eines Küstengebietes dar. Die weißen Punkte sind Paßpunkte, die zur Ermittlung der Registrierungsparameter verwendet werden. Die beiden Bilder weisen Unterschiede in der Skalierung, Lage und Intensität auf.

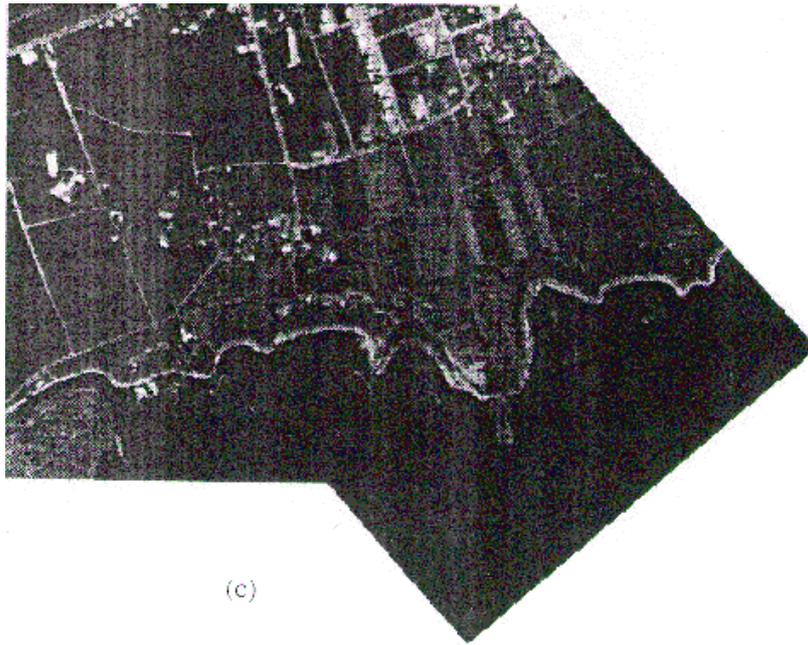


Abb. 14: Ergebnis einer Bildregistrierung (aus [HLFK96])

Abb. 14 zeigt das registrierte Bild. Die Exaktheit der Registrierung kann man an dem fortgesetzten Küstenstreifen beobachten. Eine detaillierte Beschreibung dieses Algorithmus` ist in [HLFK96] nachzulesen

5.2. Tiefendatenregistrierung

Ein Hauptmerkmal der zahlreichen publizierten Arbeiten über die Registrierung ist die Annahme, daß die verschiedenen Ansichten eines Objektes korrespondierende Punkte aufweisen müssen. Bei der Tiefendatenregistrierung kann zwischen Verfahren, die iterativ nach korrespondierenden Punkten suchen [SL92], [DWJM98], [DWJM96], [CM92] und modellbasierenden Verfahren [VA86], welche die Translationsparameter direkt aus Tiefenbildern berechnen, unterschieden werden.

5.2.1. Iterative Verfahren

Das Ziel iterativer Methoden ist es mittels korrespondierender Punkte in den überlappenden Bereichen der Tiefenbilder die Transformationsparameter zu berechnen. Somit sind überlappende Objektregionen in den verschiedenen Ansichten Voraussetzung für diese Verfahren. Der von Besl & McKay [BM92] entwickelte *Iterative Closest Point (ICP)*

Algorithmus dient als Grundlage vieler iterativer Methoden. Mit N Paaren korrespondierender Punkte $p_i \in P$ und $q_i \in Q, i = 1 \dots N, N \geq 3$ in zwei Ansichten P und Q können die Transformationsparameter berechnet werden, indem die folgende Gleichung minimiert wird.

$$e = \sum_{i=1}^N \|T p_i - q_i\|^2 \quad (5)$$

Da die korrespondierenden Punkte $q_i \in Q$ nicht bekannt sind, wird in [CM92] der Abstand zwischen den Objektpunkten iterativ minimiert (Abb. 15). Die Iteration ist in Gleichung (6) angegeben.

$$e^k = \sum_{i=1}^N d_s^2(T^k p_i S_i^k) \quad N \geq 3 \quad (6)$$

- T^k Transformationsparameter
- d_s Abstand q_x zu q_1
- S_i^k Tangentialebene von Q in q_i^k

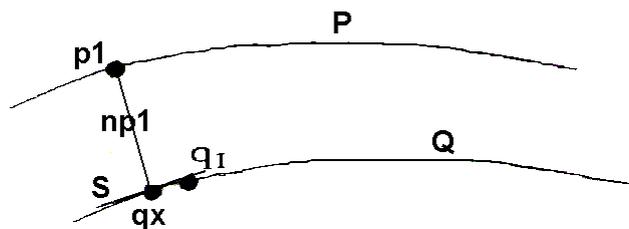


Abb. 15: Korrespondierende Punkte p_1 und q_1 zweier Ansichten P und Q

Die Tangentialebene S dient als lokale, lineare Approximation von Q im Punkt q_x . Der Schnittpunkt q_i^k ist eine Approximation des korrespondierenden Punktes q_i .

Der Vorteil der iterativen Verfahren ist, daß damit beliebige Objekte registriert werden können. Es gibt keine Einschränkungen seitens der Aufnahmeanordnung. Nachteilig sind der

hohe Rechenaufwand, der durch die Iteration verursacht werden kann, und die Abhängigkeit von der Wahl eines guten Startwertes für die Iteration.

5.2.2. Direkte Parameterberechnung

Bei der direkten Parameterberechnung ist es nicht notwendig, korrespondierende Punkte in den verschiedenen Ansichten zu suchen, da die Transformationsparameter mit Hilfe von a priori Wissen direkt aus dem Objekt berechnet werden. Bei der Ermittlung der Parameter wird Information, wie z.B. eine charakteristische Form oder die Lage des Objektes in die Berechnung eingebunden: In [VA86] werden die verschiedenen Ansichten des Objektes mit Hilfe eines Intensitätsbildes identifiziert und die Parameter mittels einer Kombination der Informationen aus Tiefenbildern und Intensitätsbildern berechnet.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, daß keine aufwendige Suche im Parameterraum notwendig ist. Nachteilig wirken sich Einschränkungen der Aufnahmeanordnung aus. Dadurch ist eine Anwendung für komplexe Objekte nur bedingt möglich.

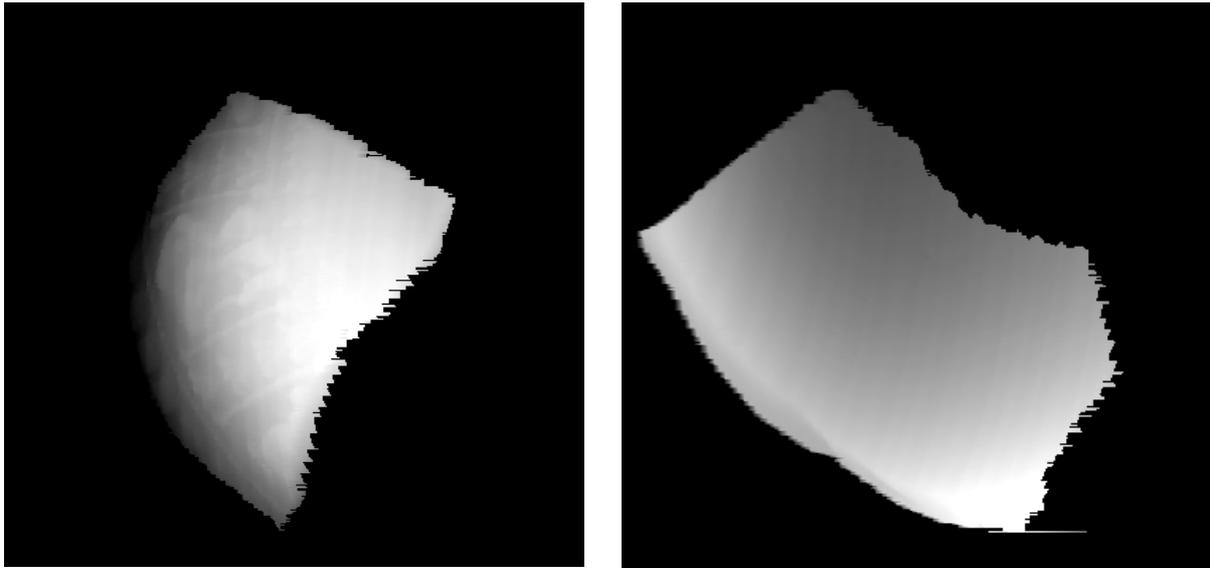
Registrierung mittels Bestimmung der Rotationsachse

Bei der Registrierung von archäologischen Fundstücken wie Vasen und Scherben kann nicht angenommen werden, daß in den Tiefenbildern verschiedener Ansichten immer korrespondierende Punkte zu finden sind, wie es zum Beispiel bei der Vorderansicht und der Hinteransicht eines Scherbens der Fall ist. Deshalb wird ein modellbasierter Ansatz gewählt, der mit Hilfe der Rotationssymmetrie von archäologischen Fundstücken mehrere Ansichten registriert.

Abb. 16 zeigt zwei Tiefenbilder P und Q eines Scherbens. Um die beiden Ansichten in Übereinstimmung zu bringen, müssen die Transformationsparameter T so berechnet werden, daß Formel (7) gilt.

$$Tp = q(p, q), \quad p \in P, q \in Q, \quad (7)$$

$$T = (\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$$



(a)

(b)

Abb. 16: Vorderansicht (a) und Hinteransicht (b) eines Scherbens

Die Bestimmung von T wird mit Hilfe der Rotationsachse durchgeführt, da keine korrespondierenden Punkte vorhanden sind. Nachdem für jede Ansicht die Rotationsachsen berechnet wurden (siehe Abschnitt 4), müssen die Achsen aneinander ausgerichtet werden. Es wird die Ansicht Q als Zielansicht definiert und die zweite Ansicht P mittels Translation und Rotation ins Zielkoordinatensystem transformiert. Danach müssen die Oberflächen ausgerichtet werden, um Überschneidungen von der Vorderansicht mit der Hinteransicht zu vermeiden.

Die Berechnung der Parameter zur Transformation in ein gemeinsames Referenzkoordinatensystem besteht aus den folgenden drei Hauptschritten:

- Bestimmung der Rotationsachsen
- Ausrichten der Achsen
- Ausrichten der Oberflächen

5.3. Fehler und Ungenauigkeiten

Die Genauigkeit des Ergebnisses hängt im besonderen von der korrekten Bestimmung der Rotationsachse ab. Rotationssymmetrische Objekte, wie z.B. Kugeln, deren Rotationsachse nicht eindeutig bestimmbar ist, sollen bereits bei der Bestimmung der

Rotationsachse als „Sonderform“ erkannt und von einer Weiterverarbeitung ausgeschlossen werden.

Ein Registrierungsfehler δ_T kann wie folgt quantifiziert werden kann:

(1) δ_T ... z - Abstand der Oberflächenpunkte von Bild A zu Bild B in überlappenden Bereichen

In registrierten Tiefenbildern mit korrespondierenden Punkten haben die Oberflächenpunkte in überlappenden Bereichen im optimalen Fall (d.h. ohne Registrierungsfehler) den gleichen z - Abstand. Die Abweichung davon wird mit δ_T ausgedrückt.

(2) δ_T ... durchschnittlicher Abstand zwischen Außenfläche und Innenfläche

In registrierten Tiefenbildern ohne korrespondierende Punkte haben Objektoberflächen im optimalen Fall (d.h. ohne Registrierungsfehler) den gleichen Abstand. Die Abweichung davon wird wie im obigen Fall mit δ_T ausgedrückt.

6. Ziele der Diplomarbeit

Das Hauptziel der Diplomarbeit ist ein registriertes Tiefenbild von zwei verschiedenen Ansichten eines rotationssymmetrischen Objektes. Es soll ein modellbasierender Algorithmus zur Registrierung verwendet werden, da die verschiedenen Ansichten der Objekte wenige korrespondierende Punkte aufweisen. In einer ersten Arbeitsphase werden synthetisch erzeugte Tiefendaten verwendet, da diese keine durch die Aufnahme verursachten Störungen (siehe Abschnitt 2, 3) aufweisen und sich dadurch die Problemstellung vorerst auf das Gebiet der Registrierung beschränken läßt. Neben Scherben und Gefäßen werden einfache rotationssymmetrische Objekte, wie z.B. Zylinder verwendet. Es sind folgende Aufgaben geplant:

1. Phase mit synthetisch erzeugten Daten

- Bestimmung der Rotationsachse
- Registrierung

- 3D-Rekonstruktion

In der zweiten Arbeitsphase werden mit Hilfe eines 3D Sensors erzeugte Tiefendaten verwendet. Dadurch werden die zusätzlichen Arbeitsschritte Kalibrierung und 3D-Aufnahme notwendig:

2. Phase, Daten vom 3D-Sensor

- Kalibrierung
- 3D-Aufnahme
- Bestimmung der Rotationsachse
- Registrierung
- 3D Rekonstruktion

| <i>Phase</i> | <i>Aufgabe</i> | <i>Geplantes Ende</i> |
|--------------|--|-----------------------|
| 1 | Präsentation der Problemstellung | 24. März 1998 |
| | Rotationsachsenbestimmung Registrierung | 30. Mai 97 |
| 2 | Kalibrierung Aufnahme Rotationsachsenbestimmung Registrierung | 30. Juli 1998 |
| - | Abschlußpräsentation | Oktober 1998 |
| - | 2. Diplomprüfung | November 1998 |

Tabelle 1: Zeitplan

7. Zusammenfassung

Es wurden die einzelnen Arbeitsschritte zur Konstruktion eines 3D-Oberflächenmodells beschrieben. Dabei wurde zwischen iterativen und modellbasierten Registrierungsverfahren unterschieden. Die Aufgabe der Diplomarbeit besteht einerseits darin zwei Objektansichten von rotationssymmetrischen Objekten zu registrieren, andererseits

darin, die Fehler und Ungenauigkeiten der dafür notwendigen Arbeitsschritte zu quantifizieren.

8. Literatur

- [AAK71] Y.I. Abdel-Aziz, H.M. Karara. Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates in Close-Range Photogrammetry, In *Symposium On Close-Range Photogrammetry*, Univ. Illinois at Urbana Champaign, USA, pp.1-18, Jan 1971.
- [BM92] P.J. Besl and N.D. McKay. A Method for Registration of 3d Shapes. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 14, No. 2, pp.239-256, February 1992.
- [CM92] Y. Chen, G. Medioni. Object Modelling by Registration of Multiple Range Images. In *Image and Vision Computing*, Volume 10, No.3, pp. 145-155, April 1992.
- [DWJM96] C. Dorai, G. Wang, A.K. Jain und C. Mercer. From Images to Models: automatic 3d Object Model Construction from Multiple Views, In *Proc. of the 13th ICPR*, Volume 1, Track A, pp. 770-774, 1996.
- [DWJM98] C. Dorai, G. Wang, A.K. Jain und C. Mercer. Registration and Integration of Multiple Object Views for 3d Model Construction, In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 20, No. 1. pp. 83-89, January 1998.
- [Hal97] R. Halír. Estimation of Rotation of Fragments of Archaeological Pottery. In Burger. W, Burge M., editors, *Proc. of the 21st Workshop of the ÖAGM*, pp. 175-184, Hallstatt, Austria, May 1997.

- [HLFK96] J.W Hsieh, H.M Liao, K. Fan und M. Ko. A fast Algorithm for Image Registration without predetermining Correspondences. In *Proc. of the 13th ICPR*, Volume I, Track A, pp. 765-769, Wien, 1996.
- [KKS96] R. Klette, A. Koschan, K. Schluens. Computer Vision. Räumliche Information aus digitalen Bildern. *Vieweg Verlag*, Braunschweig/Wiesbaden, 1996.
- [LCC89] W.C. Lin, S.Y. Chen, C.T. Chen. A new Surface Interpolation Technique for Reconstructing 3d Objects from Serial Cross Sections, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Volume 48, pp.124-143, 1989.
- [LT87] R.K. Lenz und R.Y.Tsai. Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 1, No. 5, pp.713-720, 1987.
- [Shi87] Yoshiaki Shirai. *Three Dimensional Computer Vision*. Springer-Verlag, 1987.
- [SL92] M. Soucy, D. Laurendeau. Multi-Resolution Surface Modelling from Multiple Range Views", In *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 384-353, 1992.
- [SMD94] R. Sablatnig, C. Menard, P. Dintsis. Projektantrag: Bildhafte Erfassung von archäologischen Fundgegenständen, Projektantrag P09954-SPR, Institut für Automation, Abt. f. Mustererkennung und Bildverarbeitung und Institut für klassische Archäologie, Vienna University of Technology and Vienna University, Austria, 1994.
- [Tro95] M. Trobina. Error Model of a Coded-Light Range Sensor, Technical Report BIWI-TR-164, Communication Technology Laboratory, Image Science Group, ETH-Zürich, September 1995.

- [Tsa86] R.Y. Tsai. An Efficient and Accurate Camera Calibration Techniques for 3D Machine Vision. In *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami Beach, Florida, pp.364-374, 1986.
- [VA86] B.C. Vemuri and J.K. Aggarwal. 3d Model Construction from Multiple Views using Range and Intensity Data. In *Proc. IEEE Conference Vision and Pattern Recognition*, Miami Beach, Florida, pp. 435-437, 1986.
- [Wen92] J. Weng. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 14, No. 10, pp. 965-980, October 1992.
- [Wol95] H. Wolf. Linienprojektor LCD 640: Bedienungsanleitung. ABW Automatisierung Bildverarbeitung Dr. Wolf, Germany, 1995.
- [YM97] S. Ben-Yacoub, C. Menard. Robust Axis Determination for Rotational Symmetric Objects out of Range Data In Burger. W, Burge M., editors, *21st Workshop of the OEAGM*, pp. 197-202, Hallstatt, Austria, May 1997.