

Bachelorarbeit

*Entwicklung eines
Lasertriangulationssensors zur
Oberflächen-Rekonstruktion mit ROS2*

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

vorgelegt dem

Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik
der Technischen Hochschule Mittelhessen.

Tristan Elias Wolfram

25.05.2022, Gießen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Seyed Eghbal Ghobadi
Korreferent: Moritz Schauer, M.Sc.

Titel

Entwicklung eines Lasertriangulationssensors zur Oberflächen-Rekonstruktion mit ROS2

Kurzfassung

Oberflächenrekonstruktion findet in der Industrie weitreichend ihre Anwendung. Sei es um kleine Bauteile zu untersuchen, größere Objekte auf Schäden zu prüfen oder auch ganze Landstriche zu vermessen. Dabei ist die Lasertriangulation eine gängige Methode, um 3D-Informationen zu erhalten. Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem Open-Source entwickelten Lasertriangulationssensor. Dieser Sensor soll in einem an dem Institut für Technik und Informatik (ITI) durchgeführten Forschungsprojekt eingesetzt werden. Die Aufgabe dabei ist, von Holzscheiben eine 3D-Aufnahme mit zusätzlichen Farbinformationen zu erzeugen. In dieser Arbeit werden die Entwicklung und Umsetzung selbst, aber auch die mathematischen Grundlagen erläutert. Die Ergebnisse werden evaluiert und mit dem aktuellen Standard verglichen.

Title

Development of a laser triangulation sensor for surface reconstruction with ROS2

Abstract

Surface reconstruction is widely used in industry. Be it for inspecting small components, checking larger objects for damage or even surveying entire areas. Laser triangulation is a common method for obtaining 3D information. This thesis deals with an open-source developed laser triangulation sensor. This sensor will be used in a research project at the Institut für Technik und Informatik (ITI). The task here is to generate a 3D image of wooden slices with additional color information. In this paper the development and implementation itself, but also the mathematical basics are explained. The results are evaluated and compared with the current standard.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Aufgabe - Motivation	1
1.2 Stand der Technik	2
1.2.1 Methodik	2
1.2.2 Geräte	3
1.3 Anforderungen	3
1.4 Lösungsansatz	4
2 Grundlagen	6
2.1 Bibliotheken	6
2.2 Der grundlegende Aufbau	6
2.3 Pinhole Camera Model	7
2.4 Mathematische Grundlage	9
2.4.1 Koordinaten-Transformationen	9
2.5 Bildverarbeitung	12
2.5.1 Das Erkennen der Laserlinie	12
2.5.2 Umwandlung zu einem Grauwert-Bild	14
2.5.3 Gauß-Filter	15
2.5.4 Das Erstellen von Subpixeln	16
3 Projektumsetzung	20
3.1 Kalibrierung	20
3.1.1 Intrinsische Kalibrierung	20
3.1.2 Extrinsische Kalibrierung	23
3.2 Das Erzeugen einer Punktewolke	30
3.2.1 Die 3D-Koordinaten	30
3.2.2 Das Finden der Farbinformationen	31
3.3 Aufbau - Hardware	33
3.3.1 Hardware-Aufbau des Lasertriangulationssensors	33
3.3.2 Der Versuchsaufbau	34
3.4 Aufbau - Software	36
3.4.1 Python (Bibliothek)	36
3.4.2 ROS2	39
3.5 Qualitative Ergebnisse	44
4 Evaluation	45

Inhaltsverzeichnis

4.1	Testen von Genauigkeit	45
4.2	Bewertung	46
4.3	Probleme und Schwierigkeiten	47
5	Zusammenfassung	50
6	Ausblick	52
A	Anhang	55
A.1	Anhang A	55
A.2	Anhang B	56
A.3	Anhang C	57
A.4	Anhang D	58
A.5	Anhang E	59
A.6	Anhang F	60
	Abbildungsverzeichnis	61
	Tabellenverzeichnis	62
	Literatur	63

Danksagung

An dieser Stelle kann man Danke sagen. :-)

DANKE

1. Einleitung

Die Möglichkeit eine Oberfläche in ihrer Beschaffenheit dreidimensional zu erfassen, birgt viele Anwendungsfälle. Sei es, um ein 3D-Abbild von einem Raum digital zu erhalten oder in der Industrie Bauteile zu vermessen und auf Fehler zu prüfen. Dabei sind viele verschiedene Verfahren über die Zeit entwickelt und optimiert wurden. 3D Kameras oder auch RGB-D Kameras finden heute vielfältig ihren Einsatz. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Dokumentation und Evaluation eines im Rahmen meiner Praktikumsphase an der Technischen Hochschule Mittelhessen entwickelten Lasertriangulationssensor. Ziel dieser Arbeit ist es, die Funktionalität und Architektur dieses Sensors zu erklären. Zusätzlich soll der Sensor evaluiert und auf bestimmte Aspekte mit dem aktuellen Stand der Technik im Bereich der 3D-Kameras bzw. RGB-D Kameras verglichen werden. Sinn und Zweck eines Lasertriangulationssensor ist es, eine Oberfläche zu rekonstruieren und dabei nicht nur die Tiefen-Informationen, sondern auch die Farbinformationen gemeinsam aufzunehmen. Als Verfahren wird, wie im Namen genannt, die Lasertriangulation verwendet.

1.1. Aufgabe - Motivation

Die grundsätzliche Aufgabe und Motivation entstand durch ein Projekt in Zusammenarbeit mit der Firma RINNTECH – „Technik zur Prüfung von Bäumen“. Die Firma bezeichnet sich selbst wie folgt: „Als Anwender und Entwickler verfügen wir über jahrelange Erfahrung und zahlreiche Patente auf dem Gebiet der Baum- und Holzanalyse. Für diese Anforderungen können wir Ihnen daher ausgereifte Technik und umfassenden Service anbieten“ [vgl. 19]. Beispielanwendungen, für die Geräte und Software bereitgestellt werden sind zum Beispiel Bäume kontrollieren, Jahrringe analysieren, Holzkonstruktionen kontrollieren und Holzqualität und Zuwachs im Wald kontrollieren [vgl. 19]. Das zugrundeliegende Projekt wurde als Forschungs- und Entwicklungsprojekt zusammen mit dem Institut für Technik und Informatik (ITI) an der THM gestartet. Es trägt den Titel

„Entwicklung einer Messmethodik zur Ermöglichung einer schnellen Bestimmung von Holzart und -herkunft anhand von Jahrring- und Farbanalyse. Entwicklung der Messwerterfassung und -auswertung der neuen Messmethodik“

und beschäftigt sich konkret mit der Jahrringanalyse. Durch diese soll Holzart und Herkunft bestimmt werden. RINNTECH verkauft das Produkt „LINTAP“ für diesen Zweck [vgl. 19, Produkte]. Das schon existierende Produkt soll in dem Projekt erweitert, optimiert und automatisiert werden. Die Grundidee besteht darin, dass sich ein Roboter-Arm mit einer hochauflösenden Kamera über das Objekt bewegt und entsprechende Bilder aufnimmt, die für die Jahrringanalyse erforderlich sind. Hier wird eine Kamera eingesetzt,

die von dem Roboterarm nah an das Holz herangeführt werden muss. Die Pfade, die der Roboter dementsprechend abfahren soll, müssen also mit hinreichender Genauigkeit errechnet werden. Dazu ist eine digitale Abbildung des Holzes unverzichtbar. Anhand einer rekonstruierten Oberfläche können die entsprechenden Pfade für den Roboter ohne Probleme bestimmt werden. Es muss also initial eine Oberflächen-Rekonstruktion des Objektes stattfinden. An diesem Punkt setzt diese Arbeit an. Es wurde eine Software entwickelt, die mithilfe einer Kamera und eines Linienlasers einen 3D-Scan durchführt. Dabei werden die Tiefeninformationen und auch die Farbinformationen aufgenommen und verarbeitet. Man erhält eine Punktwolke der gescannten Oberfläche, die entsprechend eingefärbt ist. Hierbei handelt es sich um einen typischen Output für eine 3D-Kamera in der Industrie. Die Aufgabenstellung wurde noch etwas konkretisiert. Als Methode soll die Lasertriangulation verwendet werden. Dazu wurde eine Kamera und ein Linienlaser bereitgestellt. Zusätzlich soll nur Open-Source-Software verwendet werden und die Anwendung muss über ROS2 (Robot Operating System) laufen.

1.2. Stand der Technik

1.2.1. Methodik

Lasertriangulation ist nicht die einzige Methode, eine Oberflächen-Rekonstruktion durchzuführen. Die zentralen Technologien zu diesem Zweck sind Triangulation oder Time-of-Flight [zollhofer state 2018]. Bei der Triangulation gibt es zwei Ansätze. Ein Ansatz ist der Direkte über Structured Light. Dabei wird ein bekanntes Muster mit einem Laser oder Ähnlichem auf die Oberfläche projiziert. Eine Kamera nimmt das Muster als Bild auf, welches sich durch die variierende Höhe und Form der Oberfläche verzerrt. Diese Verzerrung wird als Anhaltspunkt verwendet, um die Unterschiedlichkeiten in der Höhe zu ermitteln. Lasertriangulation, der hier verwendete Lösungsansatz, ist diesem Ansatz zuzuordnen.

Einen indirekten Ansatz der Triangulation bietet Stereo-Vision. Dabei werden zwei Kameras verwendet, die zwei aufgenommene Bilder aus unterschiedlichen Positionen liefern. Ebenfalls wird ein fester Punkt benötigt, der auch mit einem Laser oder Ähnlichem im Bild projiziert werden kann. Über die zwei unterschiedlichen Bilder kann die Position ermittelt werden.

Die Time-of-Flight-Technologie benutzt eine andere Lösungsmöglichkeit. Es wird Licht auf einen Punkt auf der Oberfläche gestrahlt. Dort wird es zurück reflektiert und von einem Sensor registriert. Dieser misst die verstrichene Zeit. Durch die bekannte Geschwindigkeit von Licht, kann über die gebrauchte Zeit der zurückgelegte Weg errechnet werden. Dieser

entspricht der Höhe.

1.2.2. Geräte

Diese Methoden finden ihre Anwendung auch in der Industrie. Diverse Geräte und Anwendungen zur Oberflächen-Rekonstruktion sind bereits auf dem Markt. Die Rede ist von sogenannten 3D-Kameras bzw. RGB-D Kameras. Dabei steht RGB (Red, Green, Blue) für die Farbinformationen und das D (Depth) für die Tiefeninformation. Angefangen mit der von Microsoft entwickelten „Kinect“ über die „Intel RealSense“ zur „Google Tango“ folgen viele weitere Geräte. Diese sind nicht nur meist für einen geringen Preis verfügbar, sie können auch die entsprechenden Pixelfarben in einer hohen Auflösung aufnehmen. Zusätzlich geschieht die Aufnahme in Echtzeit, was bedeutet, dass sich die herausgegebene Punktwolke ändert, sobald sich die aufgenommene Oberfläche ändert bzw. die Kamera bewegt wird [vgl. 22].

1.3. Anforderungen

Für das Projekt wurde zu Beginn eine „Intel RealSense d415“ verwendet. Die Industrie-3D-Kamera erfüllt die Anforderungen. Es kann eine 3D-Rekonstruktion des Objektes mit Farbinformationen durchgeführt werden. Die RealSense verwendet Stereo-Vision-Technologie. Sie verfügt über zwei Kameras und einen Projektor für ein vom Menschen nicht sichtbares Infrarot-Muster. Die Kamera berechnet so für jeden Pixel seine 3D-Position in Echtzeit. In dem Forschungsprojekt wurde jedoch auch überlegt, ob man die 3D-Rekonstruktion jenseits einer Industrie-Lösung erhalten kann. Grundsätzlich ist dafür eine einfache Webcam mit einem Linienlaser ausreichend. So kam die Idee, einen Open-Source Lasertriangulationssensor zu entwickeln. Dieser soll mit der Intel RealSense und dem generellen Industriestandard von RGB-D Kameras verglichen werden. Dabei ist die Genauigkeit (der Tiefeninformationen), Schnelligkeit des Scans und die Auflösung der Farbinformationen ausschlaggebend. Sowohl die Intel RealSense als auch die Open-Source-Variante sollen am Ende eine Punktwolke liefern. Diese kann im Vergleich analysiert werden. Genauso können die Position der Punkte auf eine Genauigkeit hin untersucht werden.

1.4. Lösungsansatz

Um den genaueren Erklärungen im Hauptteil folgen zu können, soll einmal oberflächlich der Lösungsansatz der entwickelten Anwendung erläutert werden. Die grundlegende Idee ist die Lasertriangulation. Dafür ist eine Kamera und ein Projektor für eine Laserlinie notwendig.

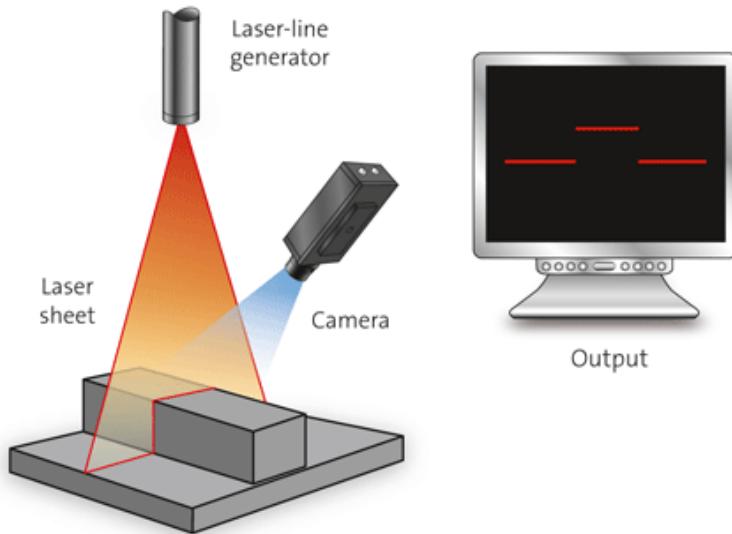


Abbildung 1: Lasertriangulation
(Abbildung entnommen aus [2])

Die resultierende Punktewolke der 3D-Rekonstruktion muss im Bezug zu einem Koordinatensystem stehen. Als Bezugspunkt wird die Kamera gewählt. Das bedeutet, dass sich die Koordinaten auf die Kamera beziehen und sich der Ursprung des Koordinatensystems an den optischen Sensor der Kamera befindet. Für die Berechnung von einem Pixel zu einem 3D-Punkt wird die Ebene bestimmt, die der Laser projiziert. Ausgehend von dem Startpunkt des Projektors und der projizierten Linie kann das Laserlicht als Ebene begriﬀen werden. In Abb. (1) ist diese rot ausgefüllt. Diese Ebene kann aus Kameraperspektive als Ebenengleichung dargestellt und errechnet werden. In der Theorie wird dann, sobald die Ebenengleichung bekannt ist, eine Laserlinie auf die zu scannende Oberfläche projiziert. Die Kamera nimmt ein Bild von dieser Oberfläche auf. Über diverse Bildverarbeitungs-Operationen wird aus dem aufgenommenen Bild die rote Laserlinie herausgearbeitet. In Abb. (1) wird unter *Output* beispielhaft das Ergebnis dieses Prozesses gezeigt. Die Pixel der Laserlinie werden im nächsten Schritt auf die Ebene gespannt, indem sie in die Ebenengleichung eingesetzt werden. Dadurch wird eine dritte Dimension für die Pixel errechnet. Die 3D-Punkte sind dann, wie gefordert, aus Sicht der Kamera. Diese Methodik liefert die 3D-Präsentation der Laserlinie, jedoch nicht von dem kompletten Objekt.

Der Sensor (bestehend aus der Kamera, dem Laser und der Software zusammen) muss zusätzlich über das Objekt bewegt werden. Die aufgenommenen Linien werden dann zu einer gesamten Punktewolke zusammengefügt. Dabei muss bekannt sein, welche Strecke an Bewegung von dem Sensor zurückgelegt wurde, um die neue Linie in der richtigen Position einzufügen.

2. Grundlagen

Um die Vorgänge und die Funktionsweise des Lasertriangulationssensors genau zu verstehen, sollen zuvor einige Grundlagen für den Lösungsansatz erläutert werden. Angefangen wird mit der mathematischen Grundlage, um die internen Berechnungen nachzuvollziehen. Danach wird der Algorithmus besprochen, der zum Finden der Laserlinien-Pixel benutzt wird. Da dabei gewisse Bibliotheken mit Python zum Einsatz gekommen sind, sollen diese im ersten Schritt kurz erwähnt werden.

2.1. Bibliotheken

Der Lasertriangulationssensor wurde vor Allem mit OpenCv und ROS2 entwickelt. OpenCv bietet die perfekte Unterstützung für die benötigte Bildverarbeitung. Diverse Funktionen, um Bilder zu bearbeiten, zur Kamerakalibrierung und zum Errechnen der Ebenengleichung sind in OpenCv implementiert.

ROS2 kümmert sich um die Automatisierung und den generellen Ablauf eines Scanvorgangs. In dem Forschung- und Entwicklungs-Projekt mit RINNTECH wird zusätzlich auch ROS2 als übergeordnetes System genutzt. Deshalb war ROS2 auch eine Anforderung an das Projekt. Die vorher benutzte RGB-D-Kamera Intel RealSense ist ebenfalls in der Lage über ROS2 angesprochen zu werden. Da der OpenSource-Lasertriangulationssensor diese ersetzen soll, ist die Verwendung von ROS2 ein logischer Schritt.

Erwähnenswert ist ebenfalls die junge Bilbiothek Open3D. Sie wird benötigt, um mit Punktwolken zu arbeiten.

2.2. Der grundlegende Aufbau

Der grundlegende Aufbau orientiert sich an dem Lösungsansatz. Notwendig sind dafür nur ein Linienlaser und eine Kamera. Zuerst wurde für einen Prototyp zum Testen eine Webcam verwendet, später eine Industriekamera. Ausschlaggebend zum Funktionieren des theoretischen Lösungsansatz ist, dass die Kamera einen Linienversatz aufnehmen kann. Um das zu erreichen, werden Kamera und Laser in einem gewissen Winkel zueinander gesetzt. Durch die Perspektive der Kamera entsteht der Linienversatz. Dabei ist egal, ob die Kamera von oben auf das Objekt zeigt und der Laser schräg sitzt oder andersrum. Die Lasertriangulationssensoren aus der Industrie weisen zumeist den Aufbau aus Abb. (1) auf. Abb. (2) zeigt den anderen Aufbau, wobei der Linienversatz aufgezeigt wird.

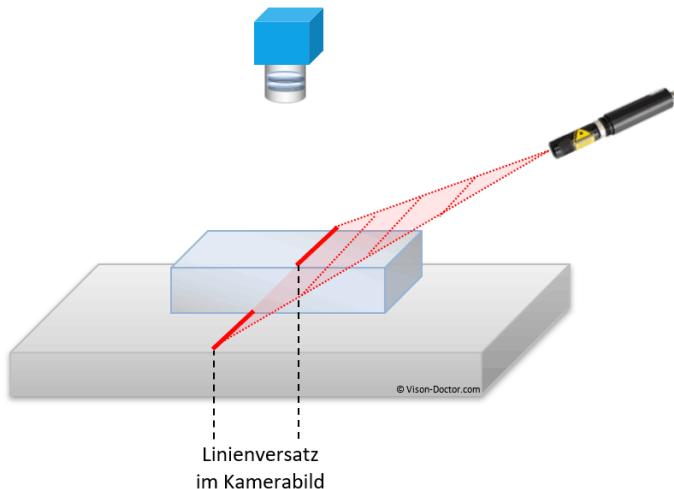


Abbildung 2: Positionen bei der Lasertriangulation
(Abbildung entnommen aus [18])

Die Entwicklung lässt sich in zwei Abschnitte aufteilen. Der erste Abschritt ist die Erarbeitung des Lasertriangulationssensors. Dessen Aufgabe ist es, eine aufgenommene Laserlinie in eine korrekte Punktewolke umzusetzen. Danach muss es dem Sensor ermöglicht werden, sich über das Objekt zu bewegen. Möglich ist auch, dass Objekt unter dem Sensor durch zu bewegen.

Wichtig ist, dass die Kamera und Laser in einem Winkel zueinander über dem Objekt angebracht sind (Abb. (1), (2)). Dabei ist ausschlaggebend, dass Kamera und Laser fest angebracht sind und sich zueinander nicht bewegen. Nur der ganze Sensor ist bewegbar, dabei bleiben dann Kamera und Laser zueinander in der gleichen Position.

2.3. Pinhole Camera Model

Wenn eine Kamera ein Bild aufnimmt, ist das eine Abbildung eines dreidimensionalen Raumes (die Szene) auf eine zweidimensionale Ebene (das Bild). Der Lasertriangulationssensor soll diesen Prozess umgekehrt realisieren. Die Grundlage ist das aufgenommene Bild. Ein Bild besteht aus Pixeln. Ausgehend von diesem, soll der dreidimensionale Raum digital abgebildet werden. Das bedeutet, dass für jeden Pixel eine definierte Abbildung im dreidimensionalen Raum gefunden werden muss. Für diese Abbildungen ist in OpenCv das **Pinhole Camera Model** implementiert. Hier wird die Kamera digital als eine Lochkamera begriffen.

In Abb. (3) ist dieses Modell dargestellt. An dem optischen Zentrum orientiert sich das Kamera-Koordinatensystem (F_c). Dabei wäre das optisches Zentrum bei einer Lochkamera die Lochblende oder bei einer herkömmlichen Kamera der optische Sensor. Wenn mit einer Lochkamera ein Bild aufgenommen wird, erscheint die Abbildung auf dem Kopf

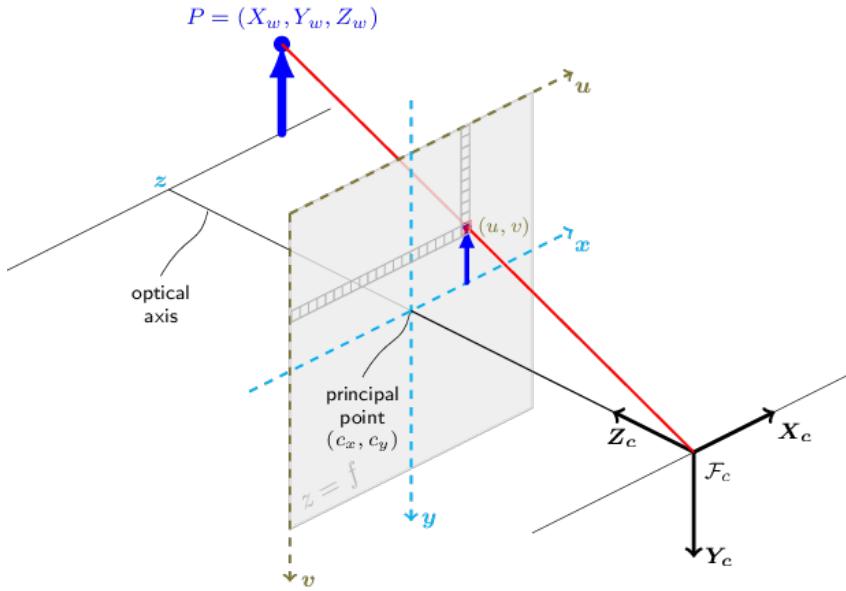


Abbildung 3: Pinhole Camera Model
(Abbildung entnommen aus [15])

gespiegelt auf einer Bildebene. Das hat physikalische Gründe. Das Pinhole Kamera Model ist aber rein digital. So muss die Bildebene nicht hinter dem optischen Sensor sein. Sie wird zwischen dem optischen Zentrum und der Abbildung im dreidimensionalen Raum dargestellt. So kann ein Punkt in der Szene als Vektor begriffen werden, der durch die Bild-Ebene einen Pixel definiert und zum optischen Zentrum führt [vgl. 9]. Zu sehen in Abb. (3) als die rote Linie. In diesem Fall ist das Bild und die genaue Position eines Pixels mit u und v bekannt. Das Ziel ist es, die dazugehörige 3D-Koordinate (P) zu erhalten.

2.4. Mathematische Grundlage

Die Grundlage für die Berechnungen mit den Pixeln aus einem Bild ist die folgende Formel:

$$s p_{pix} = A [R|t] p_w \quad (1)$$

Sie beschreibt die Projektion eines 3D-Punktes in eine Szene zu einem Punkt in der Bild-Ebene. Hierbei ist p_{pix} der Pixel im Bild. p_w ist die Welt-Koordinate, welche gesucht wird. A ist die Kamera-Matrix. $[R|t]$ ist eine Rotation und Translation und beschreibt eine Transformation vom Kamerakoordinatensystem zum Weltkoordinatensystem. Die genaue Entstehung der Formel beschreibt OpenCv in [vgl. 15]. Kamera-Matrix, Rotation und Translation sind hierbei neu. Die genaue Bedeutung wird in dem Kapitel 3.1 Kalibrierung genannt. Zum Verstehen der Formel ist hier nur wichtig, dass diese durch eine Kamerakalibrierung herausgefunden werden können [vgl. 9]. Die Variablen sind also bekannt. Kamera-Matrix und Rotation sind beide jeweils 3x3 Matrizen. Die Translation wird durch einen Vektor (3x1) beschrieben.

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

In der Formel (2) wird dies noch einmal genauer gezeigt. Bekannt sind also p , A und $[R|t]$. Unbekannte Variablen sind s der Scale-Factor und p_w die Weltkoordinate.

2.4.1. Koordinaten-Transformationen

Um den 3D-Punkt im Weltkoordinatensystem anhand eines Pixels zu errechnen, wird die grundlegende Formel umgestellt. Die folgende Abbildung (4) zeigt nochmal das Pinhole Camera Model und verdeutlicht dabei die angewandten Transformationen.

Das Ziel ist es, den 3D-Punkt (in Abb. (4) W) im Weltkoordinatensystem zu errechnen. Die Rotation (R) und Translation (t) werden für die Umrechnung in das Kamerakoordinatensystem benötigt. Das sind die sogenannten extrinsischen Parameter. In Abb. (4) wird diese Transformation unter P der **Camera Pose Matrix** dargestellt.

Die Kamera-Matrix beschreibt die Transformation zur Bild-Ebene bzw. den Pixelkoordinatensystem. Die Matrix enthält die sogenannten intrinsischen Parameter. Das ist die in Abb. (4) gezeigte **Focal Length** f , welche den Abstand vom Kamera-Koordinatensystem

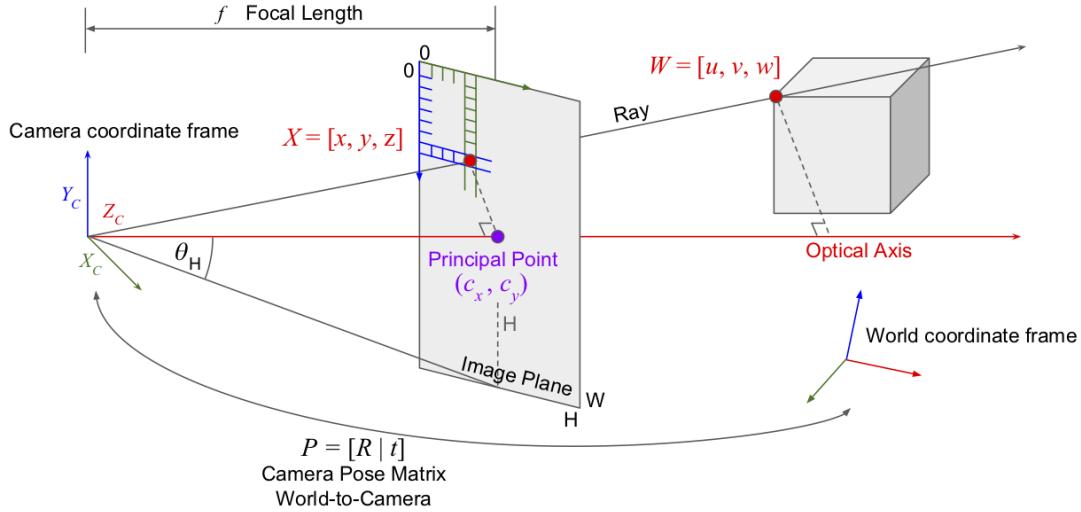


Abbildung 4: Transformationen im Pinhole Camera Model
(Abbildung entnommen aus [7])

zur Bild-Ebene beschreibt. Hinzu kommt der **Principal Point**. Dieser befindet sich in dem Zentrum der Bild-Ebene. Beides zusammen ergibt die gezeigte Matrix aus (2) [vgl. 14]. Letztendlich wird damit die Umrechnung vom Kamerakoordinatensystem (in Abb. (4) **Camera coordinate frame**) zur Bild-Ebene (in Abb. (4) **Image Plane**) dargestellt. Es ist möglich, einen Pixel im Bild auszuwählen und mithilfe dieser Parameter den entsprechenden Punkt im Weltkoordinatensystem errechnen. Dazu muss die Formel (1) nach dem Punkt im Weltkoordinatensystem umgestellt werden.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} A \\ R | t \end{bmatrix} p_w &= s p_{pix} \\
 \begin{bmatrix} R | t \end{bmatrix} p_w &= s \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} p_{pix} \\
 \begin{bmatrix} R \end{bmatrix} p_w &= s \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} p_{pix} - t \\
 p_w &= s \begin{bmatrix} R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} p_{pix} - \begin{bmatrix} R \end{bmatrix}^{-1} t \\
 p_w &= s \vec{a} - \vec{b}
 \end{aligned} \tag{3}$$

wobei : $\vec{a} = \begin{bmatrix} R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} p_{pix}$
 $\vec{b} = \begin{bmatrix} R \end{bmatrix}^{-1} t$

Diese Gleichung ist die Grundlage der Errechnung von 3D-Informationen. \vec{a} und \vec{b} dienen zur Vereinfachung. Wenn $\begin{bmatrix} R \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1}$ und p_{pix} miteinander verrechnet werden entsteht ein Vektor (\vec{a}). Genauso entsteht aus $\begin{bmatrix} R \end{bmatrix}^{-1}$ und t der Vektor (\vec{b}). Zusätzlich beschreibt

$s \vec{a} - \vec{b}$ eine Gleichung für eine Linie im dreidimensionalen Raum. Damit stellt sie den beschriebenen Vektor in [vgl. 9, S. 3] und die rote Linie in Abb. (3) und (4) dar.

Der neue Ausgangspunkt ist die errechnete Weltkoordinate. Nach Aufgabenstellung sollen errechnete Koordinaten immer aus Sicht der Kamera dargestellt werden. Dazu wird die folgende Transformation benötigt.

Weltkoordinate zu Kamerakoordinate:

$$p_{cam} = [R] p_{welt} + t \quad (4)$$

Kamerakoordinate zur Weltkoordinate:

$$p_{welt} = [R]^{-1} (p_{cam} - t) \quad (5)$$

Anzumerken ist noch, dass s der Scale-Factor immer noch eine Unbekannte ist. Es scheint also, als ob die Gleichung (3) noch nicht lösbar sei. Sobald konkrete Werte ausgerechnet werden sollen, muss s bekannt sein. Das passiert zum ersten Mal beim Erstellen der Ebenengleichung für die Laser-Ebene bei der extrinsischen Kalibrierung. Dabei wird auch darauf eingegangen, wie s errechnet werden kann.

2.5. Bildverarbeitung

Bekannt sind nun gewisse Grundlagen, wie mit einem ausgewählten Pixel im Bild umgegangen werden kann. Die Rechnungen und Transformationen sollen aber nicht auf zufällige oder sogar alle Pixel im Bild angewandt werden. Sie sollen auf ganz bestimmte ausgewählte Pixel erfolgen. Und zwar ganz genau diese, die zur abgebildeten Laserlinie gehören. Die Laserlinie ist immer unser Ausgangspunkt für die 3D-Informationen. Alle anderen Pixel interessieren im Grunde nicht.

Pixel können einfach und eindeutig als Tupel benannt werden. Sie können als Punkt in einem zweidimensionalen Koordinatensystem begriffen und dann mit einem horizontalen und vertikalen Wert genau gekennzeichnet werden. Benötigte wird eine Menge an diesen Tupeln, für die gilt, dass sie Teil der Laserlinie im Bild sind. Mit diversen Methoden der Bildverarbeitung können diese Pixel herausgefunden und abgespeichert werden, um mit ihnen weiterarbeiten zu können. Das folgende Kapitel bildet somit einen Algorithmus ab, dessen Ziel es ist, ein Bild entgegenzunehmen und die Pixel der Laserlinie zurückzugeben.

2.5.1. Das Erkennen der Laserlinie

Der erste Schritt des Algorithmus muss sein, die Laserlinie im Bild zu erkennen. Ein wichtiges Kriterium dabei ist die Genauigkeit der ausgewählten Pixel. Jeder Pixel, der vom Algorithmus markiert wird, aber nicht zur eigentlichen Laserlinie gehört, wird in einem Fehler in der am Ende erstellten Punktwolke enden. Es wird also ein Punkt im Raum gezeigt, der nicht zur eingescannten Oberfläche passt. Dieser hängt dann beispielsweise in der Luft bzw. ist an einer Stelle im Koordinatensystem, wo sich eigentlich nichts befindet. Dieses sogenannte Rauschen soll möglichst gering sein.

Im Zuge einer umfangreichen Recherche zum Thema Lasertriangulation und OpenSource-Produzierten Laserliniencannern wurde ein Paper von Bajpai und Perelman [vgl. 4], die auch einen Laserlinienscanner entwickelt haben, als Grundlage gewählt. Nicht nur bei dem Finden der Laserlinie, auch in diversen anderen Schritten der Errechnung von 3D-Punkten aus den Laserlinien-Pixeln ist dieses Paper eine Grundlage und Hilfestellung. Gemäß der dort verwendeten Methodik wurde die Idee übernommen, zwei Bilder aufzunehmen. In einem ist der Laser angeschaltet, in dem anderen nicht. Wenn diese Bilder voneinander abgezogen werden, kommen im Grunde genau die Veränderungen hervor. Da sich nichts anderes im Bild verändern sollte, außer das Erscheinen der Laserlinie, wird diese genau aufgezeigt. Voraussetzung dafür ist, dass die Umgebung der zu scannenden Fläche gleich bleibt. Einwirkungen wären zum Beispiel Änderungen bei den Lichtverhältnissen bzw. bei der Beleuchtung oder auch eine Bewegung von Objekten zwischen der Aufnahme der zwei Bilder. Solche Einwirkungen würden in ungewolltem Rauschen enden oder sogar

die Laserlinie falsch positionieren. Weitere Informationen hierzu befinden sich ebenfalls im Kapitel 4.3 Probleme und Schwierigkeiten. Diese Anforderungen werden für den zu entwickelnden Laserlinien-Scanner akzeptiert. Ebenfalls sind es Anforderungen, die nicht direkt von der Software beeinflusst werden können. Sie sollten somit beim Aufbau des Scanners genauer beachtet werden und auf die Bildverarbeitung keinen Einfluss mehr haben dürfen. Die Methode ist außerdem ohne Probleme über OpenCv umsetzbar.

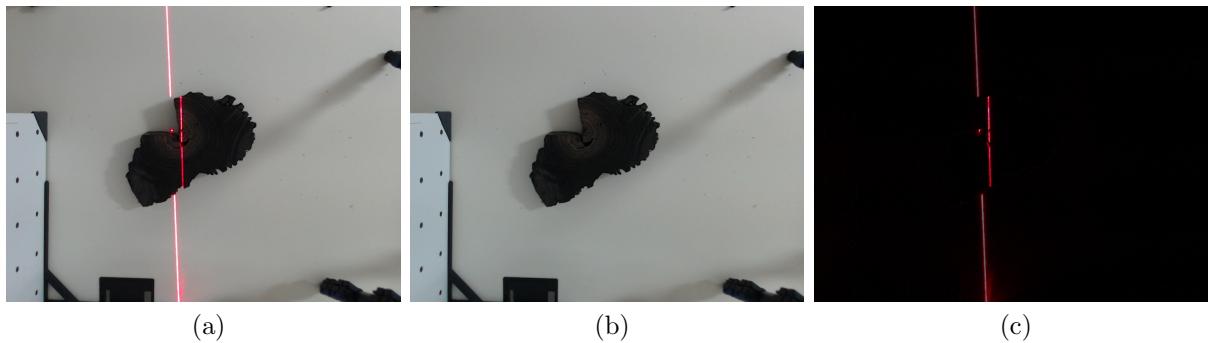


Abbildung 5: Subtraktion der Bilder

Festzuhalten ist damit, dass die Kamera zwei Bilder aufnehmen muss, eins Bild mit Laserlinie und ein Bild ohne. Das Bild ohne Laserlinie (5b) wird dann von dem mit Laserlinie (5a) abgezogen. Der Algorithmus zum Finden der Laserlinien-Pixel arbeitet dann mit der Differenz (5c).

2.5.2. Umwandlung zu einem Grauwert-Bild

Für einen Menschen ist die Laserlinie jetzt schon auf einem Blick gut erkennbar. Ein Algorithmus braucht allerdings spezifische Informationen, um die Pixel auszuwählen. Auch die Pixel, die nicht eindeutig zur Laserlinie gehören sind nicht komplett schwarz mit einem RGB-Wert von (R=0, G=0, B=0). Einen kleinen für den Menschen zumeist nicht sichtbaren Unterschied in zwei nacheinander aufgenommenen Bildern wird es immer geben.

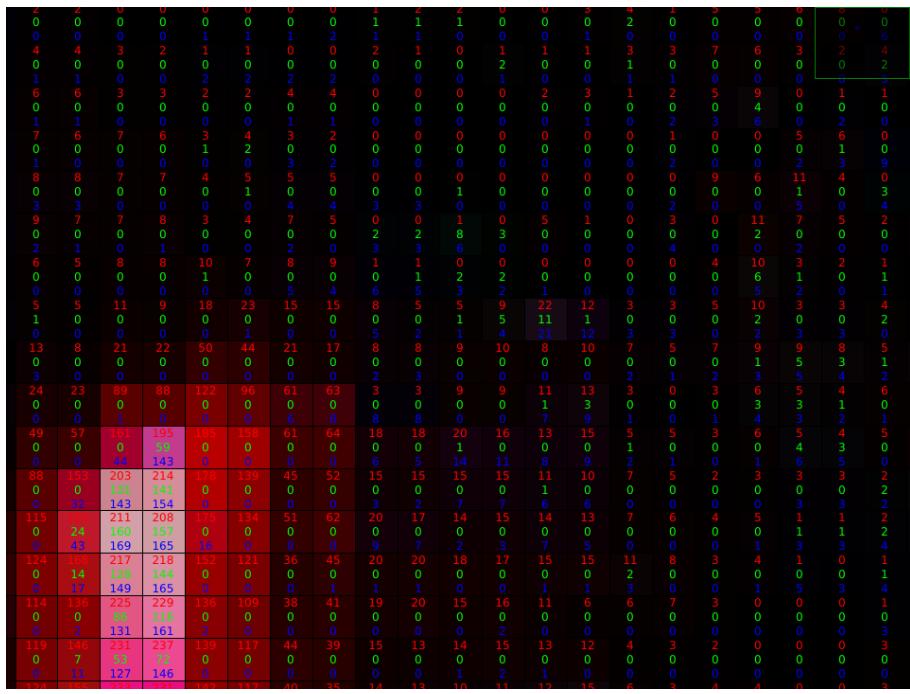


Abbildung 6: Pixel-Werte in einem Ausschnitt aus 5c am Rand der Laserlinie

Die Abbildung zeigt gut die Pixel der Laserlinie unten links. Die verschiedenen Farbbe reiche sind stark vertreten, vor allem der Rote. Die Pixel, die kein Teil der Laserlinie sind, besitzen nur sehr schwache Werte in den drei Farbbereichen. Nach einer Regelung muss hier immer noch genau festgelegt werden, welche Pixel für die Laserlinie ausgewählt werden. Die Differenz von den zwei Bildern macht dies allerdings einfacher. Gleichbleibende Stellen zwischen den beiden Bildern wie zum Beispiel sehr helle Stellen oder auch andere rote Stellen sind in dem Differenz-Bild nicht mehr erkennbar. Ohne diesen Schritt wären diese womöglich nicht genau von der Laserlinie zu unterscheiden.

Als zweiter Schritt wird das Bild zu einem Grauwert-Bild konvertiert. Vorteil davon ist, dass nicht mehr der RGB-Wert mit drei eigenen Werten ausschlaggebend ist, sondern nur noch die Intensität, bzw. der Grauwert eines Pixels. Die jeweilige Intensität für einen Pixel berechnet OpenCv nach der folgenden Formel [Vgl. 16]:

$$Y = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B \quad (6)$$

Die Formel (6) zeigt, dass aus den drei Farbwerten nun ein einzelner Grauwert errechnet wird. Allgemein kann dabei festhalten werden, dass je höher die einzelnen Farbinformationen waren, um so höher wird auch der Grauwert bzw. die Intensität sein. Das betrifft die Pixel der Laserlinie. Die anderen Pixel besitzen sehr geringe Farbwerte und werden deshalb auch eine geringe Intensität aufweisen.

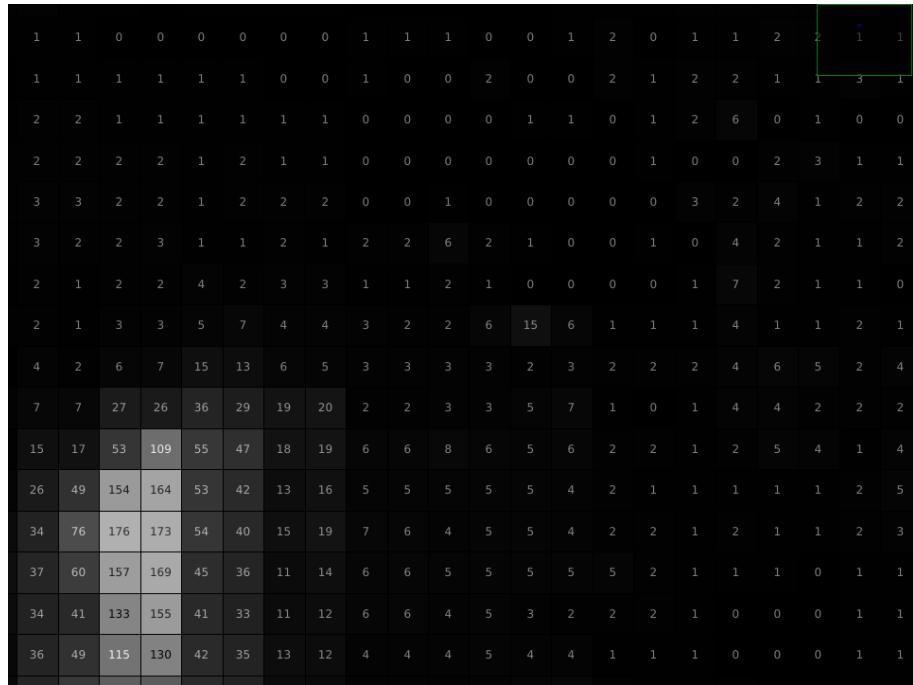


Abbildung 7: Der selbe Ausschnitt wie in Abb. (6), nur als Grauwertbild konvertiert.

Die Abbildungen (6) und (7) zeigen auch, dass eine Laserlinie bis zu 4 oder 5 Pixel breit sein kann. Für die Weiterverarbeitung soll sie allerdings nur eine Breite von einem Pixel haben. Dazu wird in jeder Pixel-Zeile in einem Bild nach der höchsten Intensität gesucht. Das ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Laserlinie im Bild von oben nach unten geht. Der Laser muss demnach entsprechend zur Kamera angebracht werden. Diese Anforderung kann schon im Aufbau des Sensors beachtet werden. Im Kapitel 2.2 wurde beschrieben, dass Kamera und Laser zueinander in der gleichen Position bleiben. Demnach kann der Laser entsprechend so angebracht werden, dass er im Kamerabild entsprechend aufgenommen wird.

2.5.3. Gauß-Filter

Die einfachste Methode wäre also jede Zeile nach der höchsten Intensität zu suchen und den betreffenden Pixel auszuwählen. Dieser Pixel befindet sich je nach Aufnahme jedoch nicht genau in der Mitte der Laserlinie. Die erarbeiteten Linien können so sehr „wellig“

werden, da Pixel untereinander zum Teil stark in ihrer Position in der Zeile abweichen. Den Pixel mit der höchsten Intensität als Ausgangspunkt zu nehmen ist gut, jedoch sollen die umliegenden Pixel einen Einfluss machen können, um die Genauigkeit der Laserlinie zu erhöhen. Dazu wurden zwei Vorgänge entwickelt.

Die erste Methode ist es, einen Gauß-Filter über das Grauwert-Bild zu legen. Ein Gauß-Filter ist ein Weichzeichner, der umgangssprachlich ein Bild verwischt oder unscharf macht bzw. das Grauwertbild glättet [vgl. 13, S. 134ff]. Der Gauß-Filter wird auf jeden Pixel im Bild angewandt. Dabei ändert er den Wert des ausgewählten Pixels in Abhängigkeit der umliegenden Pixel. In diesem Projekt wird er dabei in einer Reichweite von einem 5x5-Feld definiert. Das bedeutet, dass ausgehend von dem ausgewählten Pixel ein 5x5-Feld betrachtet wird. Der Gauß-Filter ist ein Tiefpassfilter und wirkt damit möglichem Rauschen im Bild entgegen. Wenn ein einzelner Pixel ein hohen Wert aufweist, jedoch alle anderen um diesen herum im Vergleich niedriger sind, wird der Pixel-Wert nach der Filter-Operation niedriger ausfallen. So werden demnach vereinzelte Pixel mit hoher Intensität dunkler gemacht. Bei Gruppen von Pixeln werden die Intensitäten aneinander angepasst.

2.5.4. Das Erstellen von Subpixeln

Nachdem der Filter verwendet wurde, kommt die Operation, in der jede Zeile des Bildes nach dem Laserlinien-Pixel abgesucht wird. Hier wird zuerst der Pixel mit der höchsten Intensität gesucht. Dabei kann immer noch mehr Genauigkeit erzielt werden, wenn man die Pixel links und recht neben dem Ausgewählten mit beachtet. So fließt nicht nur die Intensität als Auswahlkriterium ein, sondern auch die benachbarten Pixel der Laserlinie in dieser Zeile. Da die erschlossenen Pixel in 3D-Koordinaten umgewandelt werden und somit vom Bild und der Pixel-Darstellung getrennt werden, ist es nicht mehr notwendig nur ganze Zahlen zu verwenden. Die Werte können also auch Nachkommastellen haben und sogenannte Subpixel ergeben. Für dieses Errechnen des passenden Subpixel wurde ein Algorithmus erstellt, der wie folgt funktioniert:

1. Grenzwert

Zuerst wird ein passender Grenzwert für die Intensität gesucht, um eine Grenze festzulegen, ab welchen Wert überhaupt ein Pixel gefunden werden soll. Wenn die maximale Intensität in einer Zeile unter dem gewählten Grenzwert liegt, wird diese übersprungen. Damit wird auch ungewolltes Rauschen entfernt, da eine Intensität, die so niedrig ist, nicht zur Laserlinie gehören kann. Ein im Vorhinein festgelegter Grenzwert ist dabei nicht ausreichend, da dieser nicht an das aktuelle Bild angepasst wäre. Bilder können unterschiedlich ausfallen und nicht wie gewollt auf den Grenzwert reagieren. So können zu viele

oder zu wenig Zeilen übersprungen werden. Der Grenzwert soll genau auf das aktuelle Bild angepasst sein. Die Otsu-Methode ist ein Schwellenwertverfahren, welches genau den gewollten Wert liefern kann [vgl. 17]. Dabei wird von einem Grauwertbild ein Histogramm erstellt. Dieses wird analysiert und ein passender individueller Grenzwert ausgegeben. Die höchste Intensität der aktuellen Zeile wird auf diesen geprüft. Wenn sie zu niedrig ist, ist auch die ganze Zeile zu dunkel und wird nicht als Teil der Laserlinie angesehen.

2. Einbeziehen der benachbarten Pixel

Der Ausgangspunkt ist jetzt der Pixel mit der höchsten Intensität und dieser liegt über dem errechneten Grenzwert. Die benachbarten Pixel sollen jetzt in einen endgültigen Wert mit einbezogen werden. Um das zu erreichen, wird eine Parabel genutzt. Es gilt eine quadratische Funktion in der Form $ax^2 + bx + c = I_x$, wobei I die Intensität und x die Position in der jeweiligen Zeile ist. Bei einem Bild, das beispielsweise 1920 Pixel breit ist, ist x ein Wert zwischen 0 und 1919. Die quadratische Funktion wird auf den ausgewählten Pixel und seine Nachbarn angewandt. Somit gilt:

$$\begin{aligned}
 ax^2 + bx + c &= I_x \\
 a(x+1)^2 + b(x+1) + c &= I_{x+1} \\
 a(x-1)^2 + b(x-1) + c &= I_{x-1} \\
 \text{daraus folgt:} \\
 \underbrace{\begin{pmatrix} x^2 & x & 1 \\ (x+1)^2 & (x+1) & 1 \\ (x-1)^2 & (x-1) & 1 \end{pmatrix}}_X \underbrace{\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}}_{\vec{abc}} &= \begin{pmatrix} I_x \\ I_{x+1} \\ I_{x-1} \end{pmatrix} \tag{7}
 \end{aligned}$$

Das Ziel ist es den Vektor \vec{abc} herauszufinden. Da die Intensitäten und die x -Werte bekannt sind, ist \vec{abc} die einzige Unbekannte und kann errechnet werden. Im nächsten Schritt soll das Maximum der Parabel herausgefunden werden. Sie befindet sich dort, wo die tatsächliche Intensität am höchsten ist. Dieser x -Wert befindet sich dann in den meisten Fällen zwischen zwei Pixeln. Um das Maximum zu finden wird die Nullstelle der Ableitung errechnet. Dafür gilt:

$$\begin{aligned}
 2a \cdot x + b &= 0 \\
 x &= \frac{-b}{2a} \tag{8}
 \end{aligned}$$

b und a sind durch das Errechnen von \vec{abc} bekannt und ein Wert für x kann gefunden

werden.

In der Rechnung fällt auf, dass x für jede Zeile individuell ausgerechnet wird. Dabei ändert sich in (7) die Werte für x und die Intensitäten. Hier kann man die Berechnung vereinfachen. Wählt man für $x = 0$, entsteht die folgende Matrix:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Wenn \vec{abc} mit dieser Matrix und den individuellen Intensitäten berechnet wird, erhält man die Abweichung zu Mitte. Dabei ist die Mitte 0 und das entspricht dem ausgewählten Pixel mit der höchsten Intensität. Man errechnet eine Zahl zwischen -1 und 1. Diese wird mit der x-Position des Ausgangspixel in der Zeile verrechnet. Der Algorithmus wurde somit vereinfacht, da sich in jeder Rechnung nur der Intensitäten-Vektor ändert und immer die gleiche Matrix X gewählt werden kann.

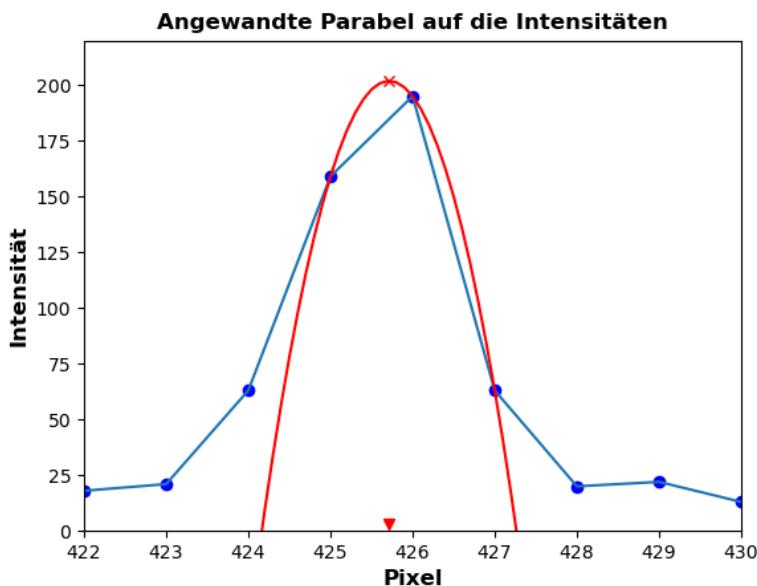


Abbildung 8: Parabel für die Intensitäten. Die Blauen Punkte kennzeichnen einen Pixel und seine jeweilige Intensität. Die Parabel wird durch den Punkt mit der höchsten Intensität und seine Nachbarn gelegt.

(Der gezeigte Ausschnitt stammt aus einer ausgewählten Zeile in Abb. (5c))

Mit dem Finden des x-Wert ist die Bearbeitung einer Zeile fertig. Es gibt nun eine eindeutige 2D-Koordinate für einen Punkt der Laserlinie. Der Algorithmus geht über jede Zeile (y) und findet einen x-Wert. Dabei fügt er die gefundenen Subpixel (x, y) in einer

Liste zusammen. Die Menge dieser Subpixel ist die Abbildung der Laserlinie in einen 2-dimensionalen Raum (Abb. (9)). Diese wurde als Output gefordert.

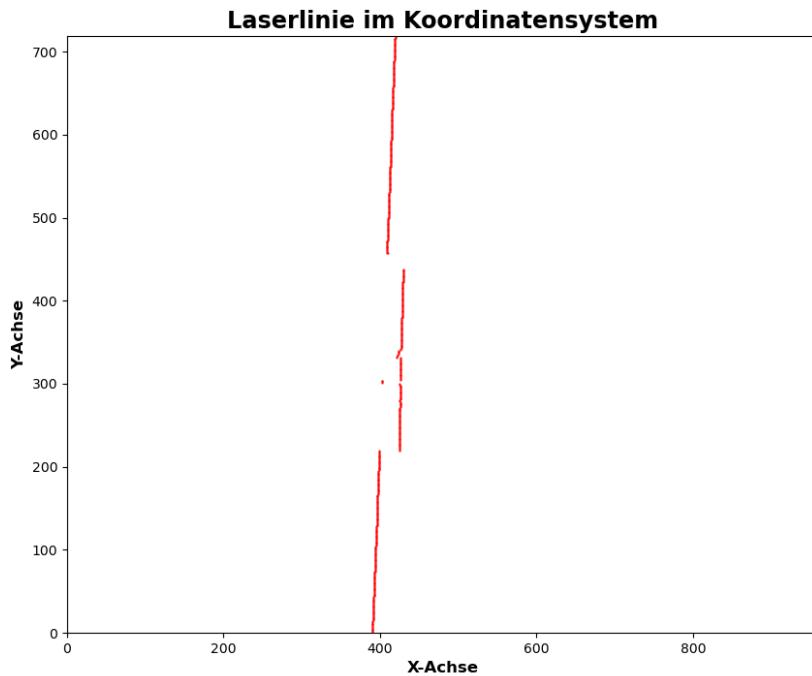


Abbildung 9: Die Subpixel können nun in einem Koordinatensystem dargestellt werden.

Wenn man die Abb. (9) und (5c) vergleicht, fällt auf, dass die Abbildung im Koordinatensystem gespiegelt ist. Das liegt daran, dass die Nummerierung der Pixel im Bild oben links beginnt (der Nullpunkt mit Pixel (0, 0)) und bei einem Koordinatensystem unten links.

3. Projektumsetzung

3.1. Kalibrierung

Die Kamerakalibrierung ist ausschlaggebend, um die Formel (2) benutzen zu können. Durch sie wird die Kamera-, Rotationsmatrix und der Translationsvektor gefunden. Dabei unterscheidet man zwischen intrinsischer und extrinsischer Kalibrierung, bei denen auch ein unterschiedliches Kalibrierverfahren angewandt wird. Die intrinsische Kalibrierung beschäftigt sich mit der Kamera selbst, wobei die extrinsische Kalibrierung die Positionen der Kamera und des Lasers kalibriert.

3.1.1. Intrinsische Kalibrierung

Ergebnis der intrinsischen Kalibrierung ist die Kameramatrix A . Die Kamerakalibrierung ist in OpenCv implementiert und wurde in diesem Projekt genutzt [vgl. 14]. Die Implementierung in OpenCv richtet sich nach der Kamerakalibrierung nach Zhang [vgl. 21] und nach Bouguet [vgl. 6].

Der grundlegende Vorgang ist es, ein bekanntes Muster in verschiedenen Positionen mit der Kamera aufzunehmen. So ein Muster ist beispielsweise ein Schachbrett, welches auch in dieser Arbeit für das Kalibrieren benutzt wurde. Die Maßen des Schachbrettes und der Kacheln sind bekannt. Dabei muss es sich bei der Anzahl der Kacheln nicht um ein herkömmliches Schachbrett handeln. Die Größe und die Menge an Kachel kann zum kalibrieren angegeben werden. Man muss OpenCv also sagen, nach welchem Schachbrett der Algorithmus suchen muss.

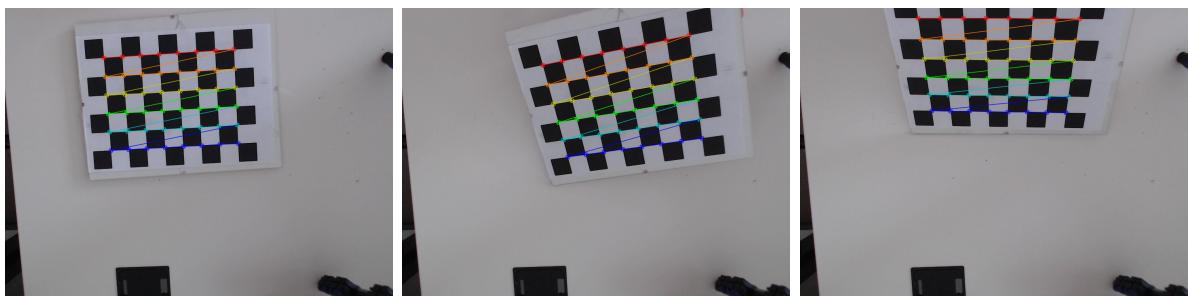


Abbildung 10: Schachbrett-Kalibrierung mit dem Schachbrett aus verschiedenen Positionen

Die benutzte Methode heißt **calibrateCamera()**. Sie nimmt beliebig viele Bilder entgegen. In der eigenen Implementierung wurde gemäß [vgl. 14] vorgegangen. Dabei handelt es sich um die offizielle Einführung zur Kamerakalibrierung von OpenCv. In dem Beispiel in Abb. (10) wurden der Einführung folgend auch die Ecken des definierten Schachbrettes eingezeichnet. Damit kann man im Grunde sichtbar machen, dass der Algorithmus das

Schachbrett richtig erkannt hat. Gemäß [vgl. 14] werden mindestens 10 Bilder benötigt, um gute Ergebnisse zu liefern. Daran wurde sich ebenfalls gehalten. Die Methode gibt die folgenden Werte zurück:

Kameramatrix

Die **Kameramatrix** wird errechnet und ausgegeben. Dabei handelt es sich um die vollwertige Matrix A aus den Formeln (1) und (2).

Verzerrungs – Koeffizienten

Die Verzerrungs-Koeffizienten (eng.: Distortion-Coefficient) werden gemäß [vgl. 14] geliefert. Die Verzerrung bezieht sich auf das aufgenommene Bild. Die Auswirkungen sind, dass aufgenommene gerade Linien in der Szene, im Bild nicht mehr gerade dargestellt werden. Sie biegen sich bzw. sind verzerrt. Es gibt zwei verschiedene Verzerrungen, beschrieben in [vgl. 1, S. 41] und von OpenCv selbst in [vgl. 15].

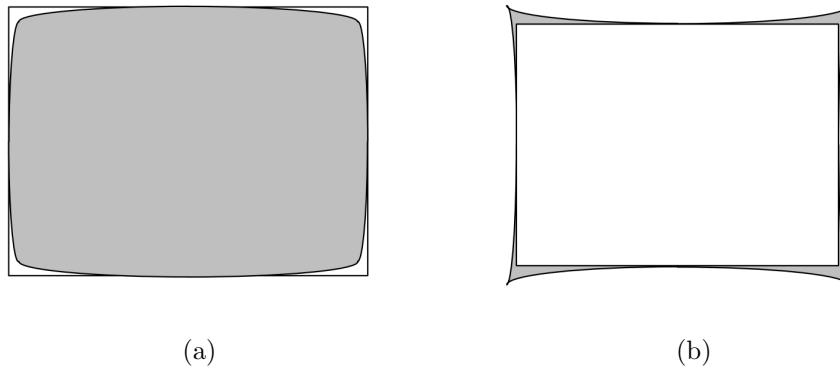


Abbildung 11: Verzerrung bei Bildern; 11a zeigt die Tonnen-Verzerrung (engl.: Barrel-Distortion) und 11b die Kissen-Verzerrung (engl.: Pincushion-Distortion)
(Abbildungen entnommen aus [1])

Um dieser Verzerrung entgegenzuwirken, gibt es in OpenCv die Methode **undistort()**. Diese bringt ein Bild wieder in den normalen Zustand und benutzt dabei die gefundenen Koeffizienten [vgl. 14]. Das Benutzen dieser Methode ist unumgänglich. Die Laserlinie ist bei einem ebenen Untergrund gerade. Wenn diese allerdings gebogen ist, führt das beim Aufspannen auf die Ebene zu Höhenunterschieden zwischen den Punkten. Die Verzerrung ist nicht Teil des Pinhole Camera Models und somit auch kein Teil der Formel (1). Bevor mit aufgenommenen Bildern gearbeitet wird, werden die jedoch mit der Methode **undistort()** entzerrt.

Ebenso ist erkennbar, dass es sich bei den verwendeten Kameramodell um eine *Barrel-Distortion* (siehe Abbildung 11a) handelt.

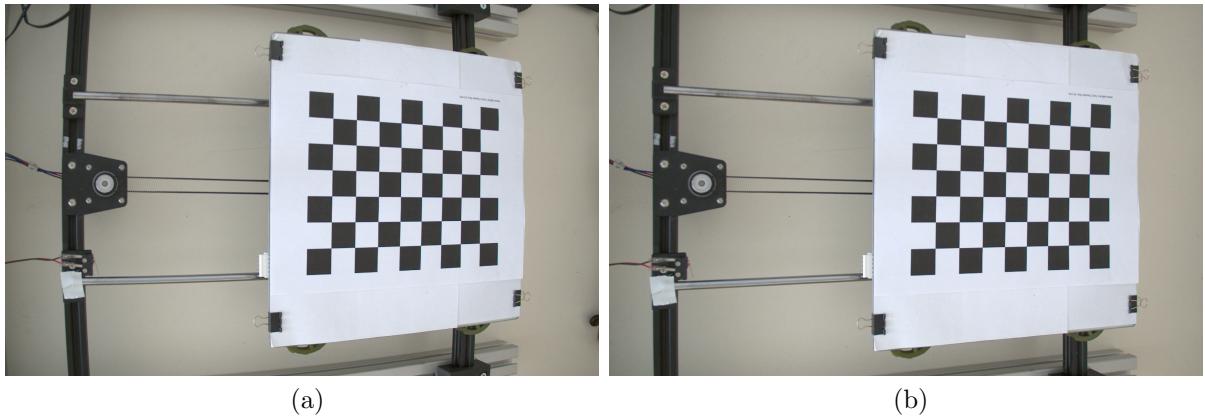


Abbildung 12: Hier ein direktes Beispiel aus dem Aufbau. 12a zeigt das Bild vor dem Anwenden von `undistort()` und 12b danach.

Rotationen und Translationen

Die Methode gibt ebenfalls eine Rotationsmatrix und einen Translationsvektor für jedes übergebene Schachbrett zurück. Das sind extrinsische Parameter. In jedes Schachbrett wird ein Koordinatensystem gelegt. Die Rotation und Translation beschreiben dann die Transformation von dem Kamerakoordinatensystem zu diesem Weltkoordinatensystem. Es werden also auch schon extrinsische Parameter geliefert. Diese sind allerdings für den Lasertriangulationssensor selbst nicht ausschlaggebend. Damit dieser mit dem Laser kalibriert werden kann, also eine Ebenen-Gleichung für den Laser gefunden wird, muss der Laser mit auf den Bildern abgebildet sein. Dann kann man die Laserlinie in Bezug auf das gefundene Weltkoordinatensystem weiterverwenden. Für die extrinsische Kalibrierung wurde eine extra Methode entwickelt, welche im nächsten Kapitel beschrieben wird. Die Rotation und Translation zu den verschiedenen Positionen des Schachbrettes sind nicht von Interesse.

Die intrinsische Kalibrierung ist nur dazu da, die Kameramatrix zu finden und die Distortion-Koeffizienten zu bestimmen, damit die verwendeten Bilder nicht verzerrt sind. Die Kameramatrix ist explizit für die Kamera gültig, mit welcher das Schachbrettmuster aufgenommen wurde. Sie kann also bestimmt werden und ist dann für alle folgenden Rechnungen gültig und unverändert. Genauso verhält es sich mit den Distortion-Koeffizienten. Das bedeutet, dass der Lasertriangulationssensor initial einmal mit dieser Methode kalibriert werden muss, um die intrinsischen Parameter zu bestimmen. Danach werden die Kameramatrix und die Distortion-Koeffizienten abgespeichert und die extrinsische Kalibrierung kann beginnen.

3.1.2. Extrinsische Kalibrierung

Die extrinsische Kalibrierung beschäftigt sich allgemein damit, die Kamera zu den eingebauten Linienlaser zu kalibrieren. Ziel dabei ist es, eine Ebenengleichung zu erhalten, die sich im Kamerakoordinatensystem befindet und den Laser repräsentiert. Um sich das besser vorzustellen, kann nochmal Abb. (1) oder (2) eingesehen werden. Hier ist die symbolische Ebene des Lasers rot markiert. Die dazugehörige Gleichung beschreibt dann die Position des Laserlinienstrahls. Grundlegend richtet sich die Methode, um die Ebenengleichung zu finden, erneut nach Bajpai und Perelman [vgl. 4].

Bekannt ist, dass durch eine Kamerakalibrierung die Rotation und Translation herausgefunden werden kann. Durch die intrinsische Kalibrierung ist die Kameramatrix bekannt. Dabei wurde ein Schachbrett aus verschiedenen Positionen aufgenommen. Dabei erhält man durch die Kalibrierung auch Rotation und Translation zu einem Weltkoordinatensystem, welches auf dem Schachbrett platziert wird. Ziel ist es nun, ein Schachbrett mit einer Laserlinie aufzunehmen, um die Laserlinie mit dem Weltkoordinatensystem des Schachbretts in Verbindung bringen zu können. Die allgemeine Transformationsformel (2) kann dann für die Laserlinien-Punkte gelöst werden. Mit dem im Kapitel 2.5 vorgestellten Verfahren werden die Pixel, die die Laserlinie abbilden, gefunden. Diese werden in die Formel (2) eingesetzt. Dabei können die 3D-Punkte errechnet werden, welche sich in dem Weltkoordinatensystem befinden. Aus einer Linie kann jedoch keine Ebene abgeleitet werden. Dazu wird im selben Bild ein weiteres Schachbrett platziert, welches nicht eben, sondern sich in einem gewissen Winkel zu dem ersten befindet. Das zweite Schachbrett hat dabei ein eigenes Weltkoordinatensystem. Da jedoch alle Transformationen bekannt sind, ist es möglich die Laserlinien-Punkte des einen Koordinatensystems in das andere zu transformieren. Betrachtet werden nun zwei Laserlinien, die in einem Winkel zueinander in einem einheitlichen Koordinatensystem stehen. Mit dieser Ausgangslage ist es möglich, eine Ebene in die Punkte zu legen. Dabei gibt es diverse Möglichkeiten eine Ebene an Punkte zu fitten und alle liefern eine Ebenengleichung. Theoretisch sind sogar nur mindestens drei Punkte notwendig, um in einem dreidimensionalen Raum eine Ebene zu beschreiben. In diesem Fall sind es weitaus mehr Punkte, die zum Finden der Ebene berücksichtigt werden können.

In [vgl. 4] wird dann bei jedem Durchgang, bei dem eine Laserlinie in eine Punktewolke übersetzt wird, eine aktuelle neue Ebenengleichung erstellt und die Oberflächenpunkte errechnet. Ab diesem Punkt unterscheidet sich diese Arbeit von dem Vorgang im Paper. Die Idee ist es, nach der intrinsischen Kalibrierung eine einmalige extrinsische Kalibrierung vorzunehmen. Es wurde schon erwähnt, dass sich Kamera und Laser in ihrer Position zueinander nicht verändern. Damit bleibt auch die Ebenen-Gleichung in Bezug zur Kamera immer gleich. Die einmal gefundene Ebenengleichung ist also allgemeingültig für den

3.1. Kalibrierung

folgenden Scan. Dieser Vorgang der extrinsischen Kalibrierung soll hier nochmal genau beschrieben werden.

Zwei Schachbretter in einem Bild

Um die extrinsische Kalibrierung auszuführen, soll also ein Bild von zwei Schachbrettern gemacht werden. Dabei ist es nötig, dass sie in einem Winkel zueinander stehen. Das hat den Grund, dass die verschiedenen Laserlinien einen Winkel bilden müssen, um darin eine Ebene zu finden. Der Winkel ist dabei grundsätzlich egal. Jedoch sollte kein zu hoher oder zu niedriger Winkel gewählt werden, damit dieser nicht zu eng bzw. zu flach ausfällt. Zu diesem Zweck wurde eine eigene Unterlage designt.



Abbildung 13: Unterlage zum Kalibrieren

Für die Unterlage wurde ein 90°-Winkel benutzt. Das Kalibrier-Brett ist über ein 3D-Drucker gedruckt wurden. Abb. (13) zeigt Beispielbilder der verwendeten Kalibrier-Unterlage. Dabei ist der Laser auf der Unterlage erkennbar.

Zusätzlich liefert der entwickelte Lasertriangulationssensor während dem Kalibriervorgang Output-Bilder, die die verschiedenen Arbeitsschritte untermalen. Dabei werden genau die Bilder abgespeichert, die auch für die Bildverarbeitung und Kalibrierung verwendet werden.

Gemäß Kapitel 2.5 wird ein Bild-Paar aufgenommen. In einem ist die Laserlinie sichtbar (Abb. (14b)) und in dem anderen nicht (Abb. (14a)).



Abbildung 14: Ausgangsbilder der extrinsischen Kalibrierung

Unterscheidung der Schachbretter

In den vorherigen Abbildungen fällt auf, dass es sich bei den verwendeten Kalibriermustern nicht um ein herkömmliches Schachbrett handelt. Das verwendete Muster ist ein ChArUco-Board. Das Problem bei einem herkömmlichen Schachbrett ist, dass der Algorithmus für die Kamera-Kalibrierung in einem einzigen Bild nicht zwischen zwei Schachbrettern unterscheiden kann. Ein ChArUco-Board besitzt in den normal weißen Flächen eines Schachbretts sogenannte ArUco-Marker. Diese Marker können von der Kamera erkannt und eindeutig unterschieden werden. Das Finden und Unterscheiden der ChArUco-Board ist in OpenCv implementiert. Dabei definiert man, ähnlich zu dem Schachbrett aus der intrinsischen Kalibrierung 3.1.1, im Vorhinein die Parameter des Boards. Dazu gehören nicht nur die Kachel, sondern auch eine gewisse ArUco-Bibliothek, welche die Marker beschreibt. Der Algorithmus kann nun in einem Bild die beiden Boards unterscheiden und platziert ein Koordinatensystem darauf. Vorausgesetzt wird dabei, dass die Kameramatrix und die Distortion-Koeffizienten bereits bekannt sind. Da die intrinsische Kalibrierung initial durchgeführt wird, ist diese Voraussetzung erfüllt.

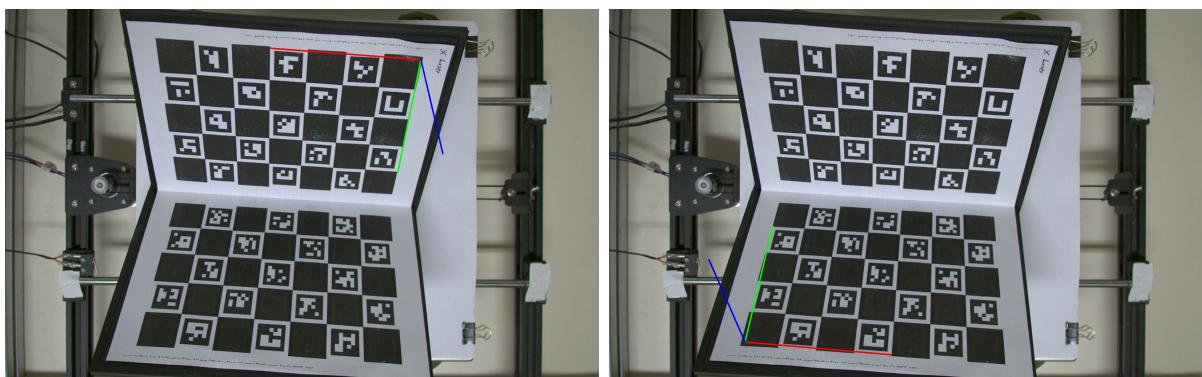


Abbildung 15: Weltkoordinatensysteme im ChArUco-Board

3.1. Kalibrierung

Bekannt sind jetzt die Rotation und Translation von dem Kamerakoordinatensystem zu den zwei Weltkoordinatensystemen, die aus den ChArUco-Boards folgen. Abb. (15) zeigt die Koordinatenachsen.

Finden der richtigen Laserlinie im Bild

Der nächste Schritt muss sein, die Laserlinie im Bild herauszuarbeiten. Dabei sollen die 2D-Punkte der Laserlinie herausgearbeitet und in die 3D-Repräsentation in dem Weltkoordinatensystem umgewandelt werden. Kapitel 2.5 beschreibt die Methodik. Das Problem ist, dass nur der Teil der Laserlinie benutzt werden darf, der sich auch tatsächlich auf den jeweiligen ChArUco-Board befindet. Das bedeutet, dass nur ein gewisser Ausschnitt aus dem Bild wichtig ist. Der Ausschnitt, der die Laserlinie auf dem zu untersuchenden ChArUco-Board darstellt.

Das ChArUco-Board selbst ist dabei die Lösung des Problems. OpenCv erkennt sowohl die ArUco-Marker, als auch die Ecken der Kachel. Dabei besitzen alle eine eindeutige ID. Über die Ecken kann also ein Bereich abgesteckt werden.

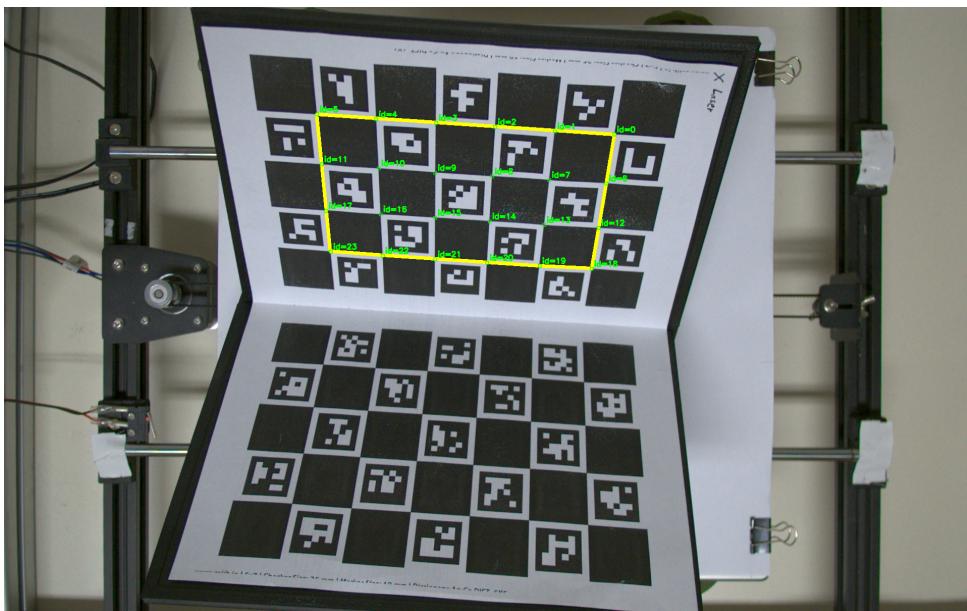


Abbildung 16: Point of Interest im Bild

Um den wichtigen Bereich abzustecken sind die Eckpunkte des Bereiches mit den IDs 0, 5, 18 und 23 ausschlaggebend. Wegen Fehleranfälligkeit wurde jedoch davon abgesehen, genau diese Ecken anzusprechen. Falls in einem Bild eine der äußersten Ecken nicht erkannt wurde, könnten man so den Bereich nicht abstecken. Deswegen wird eine konvexe Hülle benutzt. Damit werden immer die äußersten Punkte berücksichtigt. Fall gewisse Ecken wegen einer Unschärfe im Bild nicht erkannt werden, führt das nun nicht zu Fehlern. In Abb. (16) ist die abgesteckte Fläche in Gelb eingezeichnet. Falls keine Ecke bzw. keine ID

gefunden wurden, ist kein ChArUco-Board erkennbar und die Kalibrierung bricht ab. Mit den bekannten Bereich kann eine Maske entwickelt werden, die auf das Bild angewandt werden kann. Die Maske besteht dabei aus einem schwarzen Bild, in dem der ausschlaggebende Bereich aus weißen Pixeln besteht. Wenn man das Ziel-Bild bitweise mit der Maske verundet, bleibt nur der markierte Bereich bestehen. Alle andern Pixel sind schwarz. Ausgehend von den Ursprungsbildern (Abb. (14)) werden für die verschiedenen ChArUco-Boards eine Maske entwickelt und angewandt. Das Ergebnis ist die folgende Abbildung.

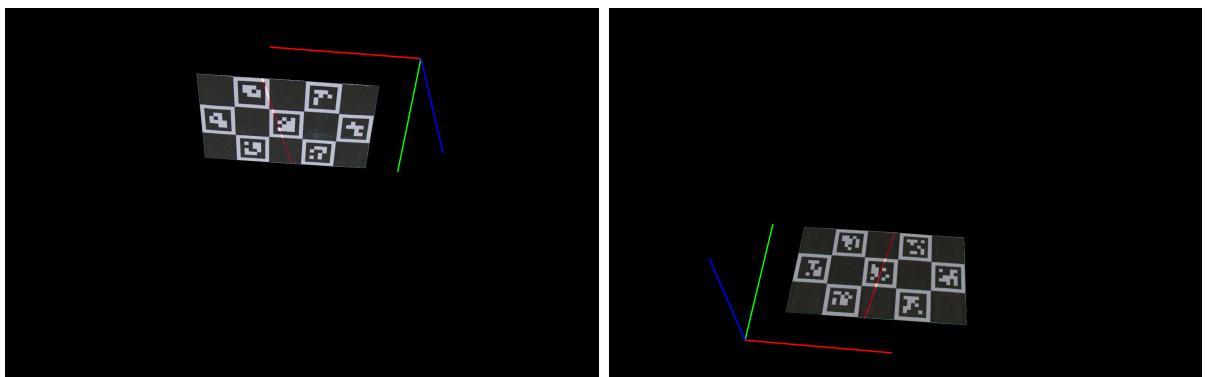


Abbildung 17: Ausgeschnittenen Laserlinien

Die Achsen des jeweiligen Koordinatensystems sind dabei nur zu Übersicht eingezeichnet und nicht Teil der Bildverarbeitung. Verdeutlicht werden soll jedoch, dass das Weltkoordinatensystem bekannt ist.

Die erstellte Maske kann auch auf das Ursprungsbild ohne Laser angewandt werden. Die beiden ausgeschnittenen Bilder werden an den Algorithmus zum Finden der Laserlinie (Kapitel 2.5) weitergegeben. Abb. (18) zeigt das Ergebnis des Subtrahierens der Bilder. Zur Übersicht sind wieder die Koordinatenachsen eingetragen. Tatsächlich sind an diesem Punkt als Ergebnis der Bildverarbeitung schon die Subpixel der Laserlinie bekannt. Subpixel sind schwierig in einem Bild darzustellen, deshalb wurde sich für das Zeigen des Zwischenschritts entschieden.

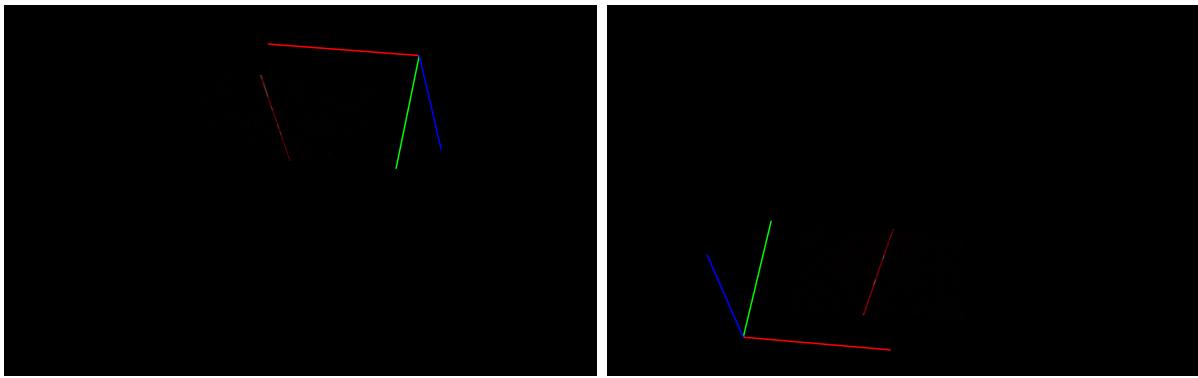


Abbildung 18: Herausgearbeitete Laserlinien

Der Scale – Factor

An diesem Punkt kommt es zum Einsatz der Formel (1) für die 3D-Weltkoordinaten. Wie in den Kapitel 2.4.1 angemerkt, ist der Scale-Factor noch eine Unbekannte, die gefunden werden muss. Ohne sie wäre die Gleichung noch nicht lösbar. Dieses Problem kann wie folgt umgangen werden. Das Weltkoordinatensystem wird auf das ChArUco-Board gelegt. Die Laserlinie liegt ebenfalls genau auf dem Board. Das bedeutet, dass die Z-Koordinate der Laserlinien-Punkte 0 ist. Zu sehen ist das auch in Abb. (18). Die Laserlinie liegt in der XY-Ebene. Die Z-Koordinaten der Weltkoordinatenpunkte müssen 0 sein. Mit dem Ausgangspunkt von Gleichung (3) folgt daraus diese Umstellung:

$$p_w = s \vec{a} - \vec{b}$$

das entspricht :

$$\begin{aligned} x &= s a_x - b_x \\ y &= s a_y - b_y \\ z &= s a_z - b_z \end{aligned} \tag{10}$$

mit $z = 0$:

$$\begin{aligned} 0 &= s a_z - b_z \\ s &= \frac{b_z}{a_z} \end{aligned}$$

Damit ist die Basistransformationsgleichung lösbar und die 3D-Punkte können errechnet werden. Um nun eine Ebene in die Punkte zu legen, müssen sich alle Punkte in einem einheitlichen Koordinatensystem befinden. Durch die bekannten Transformationen ist dies jedoch kein Problem. Zuerst werden mit (4) und der eigene Rotation und Translation die Weltpunkte der unteren Laserlinie in das Kamerakoordinatensystem transformiert. Danach wird (5) genutzt, um mit der Rotation und Translation der oberen Laserlinie die

Punkte in das obere Koordinatensystem zu bringen.

Das Bestimmen der Ebenengleichung

Mit dem letzten Schritt wird die gesuchte Ebenengleichung gefunden. Alle Vorbereitungen sind abgeschlossen. Die richtigen Punkte der zwei nicht parallelen Laserlinien sind in einem einheitlichen Koordinatensystem. Im letzten Schritt muss in diese Punkte eine Ebene gefittet werden. Der Ebenen-Fit wird über die Singular Value Decomposition (SVD) oder auch Singulärwertzerlegung realisiert [vgl. 11, S. 349 ff]. Sie ist über die Numpy-Bibliothek in Python implementiert und nutzbar. Die Singulärwertzerlegung wird auf die Punkte angewandt und zerlegt diese in drei Matrizen. Diese beschreiben die am besten passende Lösung zu den übergebenen Punkten. Die erste dieser Matrizen ist per Definition eine orthogonale $n \times n$ -Matrix, wobei n die Dimension ist, in der sich die Punkte befinden. Da diese im dreidimensionalen Raum sind, erhält man eine 3×3 -Matrix. Diese Matrix besteht aus drei Vektoren. Die ersten beiden Spalten-Vektoren spannen die Ebene auf, die am besten zu den übergebenen Punkten passt. Da alle Vektoren in der Matrix orthogonal zueinander sind, liegt der letzte Vektor der Matrix orthogonal auf der Ebene. Damit entspricht der dritte und letzte Vektor der Matrix dem Normalenvektor (\vec{n}) auf der gesuchten Ebene. Mit dem bekannten Normalenvektor kann eine Ebenengleichung als Koordinatenform ermittelt werden.

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \quad (11)$$

Um D zu erhalten, wählt man ein zufälligen Punkt aus den Laserlinien-Punkten aus. Dieser wird dann für x , y und z eingesetzt und D kann errechnet werden. Damit ist das Finden der Laser-Ebene abgeschlossen.

3.2. Das Erzeugen einer Punktewolke

Mit Beendigung von diesem Schritt ist die komplette Kalibrierung des Lasertriangulationssensors beendet. Bekannt ist nun die Laserebene. Mit Aufnahme der Laserlinie von einer Oberfläche kann nun eine Punktewolke erzeugt werden.

3.2.1. Die 3D-Koordinaten

Das Erzeugen der Punktewolke fängt ähnlich an, wie die extrinsische Kalibrierung. Die Grundlage sind wieder zwei Bilder. Aus diesen zwei Bildern werden die Laserlinien-Subpixel nach Kapitel 2.5.4 errechnet. Diese Pixel werden mithilfe der Ebenengleichung in die tatsächlichen 3D-Punkte aus Sicht des Kamerakoordinatensystem umgewandelt. Grundlage sind wieder die Transformationen aus Kapitel 2.4.1. Bei der extrinsischen Kalibrierung konnte der Scale-Faktor (s) nur mit der Annahme errechnet werden, dass die resultierenden Punkte in der X-Y-Ebene mit einer Z-Koordinate gleich 0 liegen. Diese Annahme gilt hier nicht mehr. Sicher ist jedoch jetzt, dass die Punkte in der gefundenen Ebenen-Gleichung liegen. Damit gibt es eine vierte geltende Gleichung und alle Unbekannten können errechnet werden. Die folgende Umstellung erläutert die geltenden Gleichungen. Die Ausgangsbasis ist erneut:

$$p_w = s \vec{a} - \vec{b}$$

das entspricht :

$$\begin{aligned} x &= s a_x - b_x \\ y &= s a_y - b_y \\ z &= s a_z - b_z \end{aligned} \tag{12}$$

für die Ebenengleichung gilt :

$$0 = Ax + By + Cz + D$$

Der ausschlaggebende Wert ist der Scale-Faktor. Dieser kann über ein Einsetzen der Koordinaten in die Ebenengleichung bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 0 &= A(s a_x - b_x) + B(s a_y - b_y) + C(s a_z - b_z) + D \\
 0 &= s A a_x - A b_x + s B a_y - B b_y + s C a_z - C b_z + D \\
 0 &= s A a_x + s B a_y + s C a_z - A b_x - B b_y - C b_z + D \\
 0 &= s(A a_x + B a_y + C a_z) - (A b_x + B b_y + C b_z) + D \\
 \vec{n} &= \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \\
 0 &= s(\vec{n} \cdot \vec{a}) - (\vec{n} \cdot \vec{b}) + D \\
 s &= \frac{\vec{n} \cdot \vec{b} - D}{\vec{n} \cdot \vec{a}}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Der Scale-Faktor ist damit bekannt und die Koordinaten x, y und z können bestimmt werden. Wichtig hierbei ist, dass die Ebenengleichung in einem Weltkoordinatensystem liegt. Dementsprechend müssen die errechneten 3D-Punkte mit der bekannten Transformation (4) von dem Weltkoordinatensystem zum Kamerakoordinatensystem transformiert werden.

3.2.2. Das Finden der Farbinformationen

Zusätzlich gefordert zu den reinen 3D-Informationen waren auch Farbinformationen. Diese können ebenfalls über das grundlegende Bild-Paar gefunden werden. Das Bild, welches ohne das Einschalten des Lasers aufgenommen wird, beinhaltet die gesuchten Farbinformationen. Gesucht wird nur nach der Farbe an der richtigen Stelle. Die Pixel-Werte der Laserlinie sind bekannt. In dem Ursprungsbild muss an genau der Stelle, an der sich ein Laserpixel befindet die Farbe ausgelesen werden und für den jeweiligen Punkt abgespeichert werden. Problem hierbei ist, dass die Laserpixel Subpixel sind und sich demnach zwischen zwei Pixeln befinden. Für die endgültige Farbe werden dann die zwei umrandenden Pixel gewichtet zusammengerechnet.

Die Abb. (19) zeigt den Vorgang an einem simplen Beispiel für ein Subpixel in einer beliebigen Reihe (y-Wert) mit einem beispielhaften x-Wert von 11,4. Der nähere Pixel (11) fließt mit höheren Gewicht in die resultierende Farbe ein, als der Pixel weiter weg (12). Die y-Werte der Pixel können keinen ungeraden Wert beinhalten, da der Algorithmus zum Finden der Laser-Pixel (Kapitel 2.5.4) jede Pixel-Zeile im Bild durchläuft und dort einen neuen x-Wert errechnet.

Dieser komplette Vorgang transformiert genau eine aufgenommene Laserlinie in eine

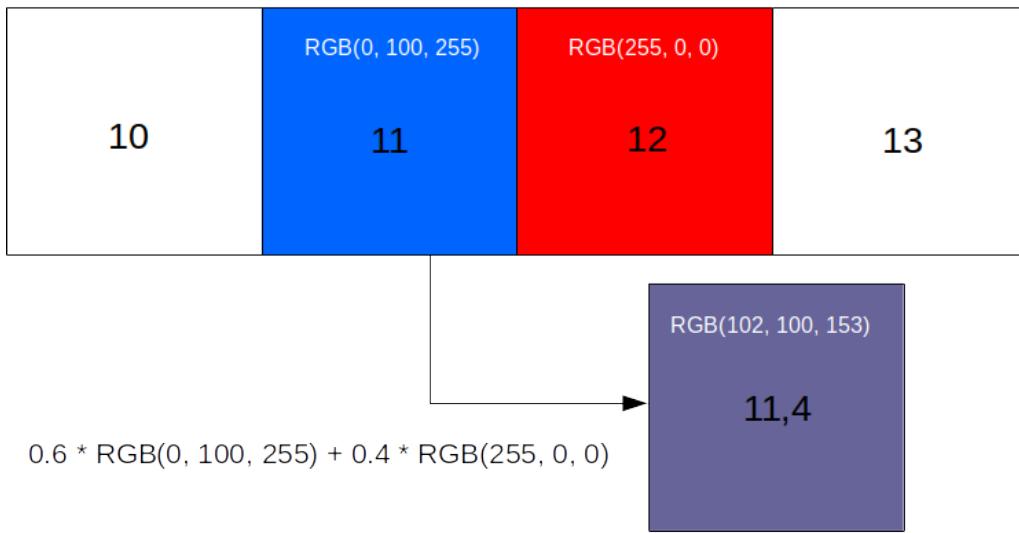


Abbildung 19: Gewichtete Pixel für den x-Wert 11,4

Punktewolke. Um eine ganze Oberfläche zu rekonstruieren muss sich die Position des Sensors um eine bekannte Länge und Richtung verschieben. Die neue Punktewolke, die aus der neu aufgenommenen Laserlinie resultiert, muss dann entsprechend zu einer Gesamt-Punktewolke ergänzt werden. Um die neuen Punkte korrekt einzufügen, ist es zwingend erforderlich, dass die Bewegung genau bekannt ist.

3.3. Aufbau - Hardware

Für den Lasertriangulationssensor wurde verschiedene Hardware verwendet. Diese soll im Folgendem beschrieben werden. Dabei gibt es zwei verschiedene Abschnitte zu betrachten. Zum einen der Lasertriangulationsensor an sich, der nur in der Lage ist eine Laserlinie in eine Punktewolke umzusetzen. Zum anderen wurde ein Versuchsaufbau angefertigt, um ein Objekt unter dem Sensor entlang zu bewegen. Dabei soll der Sensor regelmäßig eine Punktewolke erstellen. Die zusammengefügte Punktewolke ist dann die Aufnahme der Oberfläche.

3.3.1. Hardware-Aufbau des Lasertriangulationssensors

Die Hardware des Lasertriangulationssensor besteht grundsätzlich aus einer Kamera und einem Laser.



Abbildung 20: Der Lasertriangulationssensor

Für die Kamera wurde die Basler a2A1920-160ucPRO verwendet. Dabei handelt es sich um eine Industriekamera mit einer Auflösung von 1920 x 1200 Pixeln. Sie ist eine Farbkamera und kann bis zu 164 Bilder pro Sekunde aufnehmen. Die Spezifikationen sind gemäß [vgl. 3] angeben. Wichtig ist, dass die Kamera über USB 3.0 angesprochen werden kann. So kann sie über Software auf einem PC oder ähnlichem angesteuert werden. Mit dem Software-Paket Pylon liefert Basler eine eigene Umgebung um die Kamer zu benutzen und einzustellen. Zusätzlich wird mit Pypylon eine Pythonbibliothek gestellt. Diese gilt als Schnittstelle zwischen Kamera und Python. So kann über direkten Python-Code die Kamera eingebunden werden.

Das zweite Bauteil ist der Laser. Dabei handelt es sich um einen herkömmlichen roten Laser. Der Lichtstrahl des Lasers wird durch diffraktive optische Elemente (DOE) zu einer Linie geformt. Wie in Abb. (20) gezeigt, werden dann Kamera und Laser an eine Halterung in entsprechender Position befestigt.

3.3. Aufbau - Hardware

Die Kamera hat ein ansteuerbares Output-Signal. Dieses Signal kann genutzt werden, um den Laser direkt anzusprechen. Dabei wird ein MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) verwendet. So kann das Output-Signal angesprochen werden, um über den MOSFET den Strom des Lasers an und aus zu stellen. Es ist damit möglich, für die Kamera selbst einen Ablauf zu definieren, in dem sie zuerst ein Bild aufnimmt, dann den Laser anschaltet und anschließend ein zweites Bild aufnimmt. Zuletzt muss der Laser wieder ausgeschaltet werden. So werden von der Kamera die geforderten Bildpaare aufgenommen. Mit Pypylon können diese Bilder in Python und mit OpenCv weiterverwendet werden.

3.3.2. Der Versuchsaufbau

Das Ziel des Versuchsaufbau ist es, Bewegung in die aufgenommene Szene zu bringen. Dabei soll die zurückgelegte Bewegung zwischen den Aufnahmen der Oberfläche bekannt sein. So kann die neue Punktewolke der Laserlinie passend angefügt werden. Andernfalls würde man immer den Querschnitt der aktuellen Oberfläche an der Position des Lasers beobachten. Die einfachste Möglichkeit das zu realisieren ist, wenn sich die Szene in genau eine definierte Richtung mit genauen definierten Abstand bewegt. Dazu wurde eine Linear-Führung benutzt. Diese funktioniert über ein Schrittmotor und bewegt eine Fläche mit einer linearen Bewegung. Der Schrittmotor kann dabei genau angesprochen werden und das Objekt um in unseren Fall genau einen Millimeter weiterschieben. Die Linear-



Abbildung 21: Der Lasertriangulationssensor

Führung stammt aus einem 3D-Drucker. Die Software des Lasertriangulationsensor muss die Steuerung des Schrittmotors ansteuern können. Dieser wird über eine CNC-Steuerung mit Arduino und GRBL-Software angesprochen. Der Arduino ist der Mikrocontroller.

Die CNC-Steuerung übernimmt das Ansteuern des Motors. Dazu gibt es ein geeignete Erweiterungsplatinen für einen Arduino, sogenannte CNC-Shields. Damit Arduino und CNC-Shield miteinander kommunizieren können, wird die Open-Source-Software GRBL verwendet. So können Befehle des Arduino über GRBL und der CNC-Steuerung für den Schrittmotor lesbar sein. Mit diesem Aufbau kann über die Bibliothek *serial* in Python

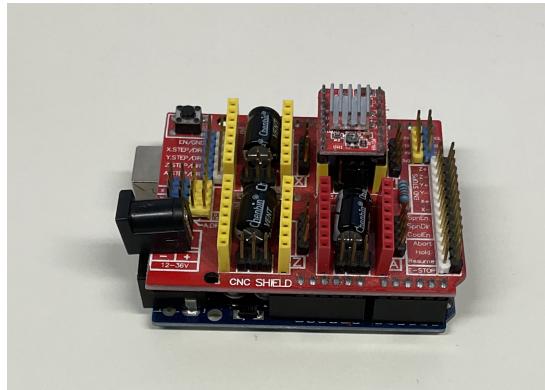


Abbildung 22: Arduino mit CNC-Shield

eine sogenannte „Serial Connection“ aufgebaut werden. Damit kann direkt über ein USB-Anschluss auch der Motor angesprochen werden. Über die Serial Connection werden dann GRBL-Befehle an den Motor gesendet. Diese sind einfache Befehle wie „Startposition festlegen!“, „1mm bewegen“ oder „Zur Startposition zurückkehren!“.

3.4. Aufbau - Software

Die Software des Lasertriangulationssensor gliedert sich in zwei Bereiche. Zum einen wurde eine Python-Bibliothek entwickelt. Diese wurde objektorientiert mit diversen Klassen, die den Lasertriangulationssensor repräsentieren entwickelt. Grundlegende Aufgabe der Python-Bibliothek sind die elementaren Berechnungen, um eine Punktwolke aus einem Bild-Paar zu erhalten. Das bedeutet, dass ein Konstrukt erstellt werden kann, welches mit der Eingabe eines Bildpaars eine Punktwolke liefert.

Der andere große Bereich ist die Umsetzung in ROS2. ROS2 liefert das Betriebssystem des Scanners. Alle verschiedenen Elemente sollen zu einem Gesamtprodukt zusammengefügt werden. Dazu gehört die Ansteuerung der Kamera und des Lasers. Schwerpunkt ist auch die Kommunikation zwischen einzelnen Elementen. Beispiele sind dabei das Aufnehmen der Bilder für die Kalibrierung oder das Erstellen der Punktwolke und die Weiterleitung an die entsprechenden Methoden aus den Klassen der Python-Bibliothek.

3.4.1. Python (Bibliothek)

Die Python-Bibliothek besteht grundlegend aus vier Klassen. Die Scanner-, Kamera-, Laser-, und LaserLine-Klasse. Dabei ist die Scanner-Klasse die volle Repräsentation des Lasertriangulationssensors, die in ROS2 eingebunden wird.

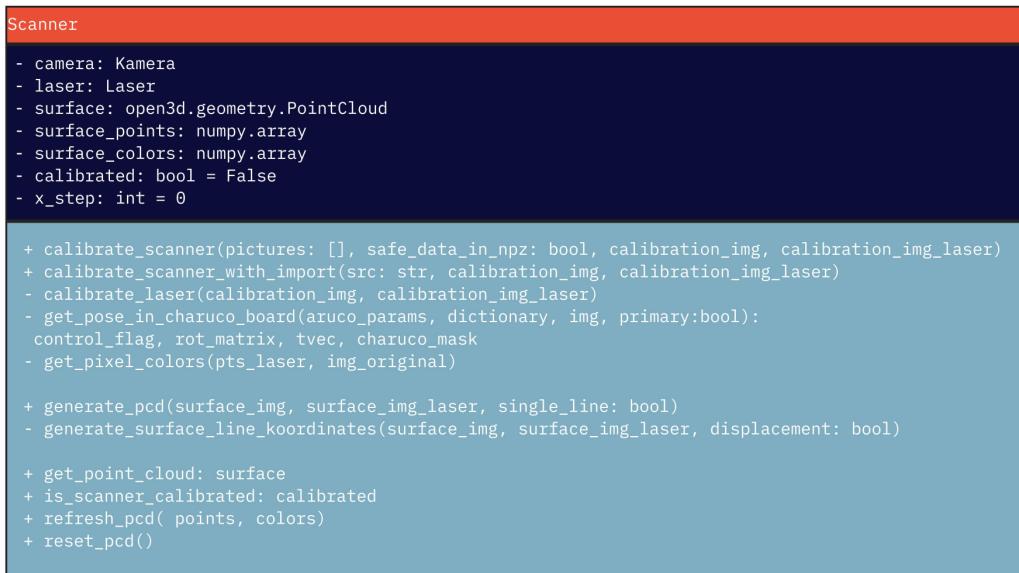


Abbildung 23: Die Scanner-Klasse als UML-Diagramm

Der Scanner beschreibt den Lasertriangulationssensor. Er besitzt eine Kamera und einen Laser. Zusätzlich wird als Variable die Punktwolke der Oberfläche und auch direkt deren Punkte und Farben abgespeichert. Hinzu kommt ein Boolean-Flag um zu kennzeichnen,

ob der Scanner kalibriert ist. Der xStep ist für den Versuchsaufbau wichtig. Über die Liniarführung wird das Objekt in x-Richtung unter dem Sensor durch bewegt. Die jeweiligen Millimeter-Schritte müssen entsprechend einbezogen werden. Dazu wird diese Variable genutzt.

Zusätzlich stellt die Scanner-Klasse die grundlegenden Methoden, die die Funktionalität des Triangulationssensors widerspiegelt zur Verfügung. Diese umfassen zum einen das komplette kalibrieren des Scanners. Dazu wird eine Liste von Bildern für die intrinsische Kalibrierung und ein Bildpaar des ChArUco-Boards für die extrinsische Kalibrierung benötigt. Hinzu kommt eine abgewandelte Version der Kalibrier-Methode, in der die intrinsische Kalibrierung durch das Importieren der Kameradaten ersetzt wird. Zusätzlich gibt es eine Methode zum Erstellen einer Punktewolke. Sie bekommt ein entsprechendes Bildpaar von der Oberfläche übergeben und errechnet die Punktewolke. Wenn der Scanner sich gerade in einem Scanvorgang befindet, wird die neue Punktewolke entsprechend an die gesamte Punktewolke angehängt. Die Scanner-Klasse besitzt zusätzlich noch Hilfsmethoden, die Zugriff von außen auf den Scanner Status und die Punktewolke geben oder die Punktewolke selbst erneuern oder aktualisieren.

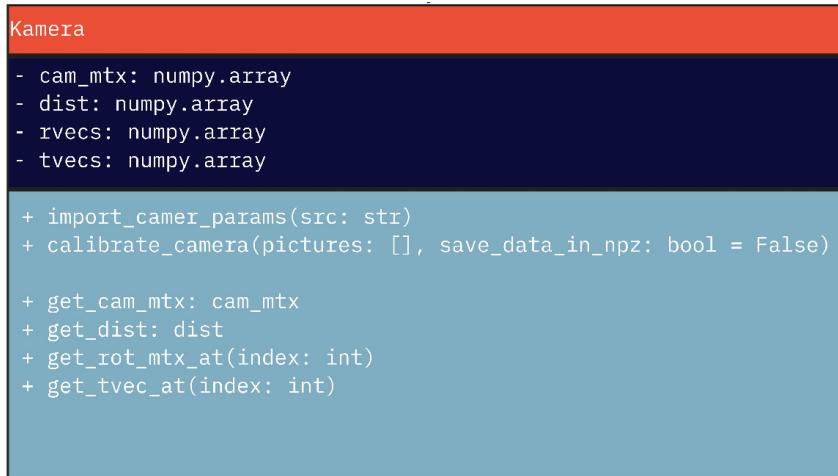


Abbildung 24: Die Kamera-Klasse als UML-Diagramm

Die Kamera besitzt ebenfalls eine Repräsentation in Form einer Klasse. Diese Klasse fungiert als Speicher für die Kameradaten. Gespeichert werden die Kamera-Matrix, die Distortion-Koeffizienten und die Rotationsmatrizen, sowie die Translationsvektoren der Bilder von der intrinsischen Kalibrierung. Also alle Daten, die aus der intrinsische Kalibrierung hervorgehen. Hierbei ist wichtig hervorzuheben, dass die Klasse keine Bilder aufnehmen kann bzw. keinen Zugriff auf die tatsächliche Kamera im Triangulationssensor hat. Sie ist lediglich für das Ablegen der Daten und die intrinsische Kalibrierung zuständig. Zusätzlich beinhaltet sie den Kalibrier-Algorithmus, um die Kameradaten zu erzeugen.

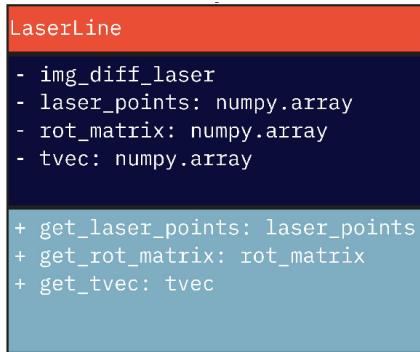


Abbildung 25: Die LaserLine-Klasse als UML-Diagramm

Die Klasse LaserLine beschreibt eine aufgenommene Laserlinie. Informationen, die als Variablen gespeichert werden, sind das Differenz-Bild, die errechneten 3D-Punkte der Linie und die entsprechende Rotation und Translation zu dem Weltkoordinatensystem, in dem sich die Laserlinie befindet. Zum Initialisieren der LaserLine-Klasse wird das aufgenommene Bildpaar und die Rotation und Translation zu dem jeweiligen Weltkoordinatensystem benötigt. Die Klasse errechnet zusätzlich im Konstruktor die Bild-Differenz und die Laserlinienpunkte.

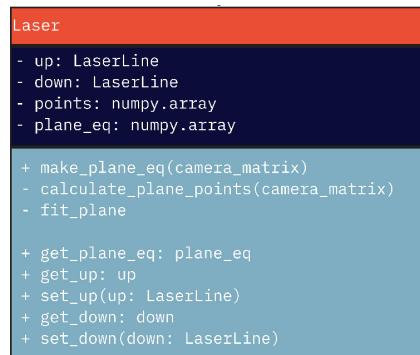


Abbildung 26: Die Laser-Klasse als UML-Diagramm

So, wie die Kamera-Klasse die Daten der intrinsischen Kalibrierung beinhaltet, beinhaltet die Laser-Klasse die Daten der extrinsischen Kalibrierung. Dazu benötigt sie zwei Laserlinien der Klasse LaserLine, die zur Unterscheidung als „oben“ und „unten“ definiert sind. Aus diesen kann die Ebenengleichung bestimmt werden. Dazu wird eine eigene Methode bereitgestellt, in der erst die Punkte in ein einheitliches Koordinatensystem zusammengefasst werden und darauf folgend dann eine Ebene an die Punkte gefittet wird. Die vereinheitlichten Punkte und die Ebenengleichung werden von der Klasse gespeichert.

```

Hilfsmethoden außerhalb der Klassen

# Transformationen
world2cam(pts, trans_vec, rot_matrix)
cam2world(pts, trans_vec, rot_matrix)
bild2world(pts, trans_vec, rot_matrix, cam_matrix plane = None)

# Plane-Fitting
plane_fit_with_svd(points)
plane_fit_with_pyransac3d(points)

# Berechnung der Subpixel
get_line_pixel(diff_img_laser)

```

Abbildung 27: Die Hilfsmethoden ohne Zugehörigkeit zu einer Klasse

Zusätzlich zu den vier beschriebenen Klassen gibt es Hilfsmethoden, die nicht konkret zu einer Klasse gehören. Das bedeutet, dass sie nicht nur von einer Klasse benutzt werden, sondern von verschiedenen Klassen an verschiedenen Stellen aufgerufen werden. Diese Methoden umfassen die Transformationen zwischen den Koordinatensystemen, die Methoden für das Plane-Fitting und die Berechnung der Subpixel aus einem Differenz-Bild.

Die gesamte Darstellung des UML-Diagramm befindet sich im Anhang unter A.1.

3.4.2. ROS2

Übergeordnet über der Python-Bibliothek befindet sich die ROS2-Implementierung. Damit wird letztendlich der Triangulationssensor bedient. Im Anhang unter A.2 wird die Umsetzung in ROS2 visualisiert dargestellt.

Mit ROS2 erstellt man sogenannte **Nodes**, die verschiedene Möglichkeiten bereitstellen, miteinander zu kommunizieren. Dazu gehören zum einen **Services**. Services sind am ehesten mit Methoden einer Klasse zu vergleichen, wobei dann die Nodes eine Klasse darstellen. Eine Node stellt ein Service bereit. Dieser kann aufgerufen werden und man erhält eine Antwort zurück. Der Triangulationssensor selbst ist auch über Nodes umgesetzt. Dabei sind die beiden ausschlaggebenden Nodes die Scanner-Node und die Kamera-Node. Die Scanner-Node enthält die vorgestellte Python-Bibliothek und damit eine Instanz von der Scanner-Klasse. Die Instanzen von der Scanner-Klasse selbst, also der Laser und die Kamera sind nach Initialisierung noch nicht mit Daten gefüllt. Das liegt daran, dass die Kalibrierung noch nicht stattgefunden hat. Dazu gibt es die Kamera-Node, die nun konkrete Bilder liefern kann. Die Kamera-Node hat Zugriff auf die Pypylon-Bibliothek und damit auf die Repräsentation der Basler-Kamera. Die Node beinhaltet eine Funktion, die das gewünschte Bildpaar liefert. Da der Linienlaser selbst über den Output der Kamera gesteuert wird, kann dieser auch direkt in der Kamera-Node angesprochen werden.

So stellt die Kamera einen Service bereit, der ein Bildpaar aufnimmt und dieses an den Scanner weiterleiten kann. Genauso stellt sie einen Service bereit, der mehrere Bilder aufnimmt und diese als Liste weiterleitet. Damit ist auch für die intrinsische Kalibrierung gesorgt.

Diese Kommunikation funktioniert in ROS2 über **Topics**. Topics beschreiben eine Nachricht. Eine Node hat die Möglichkeit eine Nachricht über ein gewähltes Topic zu veröffentlichen (publish). Ebenfalls gibt es die Möglichkeit, dass eine Node Nachrichten über ein gewähltes Topic empfängt (subscribe). Der Service der Kamera nimmt ein Bildpaar oder eine Liste an Bildern auf und veröffentlicht sie über das passende Topic. In der Kommunikation muss zusätzlich festgehalten werden, welchen Datentyp die Nachricht bzw. das Topic verwenden soll. In ROS2 wird das über einen **Message-Type** realisiert. Hierbei kann man selbst eine Message erstellen oder man benutzt Vorgefertigte, die von ROS2 bereitgestellt werden. Für ein Bild gibt es einen vorgefertigten Message-Type. Da jedoch zwei Bilder auf einmal geschickt werden sollen, wurde hier ein eigener Typ (img_pair.msg) erstellt. Ähnlich verhält es sich bei dem Schicken der Kalibrierungsbilder für die intrinsische Kalibrierung. Hier wird ein Message-Type erstellt, der eine Liste an Bildern beinhaltet (cam_calib_imgs.msg). Die Kamera nimmt demnach bei einem Aufruf des Services die Bilder auf und veröffentlicht sie über das jeweilige Topic. Der Scanner ist ein Subscriber zu diesem Topic und empfängt sie. Dabei wird in der Node eine Callback-Funktion aufgerufen, die auf dieses Empfangen reagiert. Der Scanner selbst speichert die für die Kalibrierung gesendeten Bilder erst einmal nur ab. Zusätzlich hat ein Service in ROS2 die Möglichkeit, ein Feedback zurückzugeben. Diese Möglichkeit wird hier genutzt, damit die Kamera zeigen kann, dass die Bilder erfolgreich aufgenommen und veröffentlicht wurden.

Die Scanner-Node stellt einen eigenen Service bereit, der den Scanner kalibriert. Dazu werden die Methoden, die die Scanner-Klasse bereitstellt genutzt. Überprüft wird hierbei, ob dem Scanner schon die benötigten Bilder bereitstehen. Falls das nicht der Fall ist, wird über die Antwort des Services darauf hingewiesen und der Aufruf des Services schlägt fehl. Andernfalls kann die Node den Scanner Kalibrieren und ein Scan kann gestartet werden.

In der ROS2-Implementierung gibt es noch zwei weitere Nodes. Zum einen wird ein Empfänger gebraucht, der entsprechende Ergebnisse des Scanners auch empfangen und benutzen kann. In diesem Fall werden von Scanner Punktewolken veröffentlicht. Das geschieht ebenfalls über ein Topic. Dabei ist der Message-Type des Topics ein von ROS2 vorgefertigter Typ, der Punktewolken beinhaltet. Benötigt demnach wieder eine Node, die ein Subscriber des Punktewolken-Topic ist. Dazu wird **Rviz2** benutzt. Rviz2 ist ein von ROS2 bereitgestellten Paket und dient zur Visualisierung. Die Funktionalität von Rviz2 ist sehr weitgehend. Die Hauptaufgabe von Rviz2 in diesem Projekt ist es, Subscriber

von dem Punktewolken-Topic zu sein. Die Empfangenen Punktewolken können hier dargestellt und dynamisch beobachtet werden.

Die vierte Instanz, die benötigt wird, sind sogenannte Clients. Es wurde schon öfters von Services und dem Aufrufen eines Service geredet. In ROS2 wird dafür ebenfalls eine Node benötigt, die den jeweiligen Service aufruft und das entsprechende Feedback erhält. In der Anlage unter A.2 werden die Client-Nodes als eine einzelne Node zusammengefasst. Intern wird für jeden Aufruf eines Services jedoch eine eigene individuelle Node generiert. Da diese allerdings alle den selben Zweck folgen, den bestimmten Service aufrufen und das Feedback ausgeben, wurden sie hier als eine einzelne Node zusammengefasst. Als Nutzer startet man die jeweiligen Clients, um das gewollte System zu starten. Voraussetzung dabei ist, dass die Service-Nodes, hier der Scanner und die Kamera, ebenfalls gestartet und aktiv sind. Diese werden genauso wie ein Client gestartet, nur dass sie selbst nicht aktiv etwas tun, es sei denn, der Service, den sie bereitstellen, wird aufgerufen oder ein Topic, von dem sie Subscriber sind, wird veröffentlicht. Sie warten also auf eine Interaktion. Die Client-Nodes sind dabei die Akteure, die eine Interaktion hervorrufen. Das Starten der Nodes ist in ROS2 über Konsolen-Skripts umgesetzt. Die wichtigen Skripts, die von einer gewissen Aktionskette gefolgt sind, sollen im Folgenden beschrieben werden. In A.2 wurden diese Skripts als Funktionen (Functions) benannt, da sie nicht einfach nur eine Node starten, sondern im ganzen System etwas zum Laufen bringen.

Vorgang bei der Kalibrierung des Lasertriangulationssensors

Die jetzt beschriebenen Vorgänge sind im Anhang unter A.3 in einem Sequenz-Diagramm visualisiert.

Der Scanner braucht für eine Kalibrierung Bilder für die intrinsische und für die extrinsische Kalibrierung. Da sich die Szene der Bilder ändert, findet zwischen den Kameraaufnahmen keine Automatisierung statt. Das bedeutet, dass manuell zuerst die Bilder-Liste der intrinsischen Kalibrierung und das Bild-Paar der extrinsischen Kalibrierung von der Kamera geschickt werden muss, bevor die Kalibrierung selbst erfolgen kann. Welche Aufnahme zuerst ausgeführt wird, ist dabei nicht wichtig. In A.3 wird zuerst die Funktion `intr_calib_imgs` aufgerufen. Diese startet einen Client, der den Service der Kamera `send_cam_calib_imgs` aufruft. Die Kamera-Node benutzt daraufhin ihre Funktion zum Aufnehmen der Kalibrierbilder. Der Benutzer muss dann für jedes Bild das Schachbrett in einer anderen Position vor die Kamera halten. Die Kamera-Node veröffentlicht die Bild-Liste und schickt ein positives Feedback an den Client zurück. Der Client gibt das Feedback in der Konsole aus und ist damit fertig. Die Node hört somit auf zu existieren. Der Scanner reagiert auf das Veröffentlichen der Bilder und speichert sie ab.

Der selbe Vorgang passiert bei der Funktion `extr_calib_imgs`. Der Unterschied be-

steht darin, dass der Client ein anderen Service (`send_laser_calib_imgs`) aufruft. Der Benutzer muss hier das Kalibrier-Brett mit dem ChArUco-Board vor die Kamera halten.

Der Scanner ist nun im Besitzt der benötigten Bilder. Mit der Funktion `calibrate` wird ein Client gestartet, der den Service `calibrate_laser` der Scanner-Node aufruft. Das veranlasst die Scanner-Node dazu, die Funktion `calibrate_scanner()` der internen Scanner-Klasse aufzurufen. Für die Visualisierung und zum Überprüfen erstellt die Scanner-Node eine Punktewolke, die die Laserebene darstellt und veröffentlicht sie über ein Topic. Über Rviz2 kann dann das Ergebnis der Kalibrierung angesehen werden.

Vorgang des Scannen

Die jetzt beschriebenen Vorgänge sind im Anhang unter A.4 in einem Sequenz-Diagramm visualisiert.

Nachdem der Scanner kalibriert ist, kann ein Scann-Vorgang, zugeschnitten auf den Versuchsaufbau vorgenommen werden. Hierbei wird kein konkreter Service der Scanner-Node benutzt. Die Scanner-Node weiß viel mehr, dass das gesendete Bild-Paar von der Oberfläche aufgenommen wurde und eine Punktewolke errechnet werden soll. Das verwendete Topic (*ImgPair*) hat einen Message-Type, der zwei Bilder beinhaltet. Dieser kann somit sowohl für die extrinsische Kalibrierung, als auch für ein Bildpaar von der Oberfläche genutzt werden. Hier wurde ein Boolean-Flag eingebaut, das zeigt, ob das Bild-Paar für die Kalibrierung oder zur Oberflächenrekonstruktion benutzt werden soll. Somit weiß die Scanner-Node genau, wie sie weiterzuarbeiten hat. Falls die Scanner-Node ein Bildpaar zur Oberflächenrekonstruktion erhält, aber nicht kalibriert ist, wird der Fehlerfall mit einer entsprechenden Warnung behandelt.

Die Funktion `start_scan` starten einen Client, der zum Anfang der Scanner-Node über das Topic `ScannerStatus` signalisiert, dass sie sich jetzt im laufenden Scan befindet. Der Scan startet damit, dass der Service `send_img_pair_surface` der Kamera aufgerufen wird. Die Kamera nimmt ein Bild-Paar auf und veröffentlicht es. Der Scanner reagiert darauf, in dem er das Bildpaar in eine Punktewolke umsetzt. Diese wird dann ebenfalls veröffentlicht und in Rviz2 dargestellt. Mit dem Senden des Bild-Paares schickt die Kamera ein positives Feedback an den Client zurück. Der Client signalisiert dann der Serial-Connection über die Sprache Grbl, dass sich die Linearführung um einen Millimeter bewegen soll. Danach wiederholt sich der Vorgang mit dem Aufrufen des Services der Kamera. Dabei bestimmt der Client wie oft sich der Vorgang wiederholt. Im Versuchsaufbau bewegt sich die Linear-Führung 290mm, somit wird der Vorgang 290 mal wiederholt. Die Scanner-Node selbst zählt auch mit, wie oft ein Bild-Paar veröffentlicht wurde und rechnet die Verschiebung mit ein. Die aktualisierte Punktewolke wird dabei immer selbst

neu veröffentlicht und in Rviz2 aktualisiert.

Nachdem alle Wiederholungen durchgeführt wurden, signalisiert der Client der Scanner-Node, dass der Scan fertig ist. Daraufhin wird der Scanner die finale Punktwolke in einem (.ply)-File speichern und dann die intern gespeicherte Punktwolke auf null setzen. Damit ist er bereit für einen erneuten Scan und behält seine Kalibrierung bei.

3.5. Qualitative Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen qualitative Ergebnisse von einem Scan-Vorgang gezeigt werden.

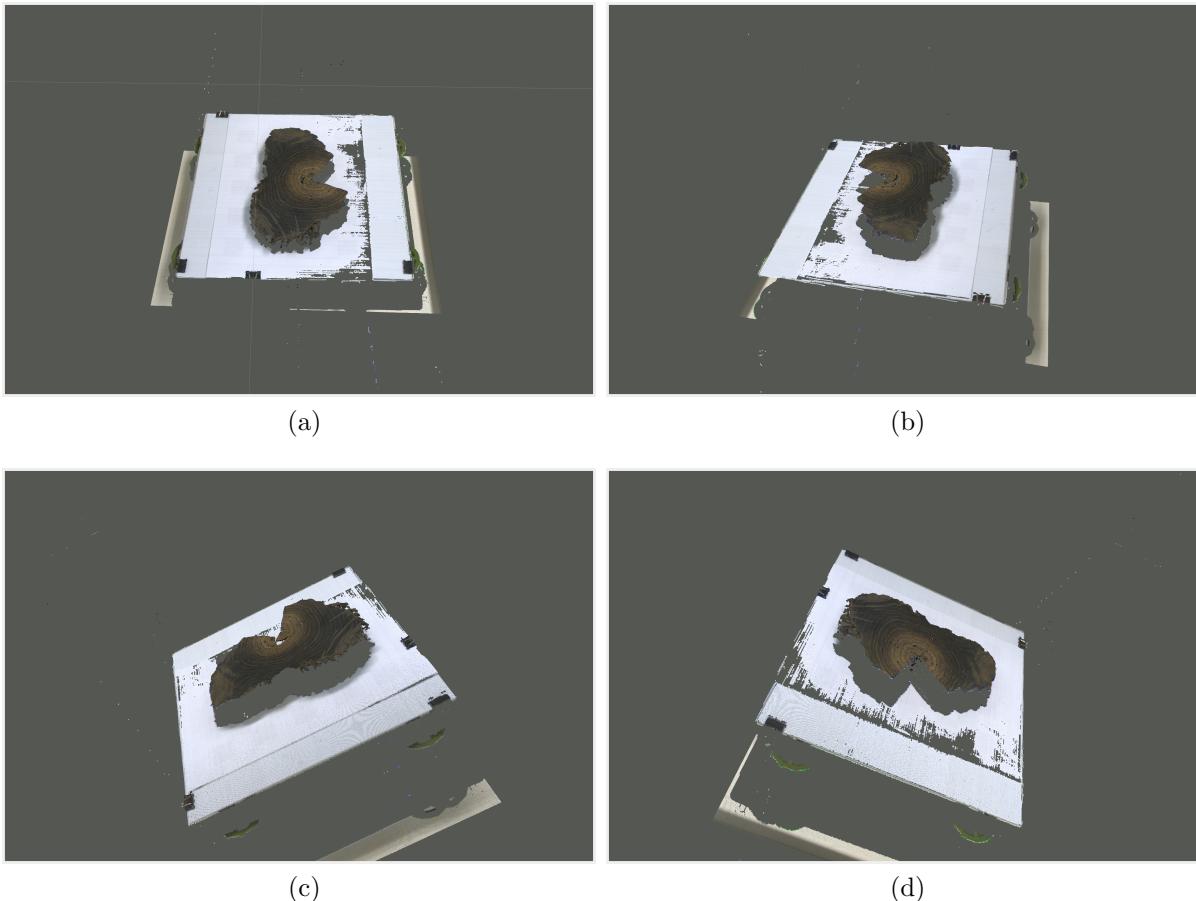


Abbildung 28: Schachbrett-Kalibrierung mit dem Schachbrett aus verschiedenen Positionen

Die aufgenommenen Bilder stammen aus Rviz2. Im Anhang unter A.5 befinden sich weitere Aufnahmen, in dem der Scan näher betrachtet wird. Dabei kann man genau die einzelnen Linien erkennen, die zusammengefügt die komplette Oberflächenrekonstruktion ergeben.

4. Evaluation

Der Lasertriangulationssensor wurde nun komplett vorgestellt. Es soll nun eine Evaluation folgen. Dabei wird zuerst eine Methode vorgestellt, die die Genauigkeit eines Scan berechnen kann. Nachdem werden zusätzlich aufgekommene Probleme und Schwierigkeiten erläutert.

4.1. Testen von Genauigkeit

Ziel ist es die aufgenommene Punktewolke zu testen. Dazu muss das „Ist“ mit einem „Soll“ verglichen werden. Hierbei ist es schwierig ein „Soll“ für einen beliebigen Scan zu finden. Für beispielsweise Aufnahmen von einem Holzstück oder andere Figuren müsste dann im vornherein schon ein genaues 3D-Modell vorliegen. Daraus ergibt sich, dass zum Vergleichen ein bekanntes Objekt gewählt werden muss. Grundsätzlich soll die relative Genauigkeit der Punkte ermittelt werden. Damit ist gemeint, wie genau die Punkte zueinander liegen. Die genaue Position im Raum ist erst einmal unabhängig zu betrachten. Eine gängige Methode dafür ist, das gescannte Objekt in die Punkte des Scans zu fitten und diese am besten zu den Punkten passende Version als „Soll“ zu verwenden [vgl. 5] [vgl. 20]. Dabei ist es notwendig, eine Form zu wählen, die sich in Punkte fitten lässt. Am naheliegendsten sind dabei geometrische Formen, wie zum Beispiel eine Ebene, eine Linie oder auch eine Kugel. Genau diese drei Formen wurden auch hier zur Genauigkeitsbestimmung gewählt. Ausgehend von einer Ebene ist die Vorgehensweise demnach, ein Scan einer planaren Fläche durchzuführen. In der gescannten Punktewolke wird dann eine *Region of Interest* (ROI) definiert. Da durch den Versuchsaufbau auch einzelne Objekte links und recht der Linear-Führung aufgenommen werden (siehe 3.5), muss die Punktewolke etwas zugeschnitten werden. In die resultierende Punktewolke, die nur noch die planare Fläche abbildet, wird dann, ähnlich wie in Kapitel 3.1.2 das Finden der Laser-Ebene, eine perfekt passende Ebene gefittet. Diese wird als „Soll“ angesehen. Der eigentliche Vergleich findet dann statt, indem die Abstände der einzelnen Punkte zu der „Soll“-Ebene errechnet werden. Der Durchschnitt dieser Abstände ist der *Root Mean Squared Error* (RMS-Error). Dieser wird als Genauigkeitsindikator verwendet. Dieselbe Methode wurde auch für eine einfache Linie und eine Kugel genutzt. Um eine höhere Genauigkeit der Messung zu erlangen, wird für eine bestimmte Szene dreimal ein Scan durchgeführt. Die gewollte Form wird dann über den Least-Squares-Algorithmus in die Punkte gefittet. Sobald das geschehen ist, können die Abstände der Punkte zu der Form berechnet werden. Hierbei beträgt die Distanz von dem Sensor zu dem Scan-Objekt 0,5 Meter.

Der erste Versuch ist mit einer Linie unternommen worden. Dazu wurde eine einzelne

4.2. Bewertung

Laserlinie von einer geraden Fläche aufgenommen.

Messung	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Durchschnitt
RMS Error	74,69 μm	85,75 μm	82,05 μm	80,83 μm

Tabelle 1: Messungen einer Linie

Die zweite Messung betrachtet eine Ebene. Der Versuchsaufbau selbst bietet dazu gute Möglichkeiten, da die Grundlage der Linear-Führung eine planare Grundlage ist. Diese wird in einem kompletten Scan-Ablauf aufgenommen. Die ROI ist dann eine zugeschnittene Punktewolke, in der nur noch die planare Grundlage dargestellt ist. In diese kann dann eine Ebene gefittet werden. Dieser Ablauf wird im Anhang A.6 in der Abb. (34) gezeigt.

Messung	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Durchschnitt
RMS Error	121,92 μm	121,59 μm	113,37 μm	118,96 μm

Tabelle 2: Messungen einer Ebene

Für die dritte Messung wurde eine Kugel benutzt. Der Unterschied zu den vorherigen Messungen ist, dass hier die tatsächliche Größe des Objektes mit evaluiert wird. Beim Fitten einer Kugel wird der Radius ausgegeben. Die verwendete Kugel hat einen Radius von 5 cm. Diese 5 cm sollten sich auch in der optimal gefitteten Kugel widerspiegeln. Zusätzlich wird der RMS Error berechnet. In Anhang A.6 wird in der Abb. (35) der Vorgang eines Scans der Messung gezeigt.

Messung	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Durchschnitt
RMS Error	356,08 μm	354,62 μm	339,45 μm	350,05 μm
Radius	4,80014 cm	4,80705 cm	4,80895 cm	4,80538 cm

Tabelle 3: Messungen einer Kugel

An der durchgeführten Messung fällt auf, dass der Radius zu klein ist. Er ist zwischen 1 bis 2 Millimeter zu kurz. Der RMS Error für die gefittete Kugel ist jedoch im Vergleich zu den anderen Messungen in einem ähnlichen Mikrometer-Bereich. Die Varianz der Punkte um das „Soll“ ist also gering, jedoch ist die Kugel an sich zu klein. Dabei sind 1 bis 2 Millimeter bei einem Soll von 50 Millimetern ein vergleichsweise großer Fehler.

4.2. Bewertung

Die gemessenen Werte sollen nun bewertet werden, damit sie aussagekräftig sind. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass eine relative Genauigkeit der Punktewolken mit einem RMS Error von unter einem Millimeter für das Gesamtprojekt absolut ausreichend ist. Die Genauigkeit nimmt ab, je mehr Varianz in den zu scannenden Objekt ist. So ist der RMS Error bei

eine Linie am geringsten und bei der Kugel am höchsten. Es lässt sich also vermuten, dass sehr verformte und unebene Objekte einen größeren RMS Error aufweisen, als die hier durchgeführten Messungen. Jedoch soll der Scanner Holzscheiben einscannen. Diese weisen eine glatte Oberfläche auf. Um letztendlich eine Ablauf-Pfad für eine Kamera zu finden, wäre der entwickelte Lasertriangulationssensor ausreichend.

Für die im Gesamtprojekt alternativ verwendete RGB-D-Kamera „Intel RealSense d415“ kann ebenfalls der RMS Error errechnet werden [vgl. 8]. In [vgl. 10] und [vgl. 12] wurde neben vielen anderen Genauigkeits-Messungen der RMS Error für die „Intel RealSense d415“ gemessen und angegeben. Wobei hier immer eine Ebene als Messung benutzt wurde. Nach [vgl. 12] liegt der RMS Error der RealSense bei einer Distanz von 0,5 Metern bei 2 Millimetern. Das würde bedeuten, dass die hier entwickelte Methode eine höhere Genauigkeit aufweist. Hier sei jedoch hervorgehoben, dass sich die Methode der Oberflächenrekonstruktion zu den hier entwickelten Scanner grundsätzlich unterscheidet. Der RealSense ist es möglich, mit einer Aufnahme die ganze Szene in 3D-Koordinaten umzuwandeln. Dem Lasertraingulationssensor ist es nur möglich, den Querschnitt bzw. eine Laserlinie in 3D-Koordinaten zu übersetzen. Die Oberflächenrekonstruktion erhält man durch das Aneinanderreihen der unterschiedlichen Querschnitt-Aufnahmen. Das wurde mit den Versuchsaufbau umgesetzt.

4.3. Probleme und Schwierigkeiten

Bei der Entwicklung und beim Testen des Lasertriangulationssensors sind einige Probleme und Schwierigkeiten aufgetreten. Die Ausschlaggebenden sollen hier angesprochen werden.

Die Beleuchtung

Für das Erkennen der Farbinformation ist eine ausreichende Beleuchtung wichtig. Schnell passiert es, dass die Beleuchtung zu dunkel ausfällt und die Farben nicht gut erkennbar sind. Grundsätzlich ist das ein schnell behebbares Problem. Über Pylon kann die verwendete Basler-Kamera an die aktuelle Beleuchtung angepasst werden. Das Dilemma zum Thema der Beleuchtung ist viel mehr, dass je heller das Bild wird, um so weniger ist die Laserlinie erkennbar. An hellen Stellen, auch zu sehen bei den Qualitativen Ergebnissen in 3.5, wird die Laserlinie nicht mehr erkannt. Dort ist es so hell, das kein ausreichender Unterschied in der Differenz des Bildpaars auffindbar ist. Gerade in 28a und 28d ist dieses Problem eindeutig am Rand der Unterlage des Holzes zu sehen. Sobald man die Kamera etwas dunkler einstellt, werden die Farben des Holzes weniger gut erkannt. Es ist demnach notwendig, die Kamera immer an die aktuelle Beleuchtung anzupassen. Die Anpassung muss so eingestellt sein, dass der Laser gut erkannt wird und gleichzeitig

4.3. Probleme und Schwierigkeiten

die Farben gut erkennbar sind. Ein automatisches Einstellen der Kamera ist bisher nicht implementiert.

Änderung im Bildpaar

Der Lasertriangulationssensor ist sehr anfällig für jegliche Änderung der Szene, die zwischen den beiden Aufnahmen des Bildpaars stattfinden. Nach Plan darf sich hier nur das Einschalten des Lasers ändern. Falls sich etwas anderes in der Szene ändert, wird dies eindeutig in der Differenz der Bilder erkennbar sein. Da der Algorithmus immer bei der höchsten Intensität ansetzt, ist er grundsätzlich robust und wird den Punkt der Laserlinie wählen. Sobald der Unterschied größer ist, kommt es zu ausschlaggebenden Fehlern. Auch hier ist die Beleuchtung wieder eine Fehlerquelle. Die Kamera kann ein Lichtflackern aufnehmen, welches für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Sobald dann ein Bild heller oder dunkler ausfällt, erhält man ein fehlerhaftes Differenz-Bild.

Fehlerquellen im Versuchsaufbau

Als zusätzliche Fehlerquelle ist noch der Versuchsaufbau zu nennen. Die Möglichkeit den verwendeten Schrittmotor anzusteuern ist begrenzt. Hier ist es möglich, dem Schrittmotor den Befehl sich zu bewegen zu senden. Dabei gibt es kein Feedback, welches erhalten werden kann, sobald die Bewegung abgeschlossen ist. Die Ausführung des Codes muss aber warten, dass die Bewegung tatsächlich abgeschlossen ist. Sonst könnte es passieren, dass in der Ausführung der Triangulationssensor davon ausgeht, dass sich die Szene um einen Millimeter weiterbewegt hat, aber die eigentliche Bewegung ist noch nicht abgeschlossen. Die Ausführung und Ermittlung der Punktwolken ist dabei schnell genug, um zweimal innerhalb der Bewegung von einem Millimeter zu erfolgen. Der erste Fehler der hierbei passieren kann, ist, dass die Szene zwischen den Aufnahmen in Bewegung ist und dadurch das Differenz-Bild fehlerhaft ist. Der zweite Fehler ist, dass die Laserlinie in der resultierenden Punktwolke an falscher Position eingefügt wird. Für diese Fehlerquellen wurde der Versuchsaufbau schon so angepasst, dass im Code, nachdem der Befehl für die Bewegung gesendet wurde, eine Sekunde gewartet wird. So ist die Bewegung sicher abgeschlossen, bevor die nächsten Aufnahmen gemacht werden. Nachteil dadurch ist, dass der Scan vergleichsweise langsam aufgenommen wird. Trotzdem bleibt ein kleiner Fehler in der Position. Beim Anhängen der neuen Laserlinie wird genau ein Millimeter in x-Richtung aufaddiert. Hierbei ist ohne größeren Aufwand nicht überprüfbar, ob sich die Linear-Führung genau um einen Millimeter bewegt. Das hängt davon ab, wie genau der Schritt-Motor kalibriert ist. Die Varianz der Laserlinie ist gering und kann somit vernachlässigt werden. Es ist wahrscheinlicher, dass die Kalibrierung des Schritt-Motors für kleine Fehler verantwortlich ist. Diese Fehler können sich in der Oberflächenrekonstruktion

summieren und dazu führen, dass die gesamte Punktewolke in x-Richtung fehlerhaft ist. Hiermit wäre auch die der fehlerhafte Radius der gescannten Kugel erklärbar.

Spiegelung und schlechte Reflektion der Laserlinie

Für einen Lasertriangulationssensor ist grundlegend vorausgesetzt, dass die Laserlinie auf dem Objekt sichtbar ist. Das bedeutet, dass sie gut reflektiert wird. Wenn das nicht der Fall ist, kommt es zu Fehlern. Durchsichtige oder nicht reflektierende Oberflächen können vom Sensor nicht erfasst werden. Zu Fehlern kommt es auch, wenn sich das Laserlicht an einer Oberfläche spiegelt. Dadurch kann es passieren, dass rotes Licht an Stellen erscheint, die gar nicht zur eigentlichen Laserlinie gehören. Dieses Licht kommt von dem Laser selbst und ist somit im Differenz-Bild eindeutig erkennbar. Da alle erfassten Pixel des Lasers auf die Laser-Ebene gespannt werden, erscheinen diese fehlerhaften Stellen dann in der Oberflächenrekonstruktion über oder unter dem Objekt als Rauschen.

5. Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, Oberflächenrekonstruktionen von Objekten mit zusätzlichen Farbinformationen machen zu können. Dieses Ziel wurde erreicht. Eine Kamera und ein Laser bilden mit Software den Lasertriangulationssensor. Dies Kamera nimmt den Linienversatz der Laserlinie auf, der durch die unterschiedliche Höhe des Objektes entsteht. Der Sensor wird dann über das Objekt bewegt und die Oberfläche wird Schritt für Schritt rekonstruiert. Der wichtigste Vorgang ist die initiale Kamerakalibrierung. Durch sie wird die Funktionalität des Sensor gewährleistet und seine Genauigkeit bestimmt. Dabei wird eine Ebene in Form einer Ebenengleichung aus Sicht der Kamera erstellt. Diese stellt das Licht des Linienlasers dar. Durch die bekannte Laserebene können bei einem Scavorgang die Pixel des Lasers auf die Ebene gespannt werden. Dadurch findet sich die dreidimensionale Repräsentation des Pixels aus Sicht der Kamera. Eine Aufnahme bildet den Querschnitt des Objektes ab. Der Sensor bewegt sich über das Objekt und macht regelmäßig aufnahmen. Dadurch wird die komplette Oberfläche rekonstruiert.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass der Lasertriangulationssensor erwartungsgemäß gut funktioniert. Eine einzelne Laserlinie lässt sich mit hoher Genauigkeit als Punktewolke aus Kamerasicht rekonstruieren. Dabei ist die Anwendung mit ROS2 ausführbar. Die größte Fehlerquelle war der Versuchsaufbau selbst. Da nicht genau die Position der Linear-Führung herausgefunden werden kann, können die neuen Laserlinien nie perfekt zu der Gesamt-Punktewolke angefügt werden. Die Implementierung mit ROS2 ist jedoch sehr gut anpassbar. Für die Steuerung des Versuchsaufbau ist grundsätzlich nur der Client zuständig. Die Gesamt-Punktewolke wird vom Sensor selbst erstellt. In der aktuellen Implementierung werden die neuen Punkte immer um einen Millimeter in x-Richtung verschoben. Problem war dabei, dass nicht verifiziert werden kann, ob sich die Linear-Führung um genau einen Millimeter bewegt. Wenn man eine Änderung des Versuchsaufbau in Erwägung zieht, muss also der Client selbst und das Anfügen der neuen Punkte in der Scanner-Klasse angepasst werden. Sonst kann der Sensor problemlos weiterverwendet werden. Gerade die entwickelte Bibliothek in Python ist sehr robust. Natürlich ist diese an das verwendetet Kalibrierverfahren angepasst. Hier ist eine Anpassung aufwändiger. Dazu lässt sich jedoch sagen, dass die Genauigkeit einer einzelnen Linie sehr gut ist. Da die Genauigkeit direkt aus der Kalibrierung resultiert, muss im Umkehrschluss die Kalibrierung auch sehr erfolgreich sein.

Wichtig hervorzuheben ist, dass der entwickelte Sensor an sich immer nur eine einzelne Laserlinie in eine Punktewolke übersetzt. Herkömmliche RGB-D-Kameras können sofort eine ganze Oberfläche mit einer Aufnahme als Punktewolke liefern. Das liegt daran, dass RGB-D-Kameras zumeist über zwei bis drei Kameras verfügen. Zusätzlich benutzten sie

nicht nur eine Laserlinie, sondern ein ganzes Muster an beispielsweise Infrarot-Licht. Ein Beispiel dafür ist die „Intel RealSense d415“ selbst. Der hier entwickelte Lasertrainguulationsensor besitzt nur eine Kamera und arbeitet mit einer Laserlinie. Ausgabe ist also immer der Querschnitt des aktuellen Objektes. Trotzdem passt der Sensor damit immer noch zum Gesamtprojekt, die Automatisierung der Jahrringmessstation. Hier soll ein Roboterarm zum Einsatz kommen. Dieser Arm kann sich über das Objekt bewegen. Dabei können genau Befehle an den Arm gesendet werden, um zum Beispiel sich auch genau ein Millimeter zu bewegen. Hinzu kommt, dass bei einem Roboter die Transformationen von der eingebauten Kamera zu einem festgelegten Weltkoordinatensystem bekannt sind. Damit können die errechneten Punkte in das Weltkoordinatensystem transformiert werden und gleich ihren genauen Platz einnehmen. Der Versuchsaufbau, bestehend aus der Linear-Führung und den Arduino mit CNC-Shield ist nur zum Testen des Scannens einer kompletten Oberfläche entwickelt wurden. Das eigentliche Ziel ist jedoch die Anbringung des Sensors an einen Roboterarm. Dafür sind Anpassungen im steuernden Client und in dem Zusammenfügen der Punktewolke notwendig.

Intern läuft die Zusammenarbeit von ROS2 un der Python-Bibliothek problemlos. Für aufkommende Fehler wurde eine Weiterbehandlung eingebaut. Die hier gemeinten Fehler beziehen sich auf Aufnahmen der Kamera, die beispielsweise kein Schachbrett oder ChArUco-Board zeigen, aber zu Kalibrierung verwendet werden sollen, also allgemeine Fehler der Bildverarbeitung bei der Kalibrierung. Hierbei wird erkannt, ob eine erfolgreiche Kalibrierung mit den Aufnahmen durchgeführt werden konnte. Falls nicht, wird sie als fehlgeschlagen deklariert. Über das Feedback des aufgerufenen Kalibrier-Service erfährt dann der Benutzer, wo ein Fehler gefunden wurde. Zusätzlich wird bei einer vermeintlich erfolgreichen Kalibrierung die entstandene Laser-Ebene als Punktewolke an Rviz2 geschickt. So kann deren Richtigkeit vom Benutzer überprüft werden. Dabei werden auch die Bilder, die der Sensor zur Kalibrierung aufgenommen hat abgespeichert und können eingesehen werden. Somit erhält der Nutzer genug Informationen über den Erfolg der Kalibrierung.

6. Ausblick

Um entstandene Fehler und Schwierigkeiten zu umgehen oder zu beheben gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die erste und wichtigste Erweiterung ist es, den Versuchsaufbau anzupassen oder zu ersetzen. Das größte Problem ist die Umsetzung der neuen Position der Laserlinie in die richtige Position der digitalen Punktewolke. Momentan wird sich auf die Genauigkeit des verwendeten Schrittmotors verlassen. So geht man davon aus, dass sich die Linear-Führung um genau einen Millimeter bewegt, um diesen dann bei der neuen Punktewolke mit einzurechnen. Weniger fehleranfällig wäre eine Möglichkeit, die Verschiebung der Punkte zu berechnen. Dazu könnte man die Grundlage des Objektes auf der Linear-Führung mit einer von der Kamera erkennbare Markierung versehen. Das wäre beispielsweise ein ArUco-Marker. Durch die durchgeführte Kalibrierung ist es möglich, ein Koordinatensystem auf den Marker zu legen. Rotation und Translation sind dabei bekannt. Die Punkte der Laserlinie liegen dann in diesem Koordinatensystem, welches die Linear-Führung beschreibt. Als zusätzlicher Schritt müssen die Punkte dann in das Koordinatensystem transformiert werden, in dem die Ebene-Gleichung definiert ist. Alle restlichen Schritte sind bereits implementiert. Durch diese Anpassung wird die neue Punktewolke immer exakt angefügt. Die Länge der Schritte des Schrittmotors müssen dann nur so angepasst werden, dass das Objekt möglichst genau aufgenommen werden kann. Anforderungen an den Aufbau wären dann zusätzlich, dass der verwendete Marker immer auf jedem Bild erkennbar sein muss.

Grundsätzlich sollte aber das eigentliche Ziel sein, den Versuchsaufbau abzuschaffen und den Sensor an einen Roboterarm anzubringen. Die Bewegung ist ausgelagert und wird vom Client gesteuert. Dieser wird demnach auch die Steuerung des Roboterarms übernehmen. Hier muss der Client an das Gesamtprojekt angepasst werden.

Ein weiteres Problem ist die Beleuchtung. Hier könnte man nach Vorbild moderner RGB-D-Kameras eine zusätzliche Kamera verwenden. Somit ist eine Kamera für das Aufnehmen der Laserlinie zuständig und eine andere nimmt ein Bild für die Farbinformationen auf. Vorteil davon ist, dass beide Kameras für ihren eigenen Zweck angepasst und eingestellt werden können. Damit umgeht man das Dilemma, dass die Laserlinie schlechter erkennbar wird, um so heller die Oberfläche beleuchtet ist. Ein neu auftretendes Problem dabei ist, dass die beiden Kameras nicht an der selben Stelle montiert sind. Das bedeutet, dass es zu Fehlern der Farbe kommen kann, da die Positionen der Pixel in den Aufnahmen nicht unbedingt übereinstimmen. Dieses Problem kann behoben werden, indem man die bekannten Transformationen benutzt, um die möglichst genaueste Repräsentation eines errechneten 3D-Punktes als Pixel zu finden. Voraussetzung dafür ist die Kalibrierung beider Kameras. Alternativ zur zusätzlichen Kamera wäre die Aufnahme eines dritten Bildes.

Das Bildpaar zum Erkennen der Laserlinie behält seine Funktion bei. Hinzu kommt eine dritte Aufnahme, die unter besserer Beleuchtung aufgenommen wird. Dazu müsste man dem Aufbau eine passende Lichtquelle hinzufügen, vergleichbar mit dem Blitzlicht einer Kamera. Diese dritte Aufnahme wird dann über die herkömmliche Methode zum Finden der Farbinformationen weiterverwendet. Vorteil dieser Methode ist, dass der Scanner nun unabhängig von anderer Beleuchtung ist. Alles benötigte Licht wird nun vom Scanner selbst in einer definierten Helligkeit produziert.

Der bisherige Ausblick geht davon aus, dass die Methodik der Lasertriangulation mit einem Linienlaser beibehalten wird. Erwähnenswert sind hierbei Alternativen, wie Stereo Vision oder auch Time of Flight. Die Genauigkeiten eines Scanks mit diesen Methoden und ob diese zu dem Gesamtprojekt passend sind, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Grundsätzlich ist es sinnvoll, sich jedoch weiter im Bereich der Triangulation aufzuhalten, da Time of Flight ein sehr unterschiedlicher Ansatz ist, 3D-Informationen zu erhalten.

Die zugrunde liegende Aufgabe war es, eine 3D-Rekonstruktion eines Objektes mit Farbinformationen zu erhalten. Diese Aufgabe erfüllt der entwickelte Sensor ausreichend. Die 3D-Informationen werden aus Kameransicht geliefert. Mithilfe der Farbinformationen können passende Pfade zum Abfahren des Holzes ausgewählt werden.

A. Anhang

A.1. Anhang A



Abbildung 29: UML-Klassendiagramm des Lasertriangulationssensor

A.2. Anhang B

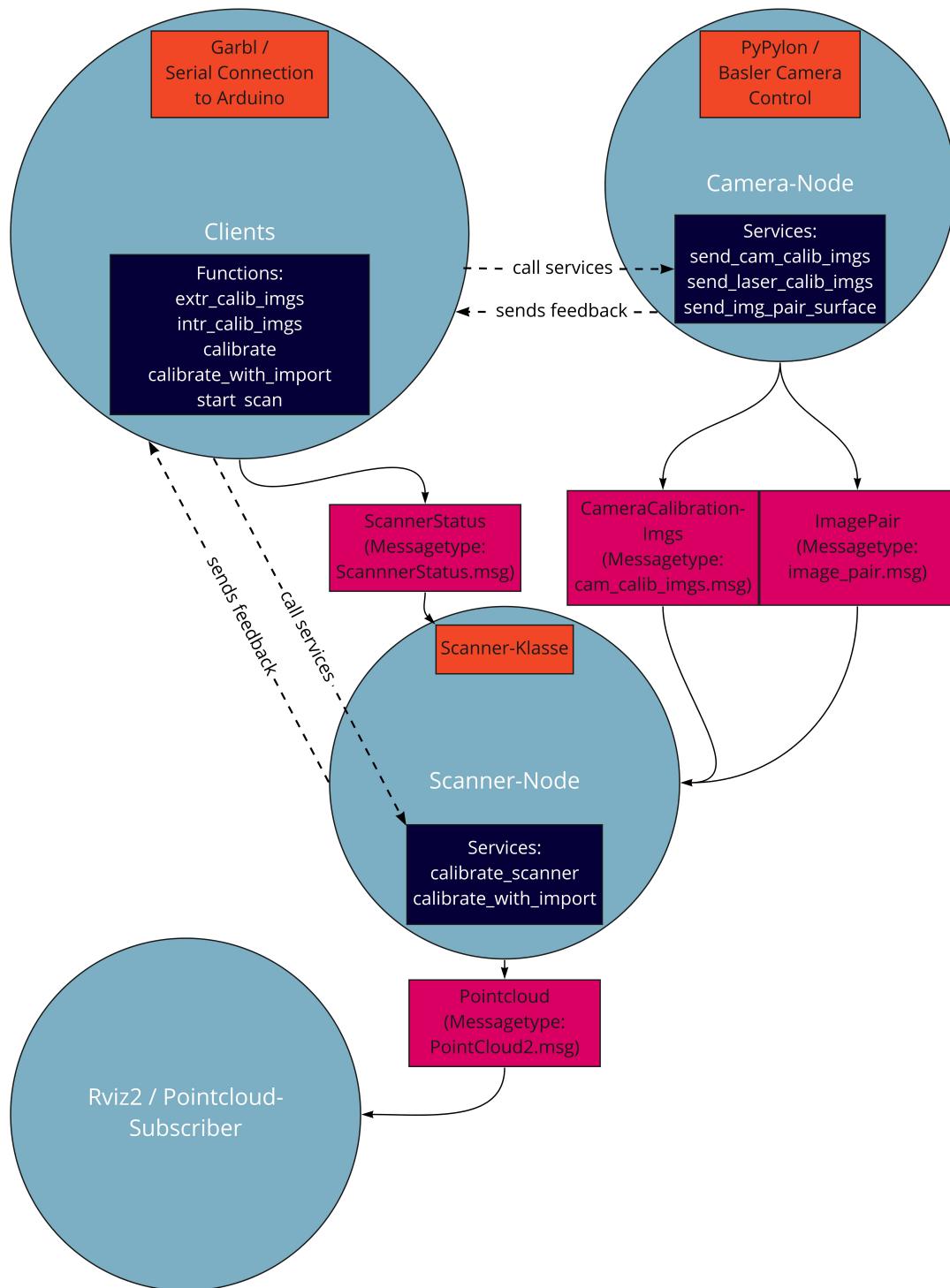


Abbildung 30: ROS2-Implementierung des Lasertriangulationssensor

A.3. Anhang C

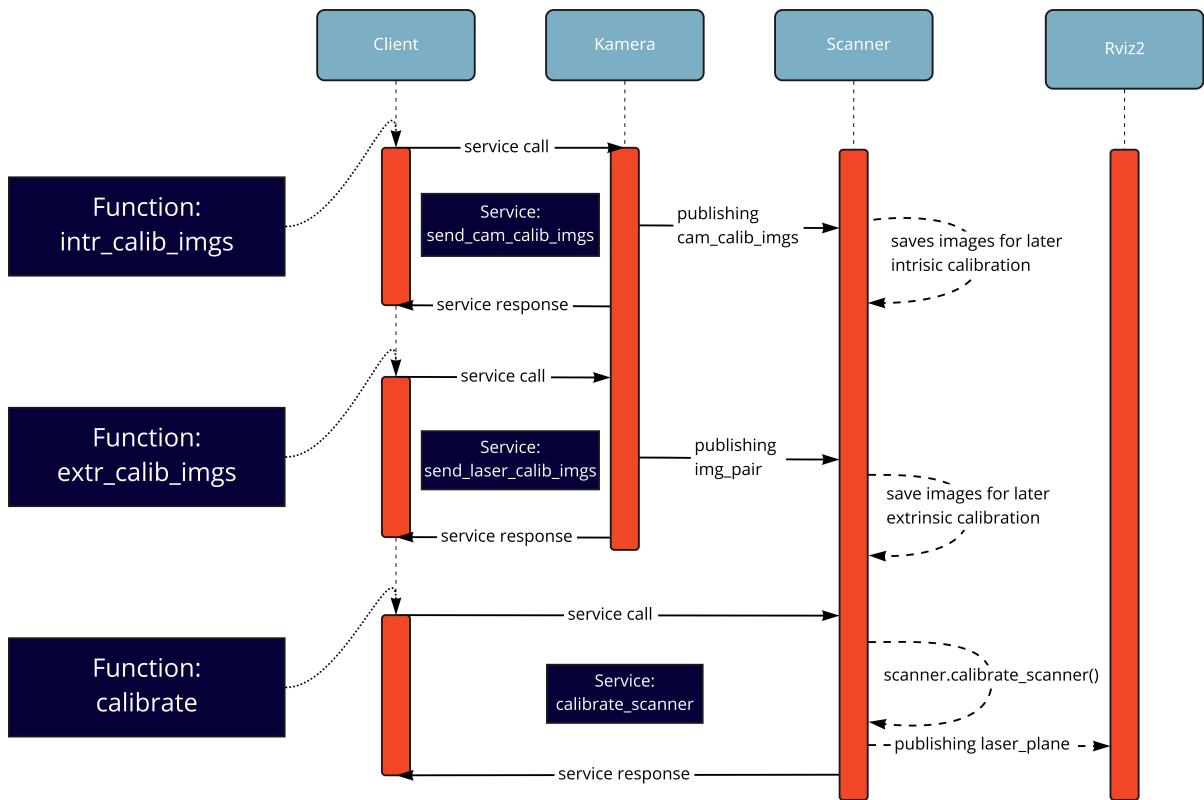


Abbildung 31: Vorgang der Kalibrierung

A.4. Anhang D

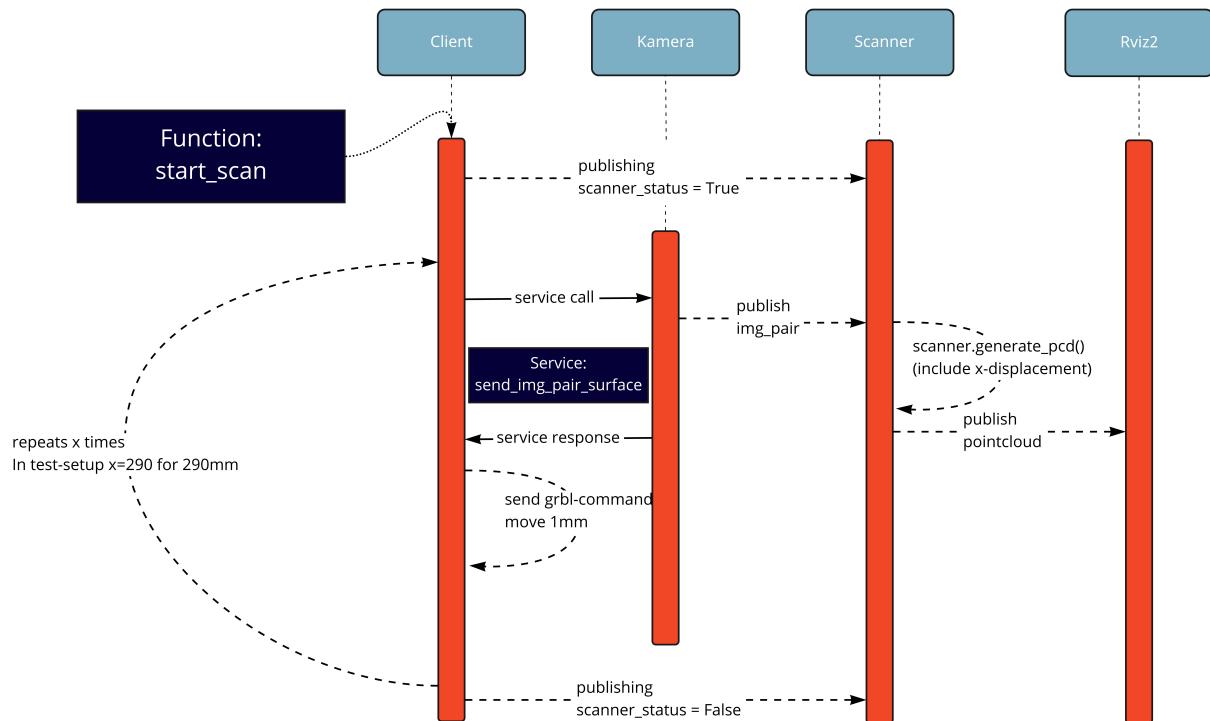


Abbildung 32: Der Scan-Vorgang

A.5. Anhang E

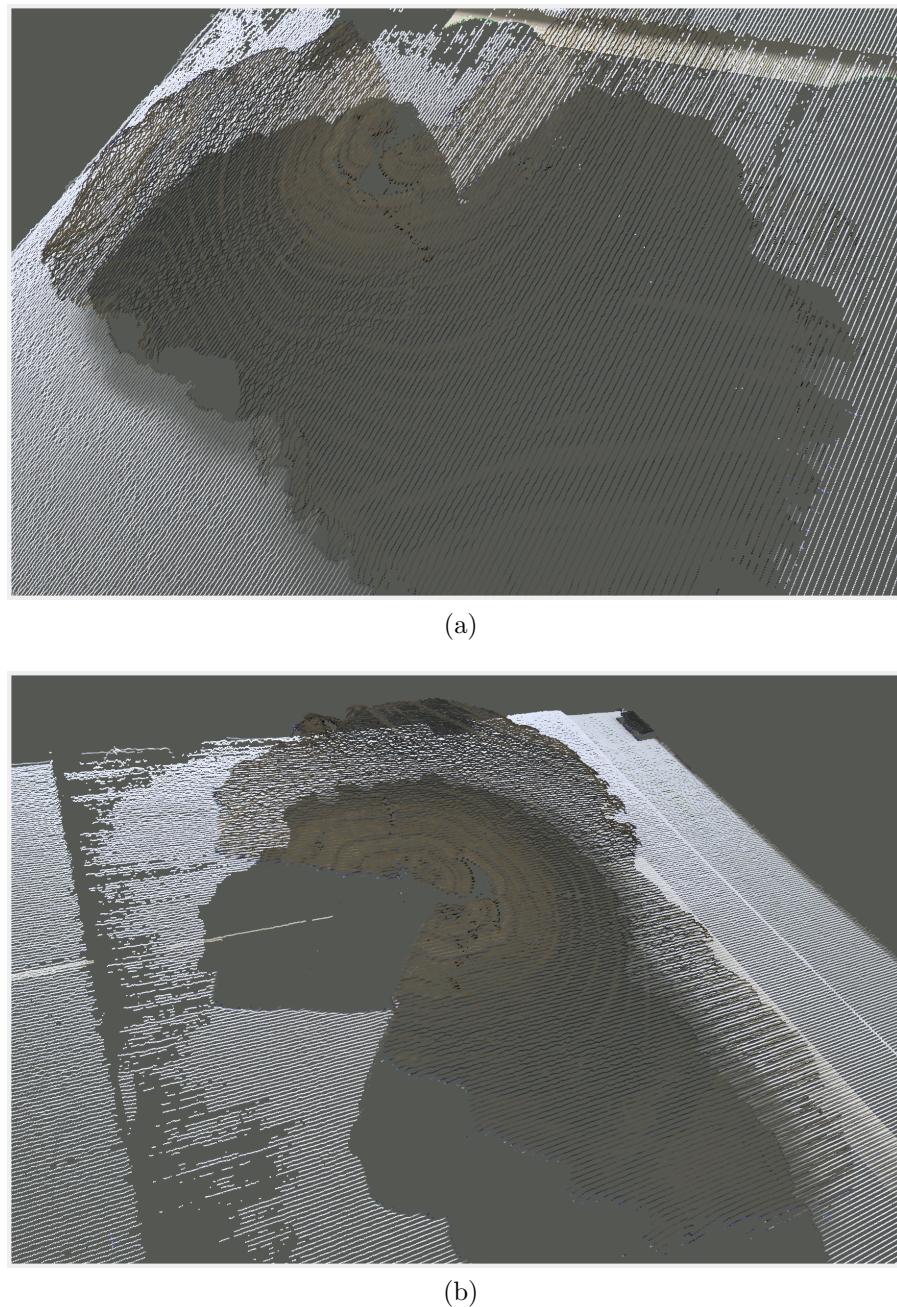


Abbildung 33: Qualitativer Scan aus der Nähe

A.6. Anhang F

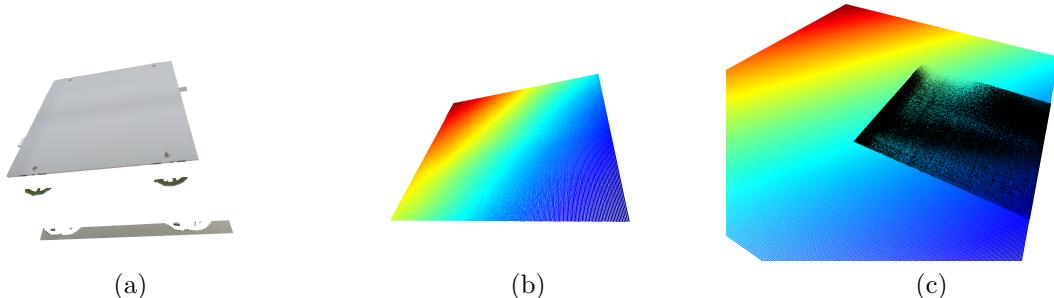


Abbildung 34: Messung einer Ebene. Dabei stellt Abbildung 34a den kompletten Scan dar. Abbildung 34b zeigt die ROI und Abbildung 34c die gefittete Ebene (bunt) in die ROI (schwarz).

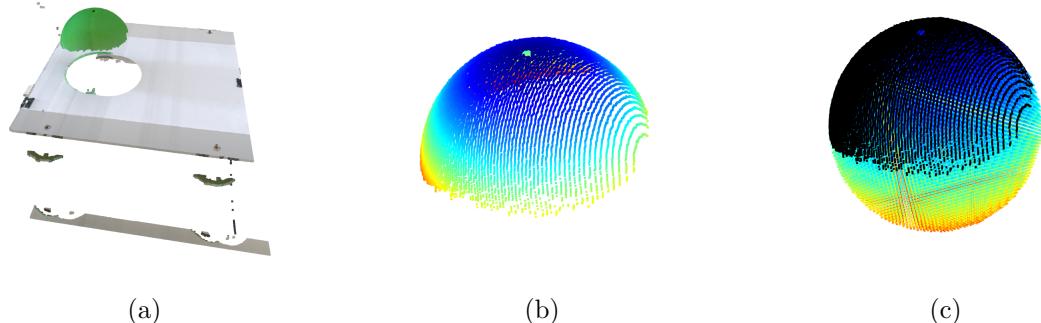


Abbildung 35: Messung einer Kugel. Dabei stellt Abbildung 35a den kompletten Scan dar. Abbildung 35b zeigt die ROI und Abbildung 35c die gefittete Kugel (bunt) in die ROI (schwarz).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Lasertriangulation	4
Abb. 2	Positionen bei der Lasertriangulation	7
Abb. 3	Pinhole Camera Model	8
Abb. 4	Transformationen	10
Abb. 5	Subtraktion der Bilder	13
Abb. 6	Pixel-Werte der Laserlinie	14
Abb. 7	Pixel-Werte im Grauwertbild	15
Abb. 8	Parabel für die Intensitäten	18
Abb. 9	Subpixel im Koordinatensystem	19
Abb. 10	Schachbrett-Kalibrierung	20
Abb. 11	Verzerrung bei Bildern	21
Abb. 12	Beispiel für die Verzerrung in Bildern	22
Abb. 13	Unterlage zum Kalibrieren	24
Abb. 14	Ausgangsbilder der extrinsischen Kalibrierung	25
Abb. 15	Weltkoordinatensysteme im ChArUco-Board	25
Abb. 16	Point of Interest im Bild	26
Abb. 17	Ausgeschnitten Laserlinien	27
Abb. 18	Herausgearbeitete Laserlinien	28
Abb. 19	Gewichtete Pixel für den x-Wert 11,4	32
Abb. 20	Der Lasertriangulationssensor	33
Abb. 21	Der Lasertriangulationssensor	34
Abb. 22	Arduino mit CNC-Shield	35
Abb. 23	Die Scanner-Klasse als UML-Diagramm	36
Abb. 24	Die Kamera-Klasse als UML-Diagramm	37
Abb. 25	Die LaserLine-Klasse als UML-Diagramm	38
Abb. 26	Die Laser-Klasse als UML-Diagramm	38
Abb. 27	Die Hilfsmethoden ohne Zugehörigkeit zu einer Klasse	39
Abb. 28	Qualitative Ergebnisse	44
Abb. 29	UML-Klassendiagramm des Lasertriangulationssensor	55
Abb. 30	ROS2-Implementierung des Lasertriangulationssensor	56
Abb. 31	Vorgang der Kalibrierung	57
Abb. 32	Der Scan-Vorgang	58
Abb. 33	Qualitativer Scan aus der Nähe	59
Abb. 34	Messung einer Ebene	60
Abb. 35	Messung einer Kugel	60

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Messungen einer Linie	46
Tab. 2	Messungen einer Ebene	46
Tab. 3	Messungen einer Kugel	46

Literatur

- [1] Tech. 3249–E. *Measurement and Analysis of the Performance of Camera Lenses*. 29. Sep. 1995. URL: <https://tech.ebu.ch/publications/tech3249> (besucht am 13.05.2022).
- [2] *3D-Bildverarbeitung*. STEMMER IMAGING. URL: <https://www.stemmer-imaging.com/de-ch/grundlagen/3d-bildverarbeitung/> (besucht am 13.05.2022).
- [3] *a2A1920-160ucPRO — Basler*. URL: <https://docs.baslerweb.com/a2a1920-160ucpro> (besucht am 28.04.2022).
- [4] Vaibhav Bajpai und Vladislav Perelman. “A Cross-Platform Open Source 3D Object Reconstruction System using a Laser Line Projector”. In: 3rd IEEE Germany Students Conference 2012 (GSC 2012). Nov. 2012.
- [5] Bart Boeckmans, Frank Welkenhuizen und Jean-Pierre Kruth. “Accuracy verification of a laser line scanner probe”. In: *Laser Metrology and Machine Performance X*. Lamdamap, Date: 2013/03/01 - 2013/03/01, Location: Buckinghamshire, UK. März 2013, S. 279–288.
- [6] Jean-Yves Bouguet. *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. en. CaltechDATA, Mai 2022. doi: 10.22002/D1.20164. URL: <https://data.caltech.edu/records/20164>.
- [7] *Camera calibration - Mastering OpenCV*. OREILLY. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/mastering-opencv-4/9781789533576/848e4e77-32ec-499d-9945-cb0352e28236.xhtml> (besucht am 13.05.2022).
- [8] *Camera Depth Testing Methodology*. Intel® RealSense™ Developer Documentation. URL: <https://dev.intelrealsense.com/docs/camera-depth-testing-methodology> (besucht am 10.05.2022).
- [9] Kenneth M. Dawson-Howe und David Vernon. “Simple pinhole camera calibration”. In: *International Journal of Imaging Systems and Technology* 5.1 (1994), S. 1–6. ISSN: 1098-1098. doi: 10.1002/ima.1850050102.
- [10] Anders Grunnet-Jepsen, John N Sweetser und John Woodfill. *Tuning depth cameras for best performance*. Intel® RealSense™ Developer Documentation. URL: <https://dev.intelrealsense.com/docs/tuning-depth-cameras-for-best-performance> (besucht am 19.05.2022).
- [11] Jörg Liesen und Volker Mehrmann. *Lineare Algebra: Ein Lehrbuch über die Theorie mit Blick auf die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. doi: 10.1007/978-3-662-62742-6.

- [12] Francisco Lourenço und Helder Araujo. "Intel RealSense SR305, D415 and L515: Experimental Evaluation and Comparison of Depth Estimation". In: *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 4: VISAPP*, INSTICC. SciTePress, 2021, S. 362–369. ISBN: 978-989-758-488-6. DOI: 10.5220/0010254203620369.
- [13] Alfred Nischwitz u. a. *Bildverarbeitung: Band II des Standardwerks Computergrafik und Bildverarbeitung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-28705-4.
- [14] OpenCV: Camera Calibration. URL: https://docs.opencv.org/3.4/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html (besucht am 29.03.2022).
- [15] OpenCV: Camera Calibration and 3D Reconstruction. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html (besucht am 29.03.2022).
- [16] OpenCV: Color conversions. URL: https://docs.opencv.org/4.x/de/d25/imgproc_color_conversions.html#color_convert_rgb_gray (besucht am 22.03.2022).
- [17] Nobuyuki Otsu. "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms". In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9.1 (1979), S. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [18] Prinzip der Triangulation. Vision Doctor. URL: <https://www.vision-doctor.com/laser-beleuchtung/prinzip-triangulation.html> (besucht am 13.05.2022).
- [19] RINNTECH - Technology for tree and wood analysis - Home. URL: <http://www.rinntech.de/> (besucht am 03.03.2022).
- [20] Limei Song u. a. "A Multi-View Stereo Measurement System Based on a Laser Scanner for Fine Workpieces". In: *Sensors* 19.2 (2019). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19020381. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/2/381>.
- [21] Z. Zhang. "A flexible new technique for camera calibration". In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22.11 (Nov. 2000). Conference Name: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, S. 1330–1334. ISSN: 1939-3539. DOI: 10.1109/34.888718.
- [22] Michael Zollhöfer u. a. "State of the Art on 3D Reconstruction with RGB-D Cameras". In: *Computer Graphics Forum* 37.2 (2018), S. 625–652. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.13386>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/cgf.13386>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cgf.13386>.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Gießen, 25.05.2022

Ort, Datum

Unterschrift