

Exemplarische Implementierung des Lichtschnittverfahrens mittels einer selbstgebauten Scan-Vorrichtung

David Wichter

Master-Projektstudium

Betreuer: Professor Dr. Jürgen Lohscheller

Trier, Abgabedatum

Kurzfassung

In der Kurzfassung soll in kurzer und prägnanter Weise der wesentliche Inhalt der Arbeit beschrieben werden. Dazu zählen vor allem eine kurze Aufgabenbeschreibung, der Lösungsansatz sowie die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit. Ein häufiger Fehler für die Kurzfassung ist, dass lediglich die Aufgabenbeschreibung (d.h. das Problem) in Kurzform vorgelegt wird. Die Kurzfassung soll aber die gesamte Arbeit widerspiegeln. Deshalb sind vor allem die erzielten Ergebnisse darzustellen. Die Kurzfassung soll etwa eine halbe bis ganze DIN-A4-Seite umfassen.

Hinweis: Schreiben Sie die Kurzfassung am Ende der Arbeit, denn eventuell ist Ihnen beim Schreiben erst vollends klar geworden, was das Wesentliche der Arbeit ist bzw. welche Schwerpunkte Sie bei der Arbeit gesetzt haben. Andernfalls laufen Sie Gefahr, dass die Kurzfassung nicht zum Rest der Arbeit passt.

The same in english.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Das Verfahren in der Theorie | 2 |
| 2.1 Das mathematische Modell einer Kamera..... | 2 |
| 2.1.1 Die Kamera Kalibrierung | 2 |
| 2.2 Der Lichschnitt | 2 |
| 3 Implementierung | 3 |
| 3.1 Scanner Konstruktion | 3 |
| 3.2 Der Scavorgang | 5 |
| 3.2.1 Kalibrierung der internen Kameraparameter | 6 |
| 3.2.2 Datenerhebung | 6 |
| 3.2.3 Farbkalibrierung | 7 |
| 3.2.4 Kalibrierung der externen Kameraparameter..... | 9 |
| 3.2.5 Bestimmung der Laserlinie | 9 |
| 4 Ergebnisse..... | 10 |
| 4.1 Laserlinienbestimmung | 10 |
| 4.2 Messgenauigkeit | 10 |
| 5 Fazit | 11 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|---|
| 3.1 | Frontal Ansicht | 4 |
| 3.2 | Seitliche Ansicht | 4 |
| 3.3 | Nahaufnahme der Millimeter-Anzeige | 4 |
| 3.4 | Der schematische Ablauf des Scavorgangs | 6 |

1

Einleitung

TODO

2

Das Verfahren in der Theorie

2.1 Das mathematische Modell einer Kamera

TODO

2.1.1 Die Kamera Kalibrierung

TODO

2.2 Der Lichschnitt

TODO

3

Implementierung

3.1 Scanner Konstruktion

Um das Lichtschnittverfahren angemessen umsetzen zu können, müssen zuerst brauchbare Daten erhoben werden. Mit Daten sind in diesem Kontext die Fotografien gemeint, auf denen das zu vermessende Objekt inklusive der projizierten Laserlinie zu sehen ist. Um diese Reihe von Bildern zu erstellen, ist eine Vorrichtung von Nöten, die es ermöglicht, die Webcam und den Laser so zu fixieren, dass das zu vermessene Objekt mit Leichtigkeit fotografierbar ist. Zusätzlich müssen sowohl der Laser als auch die Kamera so beweglich sein, dass das zu vermessene Objekt in kontrollierten Abständen mit dem Laser abgetastet werden kann, sich das räumliche Verhältnis zwischen Webcam und Laser jedoch nicht verändert.

Für das vorliegende Projekt wurde versucht, dies unter Berücksichtigung einer einfachen und günstigen Konstruktion zu realisieren. Die in dieser Ausarbeitung vorgeschlagene Lösung setzt darauf, Kamera und Laser übereinander auf einer Pappelholzplatte zu fixieren. Diese Holzplatte befindet sich auf zum Boden senkrecht befindlichen Schlaufen aus stabilem Gurt, welche um zwei PVC-Röhren gespannt sind. Besagte PVC-Röhren ruhen in horizontaler Lage parallel zum Boden in zwei Holzstreben, welche wiederrum senkrecht auf einer Basis aus dünnem Pappelholz geklebt sind. Die Gesamtkonstruktion kann in Abb. 3.1 und 3.1 und betrachtet werden.

Die vom Laser aufgespannte Ebene befindet sich somit parallel zum Grund, während die Kamera schräg von oben auf das zu vermessene Objekt schaut. Mittels des Gurts kann die Holzplatte, auf der Kamera und Laser montiert sind, von unten nach oben bewegt werden, um das Objekt so abzutasten. Um zu kontrollieren, wie weit der Laser über das Objekt bewegt wurde, ist auf der Rückseite des Gurts eine Anzeige installiert, welche sich gen Boden bewegt sobald Laser und Kamera nach oben steigen. Die Anzeige zeigt an den Seiten der Holzstreben, an denen eine Skala in Millimeter-Papier angebracht ist, wie weit sich die Holzplatte von der Startposition aus nach oben bewegt hat. In Abb. 3.1 ist eine Nahaufnahme dieser Anzeige zu sehen.

Ein wesentlicher Vorteil der vorgenommenen Konstruktion liegt in der Parallelität der Laser-Ebene zum Boden. Auf diese Weise muss man sich bei der späteren Bildverarbeitung keine Sorgen machen, dass die Laser-Linie auf den Untergrund

**Abb. 3.1.** Frontal Ansicht**Abb. 3.2.** Seitliche Ansicht**Abb. 3.3.** Nahaufnahme der Millimeter-Anzeige

fällt, auf dem das zu vermessene Objekt ruht. Wäre dies der Fall, müssten bei der späteren Auslesung die Teile der Laser-Linie, die auf das Objekt fallen, von denen, die auf den Untergrund fallen, aufwendig getrennt werden. Ebenfalls macht der Aufbau die Nachbearbeitung der gemessenen Weltkoordinaten im Gegensatz zu vergleichbaren Konstruktionen (z.B. bei schwenkbaren Scannern) besonders simpel: Da sich die Apparatur zwischen Aufnahmen lediglich entlang der Z-Achse bewegt und dieser Abstand bekannt ist, kann auf den Z-Achsen-Anteil des Messungsergebnis der besagte Abstand einfach addiert werden.

Der Gesamtaufbau setzt vor allem auf eine praktikable Lösung, die problemlos nachgebaut werden kann und sich dem zu Grunde liegenden Problem so nähert, dass anschließende Verarbeitungen und Berechnungen erleichtert werden. Zudem ist die Konstruktion kostengünstig. In Tabelle 3.1 können die Preise in Euro ein-

gesehen werden, die alle Komponenten (außer Kleinteile wie einzelne Schrauben, Holzleim etc.) gekostet haben. Zusammen kommt der Scanner auf einen Preis von ca. 45,14€

| Komponente | Preis in Euro |
|-------------------------------------|---------------|
| Kamera „TeckNet C016 USB HD Webcam“ | 13,99 € |
| Linienlaser | ca. 20 € |
| PVC-Röhre | 1,69 € |
| Holzleiste Buche (Seitenstreben) | 3,79 € |
| Pappel-Sperrholz | 2,29 € |
| Gurtband | 3,38 € |

Tabelle 3.1. Bezeichnung der Tabelle

3.2 Der Scavorgang

Um ein zu vermessendes Objekt in eine Reihe von abgetasteten Weltkoordinaten umzuwandeln wird in der vorliegenden Implementierung ein Prozess von verschiedenen Stufen vorgeschlagen. Der Gesamtprozess ist schematisch in Abb. 3.2 dargestellt. Die einzelnen Stufen des Prozesses sind dabei nach der Abhängigkeit ihrer Ergebnisse und daraus folgen der Anzahl an nötigen Wiederholungen sortiert. Mit anderen Worten: Die Aktionen, die nur einmal ausgeführt werden müssen um mehrere Scavorgänge zu ausführen zu können werden zuerst vorgenommen, während Aktionen die beispielsweise pro aufgenommenen Bild ausgeführt werden müssen, am Schluss folgen. Dies ist für denjenigen, der den Scavorgang durchführt, eine geeignete Reihenfolge, da so Teilergebnisse für mehrere Scanprozesse wiederverwendet werden können und bei erfolglosen Stufen der Gesamtprozess nicht von neu angestoßen werden muss.

Die Kalibrierung der internen Kameraparameter beispielsweise ist unabhängig von den anderen Umständen des eigentlichen Scavorgangs und muss nicht für jede Messreihe erneut stattfinden, sondern lediglich wenn sich die Fokus-Einstellung der Kamera ändert. In der darauf folgenden Stufe des Scannens werden die nötigen Fotografien aufgenommen, was im Folgenden als Datenerhebung bezeichnet wird. Anschließend werden anhand einiger weniger dieser Bilder weitere Kalibrierungen vorgenommen, welche allerdings für den Rest des Datensatzes persistent sind und nur von Scandurchlauf zu Scandurchlauf wiederholt werden müssen. Zuletzt werden auf allen Bildern des Datensatzes die beiden Schritte der Laserlinienerkennung und Weltkoordinatenberechnung ausgeführt, welche für jedes Bild des Datensatzes andere Ergebnisse liefern und damit am Ende der Pipeline stehen. Die Weltkoordinaten, die als Resultat eines jeden Bildes berechnet werden, werden gesammelt und stehen als Punkte-Wolke zu weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Im Folgenden werden nun die einzelnen Stufen des Scavorgangs einzeln näher erläutert.

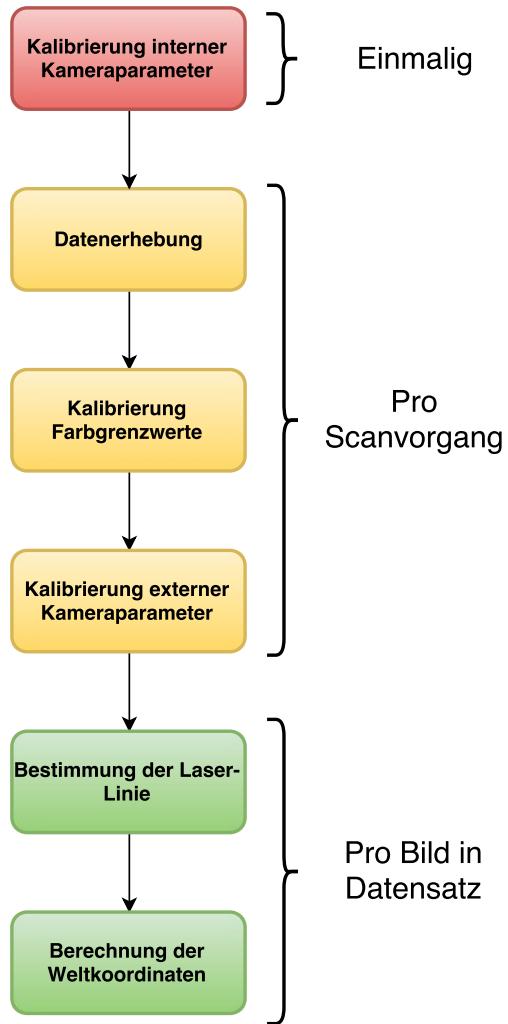


Abb. 3.4. Der schematische Ablauf des Scavorgangs

ten (mehr dazu auch bei !QUELLE! und !QUELLE!). Bei den dieser Ausarbeitung mitgelieferten Kalibrierungsbildern wurde ein durchschnittlicher Reprojection Error von !WERT! erreicht, jedoch gilt laut einer Faustregel aus !QUELLE! jeder durchschnittliche Fehler von unter einem Pixel als akzeptabel. Am Ende der Kalibrierung muss die interne Kameramatrix gespeichert und für die weiteren Schritte hinterlegt werden.

3.2.2 Datenerhebung

In der Phase der Datenerhebung werden die Fotografien des zu vermessenen Objektes aufgenommen. Dabei kommt die Konstruktion zum Tragen die in Kapitel

3.2.1 Kalibrierung der internen Kameraparameter

In Abschnitt 2.1.1 wurde die Theorie hinter der Kamerakalibrierung bereits erläutert, daher soll das Verfahren an dieser Stelle lediglich aus praktischer Sicht betrachtet werden. Aus Gründen, welche in 3.2 dargelegt wurden, ist der Kamerakalibrierungsprozess in zwei zeitlich voneinander getrennte Teile gespalten. Am Anfang steht hierbei die Bestimmung der internen Kameraparameter, insbesondere der internen Kameramatrix. Um diese abzuschätzen wurde auf die in Matlab integrierte Kamerakalibrierungsapp zurückgegriffen, welche aus einem Set von vorher aufgenommenen Bildern die Kameraparameter (wie in 2.1.1 beschrieben) schätzt. Dabei werden eine Reihe von Kalibrierungsbildern, welche vorher aufgenommen wurden, in die App importiert und anschließend von jener verarbeitet. Bevor die nun geschätzte interne Kameramatrix als eigenständige Datei exportiert werden kann, sollten die sogenannten Reprojection Errors begutachtet werden. Diese stellen eine Metrik dar, welche besagt wie erfolgreich die Kalibrierung verlaufen ist und ergibt sich aus dem Abstand zwischen den im Bild erkannten Schachbrett-Punkten und den auf das Bild zurück projizierten korrespondierenden Weltkoordinaten

3.1 erläutert wurde. Zuerst muss die Messplatte in ihre Startposition gebracht werden, das heißt die Millimeter-Anzeige muss einen Abstand von 0 Millimetern anzeigen (vgl. Abb. 3.1). Anschließend muss das Schachbrettmuster, das auch bei der Kalibrierung der internen Kameraparametern zum Einsatz kam, so platziert werden, dass zum einen die Kamera alle Quadrate des Musters erkennen kann und zum anderen das zu vermessene Objekt so aufgestellt werden kann, dass die Laserlinie auf die unterste Peripherie des Objektes projiziert werden kann, also da, wo die Messung beginnen soll. Aufgrund der Konstruktion des Scanners muss das Schachbrettmuster dafür auf einer Erhöhung von ca. 9 cm ruhen. Für das erste Bild ist es jedoch wichtig, eine Aufnahme des Musters zu machen, auf dem das zu vermessene Objekt nicht abgebildet ist. Dieses Bild wird für die Kalibrierung der externen Kameraparameter benötigt, welche im kommenden Abschnitt 3.2.4 beschrieben ist. Von nun an ist es für den Rest des Scavorgangs nicht mehr erlaubt, den Neigungswinkel der Kamera zu ändern. Anschließend wird das zu vermessene Objekt so auf dem Schachbrettmuster platziert, dass die auf das Objekt projizierte Laserlinie in ihrer ganzen Länge zu erkennen ist und es wird eine Aufnahme gemacht. Nun muss die Messplatte mithilfe der Millimeter-Anzeige um einen vorher festgelegten Millimeter-Betrag nach oben bewegt werden. Der festgelegte Betrag muss für die spätere Berechnung der Weltkoordinaten festgehalten werden. Anschließend wird die nächste Fotografie geschossen. Dabei ist zu beachten, dass sich zwischen den Bildern nichts anderes als die Messplatte bewegen sollte und der vorher festgelegte Abstand so genau wie möglich eingehalten werden sollte. In dieser Manier wird nun das gesamte Objekt mit dem Laser abgetastet und je nach dem gewählten Abstand ergeben sich so mehr oder weniger Bilder, die für die folgenden Phasen abgespeichert werden.

3.2.3 Farbkalibrierung

Die Laserlinie, welche auf das zu vermessene Objekt projiziert wird und die nötigen Informationen zur Bestimmung der Tiefeninformation der Weltkoordinaten liefert, muss in jedem aufgenommenen Bild neu lokalisiert werden (vgl. den kommenden Abschnitt 3.2.5). Der Ansatz, die Laserlinie im Bild zu bestimmen, basiert auf einem globalen Farbgrenzwert, mit dem die Laserlinie so gleichmäßig wie möglich segmentiert werden kann. Die Bestimmung und Speicherung dieses Grenzwertes geschieht in dem Schritt der Farbkalibrierung. Unter den Voraussetzungen dass

1. die projizierte Laserlinie den höchsten Rot-Anteil im Bild besitzt und
2. sich die Licht- und Farbumgebung des Datensatzes zwischen Bildern nicht signifikant ändert

kann der globale Grenzwert anhand eines einzelnen Bildes aus dem Datensatz ermittelt werden, welcher im Anschluss für die restlichen Bilder der Messreihe wiederverwendet werden kann.

Die Farbkalibrierung soll also den Grenzwert liefern, mit der die spätere Lokalisierung der Laserlinie in Pixelkoordinaten am besten funktioniert. Gearbeitet wird dabei in dem YCbCr-Farbraum, da dieser es auf eine einfache Weise erlaubt, Far-

binformationen von Helligkeitsinformationen zu trennen und den Rotanteil dennoch in einem einzelnen Kanal (dem Cr-Kanal) zu isolieren. Der Ansatz, den die vorliegende Implementierung verfolgt, ist, den Benutzer einmalig die Laserlinie mittels eines Splines nachzeichnen zu lassen, und diesen "Goldstandard" automatisch unter Anwendung des in 3.2.5 beschriebenen Verfahrens und steigender Cr-Grenzwerte mit vielen extrahierten Laserlinien zu vergleichen. Der Cr-Grenzwert, mit dem die Laserlinie extrahiert wurde, welche dem Goldstandard am nächsten kommt, ist der optimale Grenzwert und wird für die kommenden Laserlinienlokalisierungen abgespeichert.

Um zu bestimmen, wie nah eine Pixellinie dem vom Nutzer bestimmten Spline und damit der Laserlinie kommt, ist eine Metrik in Form einer Distanzfunktion von Nöten. Pixellinien, bei der diese Distanzfunktion geringe Ergebnisse liefert, sind sich also näher und somit ähnlicher als Linien, die große Werte liefern. Im Folgenden wird die verwendete Distanzfunktion definiert.

Sei die Breite des gegebenen Bildes in Pixeln definiert als w und die Höhe in Pixeln als h . Die Spalten des Bildes lassen sich also mit Elementen der Spaltenindex-Menge $C = \{1, 2, 3, \dots, w\}$ indizieren, während die Reihen sich analog mit Indizes der Reihenindex-Menge $R = \{1, 2, 3, \dots, h\}$ bestimmen lassen. Die Position eines Pixels im Bild kann also mittels eines Tupels $p = (c, r)$ mit $c \in C$ und $r \in R$ bestimmen. Eine Pixellinie sei nun definiert als eine rechtseindeutige Relation $L \in C \times R$, welche durch eine Menge von geordneten Tupeln gegeben ist (Beispiel: $L = \{(1, 500), (2, 501), (3, 500), (5, 499)\}$). Die Rechtseindeutigkeit ist hierbei essentiell: Keiner Spalte des Bildes darf mehr als eine Reihe zugewiesen werden. Sei weiterhin mit $\text{Dom}(L) = \{c \in C \mid \exists r \in R : (c, r) \in L\}$ die Definitionsmenge einer gegebenen Pixellinie L gemeint.

Seien nun zwei Pixellinien L_1 und L_2 gegeben. Die Menge

$$S_{1,2} = \{\text{abs}(r_1 - r_2) \mid \exists c \in C : (c, r_1) \in L_1 \wedge (c, r_2) \in L_2\} \quad (3.1)$$

ist dann die Menge aller vertikalen Pixel-Abstände in Pixelspalten, in denen beide Pixellinien eine Pixelkoordinate besitzen.

$$T_{1,2} = (\text{Dom}(L_1) \cup \text{Dom}(L_2)) \setminus (\text{Dom}(L_1) \cap \text{Dom}(L_2)) \quad (3.2)$$

ist die Menge aller Spaltenindizes beider Linien, die in der jeweils anderen Pixellinie auf keine Reihe abbilden. Mittels dieser beiden Mengendefinitionen kann nun die Distanzfunktion $D : (C \times R) \times (C \times R) \rightarrow \mathbb{R}$ definiert werden als:

$$D(L_1, L_2) = \frac{1}{|S_{1,2}| + |T_{1,2}|} \sum_{x \in S_{1,2}} x + (|T_{1,2}| * h) \quad (3.3)$$

D berechnet also das arithmetische Mittel aller vertikalen Pixelabstände der beiden Pixellinien. Dort wo die beiden Pixellinien sich horizontal überlappen, kann dafür der Pixelabstand genommen werden. In den Spalten, wo jedoch nur eine Linie definiert ist, kann kein direkter Abstand berechnet werden, daher wird ein

”penalty”-Term in Form der Höhe des Bildes auf die Summe gerechnet. Diese ermöglicht, dass Pixellinien mit viel horizontaler Überschneidung näher bzw. in diesem Kontext ähnlicher zueinander eingestuft werden, als Linien, die horizontale Lücken aufweisen. Abb. !BILD! veranschaulicht die Metrik noch etwas deutlicher.

Zusammengefasst läuft die Farbkalibrierung folgender Maßen ab: Zuerst wird der Benutzer dazu aufgefordert mittels einiger Punkte die horizontal verlaufende projizierte Laserlinie mittels eines Splines nachzuzeichnen. Anschließend wird der globale Cr-Grenzwert mit null initialisiert und die erste Laserlinie, die automatisch mit diesem Grenzwert lokalisiert wird (siehe dazu 3.2.5), wird mit der oben beschriebenen Metrik D die Ähnlichkeit der gefundenen Linie zum ”Goldstandard” bestimmt und der aktuelle Cr-Grenzwert als am besten passender Grenzwert vermerkt. Als nächstes wird der Grenzwert um einen bestimmten Wert erhöht und die Laserlinie wird wieder lokalisiert. Wenn diese Linie näher an der vom Benutzer festgelegten Pixellinie liegt, wird der neue, erhöhte Cr-Grenzwert als optimal vermerkt. Dieses Verfahren geht so lange weiter, bis für einen neuen Grenzwert keine Linie gefunden werden kann, die näher am Goldstandard liegt. Der gefundene Grenzwert wird nun für die folgenden Schritte des Scavorgangs gespeichert.

3.2.4 Kalibrierung der externen Kameraparameter

TODO

3.2.5 Bestimmung der Laserlinie

TODO

Berechnung der Weltkoordinaten

4

Ergebnisse

TODO

4.1 Laserlinienbestimmung

TODO

4.2 Messgenauigkeit

TODO

5

Fazit

TODO