



Integration eines Laserentfernungsmessers als Zusatzsensor in das bestehende Selbstverortungssystem

Integrated Positioning System (IPS)

Bachelorarbeit

für die Prüfung zum Bachelor of Science

des Studienganges Informationstechnik

an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

von:

Immanuel Rettig

Bearbeitungszeitraum

22. Juni 2020 – 13. September 2020

Matrikelnummer, Kurs

4006884, TINF17ITIN

Ausbildungsfirma

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
e.V. Standort: Berlin-Adlershof

Betreuer der Ausbildungsfirma

M. Eng. André Choinowski

Gutachter der Dualen Hochschule

Prof. Dr. Heinz Jürgen Müller

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere durch meine Unterschrift, dass ich die hier vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst habe. Ich habe mich dazu keiner anderen als der im Anhang verzeichneten Quellen und Hilfsmittel, insbesondere keiner nicht genannten Onlinequellen, bedient. Alle aus den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß übernommenen Teile (gleich ob Textstellen, bildliche Darstellungen usw.) sind als solche einzeln kenntlich gemacht.

Die vorliegende Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden. Sie war weder in gleicher noch in ähnlicher Weise Bestandteil einer Prüfungsleistung im bisherigen Studienverlauf und ist auch noch nicht publiziert. Die als Druckschrift eingereichte Fassung der Arbeit ist in allen Teilen identisch mit der elektronisch eingereichten Fassung.

Berlin, den 11.09.2020

Unterschrift des Verfassers, Immanuel Rettig

Kurzfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit beschreibt die Untersuchungen zwischen zwei Entfernungsbestimmungsmethoden. Verglichen werden die Messdaten eines Stereo-Kamerasystems mit den Daten aus einem Entfernungslasermesser.

Das Institut für optische Sensorsysteme des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat mit dem Integrated Positioning System ein Multisensorsystem entwickelt, welches ohne äußere Referenzsysteme die eigene Position bestimmen und die Änderung der Position verfolgen kann. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Methode ist die Entfernungsbestimmung zu markanten Bildpunkten in den Stereobildern. In dieser Arbeit werden die Arbeitsschritte erläutert, um die Entfernungsberechnung über die Bilddaten mit Entfernungswerten eines Laserentfernungsmessers zu vergleichen und die Abweichungen aufzuzeigen. Für die Umsetzung wird der Laserscanner in den Workflow des Sensorkopfes integriert und die Messdaten des Laserscanners werden zeitlich über einen Zeitstempel zu anderen Messdaten des IPS referenziert. Um den Vergleich beider Methoden für die Entfernungsbestimmung zu realisieren, wird der Laserscanner in einem Koordinatensystem der beiden Kameras kalibriert. Es wird der Lagepunkt des Laserscanners und ein Richtungsvektor, welcher den Verlauf des Lasermessstrahls beschreibt, ermittelt. Für die Auswertung beider Messdaten wird im Rahmen dieser Arbeit ein Tool erstellt, welches die Messdaten verarbeitet und in einer grafischen Oberfläche über Diagramme auswertet. Zum Abschluss wird eine Messkampagne mit dem System durchgeführt, durch welche die Funktionalität der Integration bestätigt wird und eine Aussage über die Genauigkeit des Entfernungswertes aus der Bildberechnung getroffen werden kann.

Abstract

This bachelor thesis describes the investigations between two distance determination methods. The measured data of a stereo camera system is compared with the data of a laser rangefinder.

The Institute of Optical Sensor Systems of the German Aerospace Centre has developed the Integrated Positioning System, a multi-sensor system which can determine its own position and track the change of position without external reference systems. An essential part of this method is the determination of distances to prominent pixels in the stereo images. In this thesis the steps to compare the distance calculation via the image data with distance values of a laser rangefinder and to point out the deviations are explained. For the implementation, the laser scanner is integrated into the workflow of the sensor head and the measurement data of the laser scanner is referenced in time via a time stamp to other measurement data of the IPS. To implement the comparison of both methods for distance determination, the laser scanner is calibrated in a coordinate system of the two cameras. The position point of the laser scanner and a direction vector describing the course of the laser measuring beam is determined. For the evaluation of both measuring data a tool is created in the context of this work, which processes the measuring data and evaluates it in a graphic surface via diagrams. Finally, a series of measurements with the system will be carried out to confirm the functionality of the integration and to make a statement about the accuracy of the distance value from the image calculation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Formel und Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1. Einleitung	IX
1.1. Motivation	1
1.2. Aufgabenstellung.....	2
1.3. Ausgangssituation	3
1.4. Aufbau der Arbeit.....	4
2. Verwandte Literatur.....	1
3. Grundlagen	7
3.1. Integrated Positioning System (IPS).....	7
3.1.1. Funktionsprinzip	8
3.1.2. Verwendung	9
3.2. Laserscanner.....	10
3.2.1. Funktionsprinzip	10
3.2.2. Auswahl.....	12
4. Methodik	14
4.1. Anforderungsanalyse.....	15
4.2. Integration des Laserscanners	16
4.3. Alternative Lösungsplan der Integration	17

0 Inhaltsverzeichnis

4.4. Räumliches Referenzieren	18
4.4.1. Vorbetrachtung.....	19
4.4.2. Kalibrierung	21
5. Laserscanner Tool	24
5.1. Anforderung.....	24
5.2. Funktion.....	26
5.3. Umsetzung	28
5.3.1. Einlesen der Daten.....	28
5.3.2. Auswerten der Messdaten.....	29
5.3.3. Auslesen spezifischer Entfernungswerte.....	30
6. Verifikation	32
6.1. Planung	32
6.2. Durchführung.....	34
6.3. Bewertung	36
7. Diskussion.....	43
7.1. Interpretation der Ergebnisse	43
7.2. Limitation der Untersuchung.....	44
8. Fazit	46
8.1. Zusammenfassung	46
8.2. Ausblick	47
Literatur- und Quellenverzeichnis	2
Anhang	4

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: IPS Sensorkopf.....	1
Abbildung 2.1: "Abb. 1. Konkurrierende Prozesskette der Sensoren" [6]	1
Abbildung 3.1: IPS Schema.....	8
Abbildung 3.2: Thermal eingefärbte Punktwolke	9
Abbildung 3.3: Laserscanner Impulsverfahren	10
Abbildung 3.4: Phasenvergleichsverfahren	11
Abbildung 5: Laserscanner Benewake TF03	13
Abbildung 4.1: IPS Sensorkopf mit Laserscanner	15
Abbildung 4.2: Datenfluss der Messdaten des Laserscanners	17
Abbildung 4.3: IPS Click GUI.....	18
Abbildung 4.4: IPS Click Kommandozeile.....	19
Abbildung 4.5: Laserscanner Kalibrierungsschema.....	21
Abbildung 5.1: Laserscanner GUI.....	26
Abbildung 5.2: Auswertungsbild - Differenz in Abhängigkeit zur Distanz.....	27
Abbildung 5.3: GUI-Bereich zum Wertauslesen mit beispielhaften Entfernungswerten	27
Abbildung 5.4: Schema - Einlesen der Daten	28
Abbildung 5.5: Schema - Auswerten der Messdaten.....	29
Abbildung 5.6: Schema - Auslesen spezifischer Entfernungswerte.....	30
Abbildung 5.7: Schema - Nächste und Vorherige Distanz anzeigen	31
Abbildung 6.1: Schema - Messkampagne zur Verifikation.....	32
Abbildung 6.2: Durchführung der Validierungsmessungen.....	34
Abbildung 6.3: IPS-DataCheck 1.Messung.....	35
Abbildung 6.4: Messlauf 1 Entfernungswerte - Zeit	37
Abbildung 6.5: Messlauf 4 Entfernungswerte - Zeit	37

0 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6.6: IPS-DataCheck Testlauf vier, Zeitstempel 3128176000	39
Abbildung 6.7: Linkes Kamerabild der vierten Messung, Zeitstempel: 3177376000.	40
Abbildung 6.8: Linkes Kamerabild der vierten Messung, Zeitstempel: 3196876000.	40
Abbildung 6.9: Messlauf 2 Differenz Laserscanner zu IPS - Entfernung	41
Abbildung 6.10: Messlauf 4 Differenz Laserscanner zu IPS - Entfernung	41

Formel und Tabellenverzeichnis

Formel 1: Entfernungsbestimmung über die Lichtgeschwindigkeit	11
Formel 2: Allgemeine Vektorgleichung	20
Formel 3: Formel für die Position des Laserscanners	20
Formel 4: Lasermesspunkt Berechnung	23

Tabelle 1: Kalibrierungspunkte mit Entfernungswerten des Laserscanners	22
Tabelle 2: LidarTF03 Messdaten File	24
Tabelle 3: grundlegende Informationen Messläufe	36

Abkürzungsverzeichnis

DLR.....	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.</i>
FPGA.....	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
IPS	<i>Integrated Positioning System</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>

1. Einleitung

Die Navigation ist aus vielen Aufgabenbereichen der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Bereits seit vielen Jahrhunderten gibt es Methoden, die den Menschen unterstützen, um sich auch in unbekanntem Gelände zu orientieren. Eine sehr weit verbreitete Methode für die eigene Lagebestimmung ist das Global Positioning System (GPS) [1]. Bei der Methode wird die Position aufgrund von Signalen, welche von Satelliten in Umlaufbahnen um die Erde gesendet werden, bestimmt. Für die Navigation mithilfe von GPS wird eine äußere Referenz, hierbei die Satelliten, benötigt. Durch das benötigte Signal ist die Benutzung von GPS nur örtlich begrenzt möglich. Das Signal, welches von GPS-Satelliten ausgesendet wird, erreicht durch physikalische Grenzen nicht jeden Ort. Eine Verwendung ist meist nur auf der Erdoberfläche mit direktem Sichtkontakt zum Himmel, also dem Satelliten, möglich. In einem Gebäude oder z.B. im Weltraum hingegen ist die Verwendung von GPS nicht möglich.

Das Institut für Optische Sensorsysteme am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelt mit dem Integrated Positioning System (IPS) [2] ein System für die Lagebestimmung und Verfolgung des Nutzers unabhängig von äußeren Referenzsystemen. Bei dem IPS handelt es sich um ein Multisensorsystem, welches aufgrund von Bilddaten aus einem Stereokamerasystem in Verbindung mit weiteren Sensoren die eigene Positionsänderung errechnet. Hierrüber kann dann der zurückgelegte Weg in Echtzeit oder nach der Aufzeichnung von Messdaten rekonstruiert werden. Neben den Kameras wird eine Inertiale Messeinheit (IMU) verwendet, welche kontinuierlich Bewegungsdaten erfasst. Diese Daten werden als parallele Erfassung genutzt und ebenfalls verwendet, um bei kurzzeitigem Ausfall der Bilddaten weiterhin die Lageänderungen zu bestimmen. Eine IMU ist eine Kombination von mehreren Drehraten- und Beschleunigungssensoren. Durch die Kombination von Messdaten der einzelnen Sensoren können Rückschlüsse über die Positionsänderung gezogen werden. In Abbildung 1.1 ist ein IPS Sensorkopf im Größenvergleich mit einem Kugelschreiber gezeigt.



Abbildung 1.1: IPS Sensorkopf

Grundsätzlich basiert die Funktionsweise des IPS auf Bildern von mindestens zwei Kameras. In den jeweiligen, zeitgleich aufgenommenen Bildern dieser Kameras werden über trigonometrische Berechnungen Entfernungswerte zu markanten Bildpunkten bestimmt. Das IPS Framework sucht diese markanten Punkte in den nachfolgenden Bildern erneut und erfasst die veränderte Lage der Punkte. Über die veränderte Lage lassen sich Rückschlüsse auf die Bewegung des Systems zwischen den beiden Bildpaaren ziehen, wodurch der zurückgelegte Weg zwischen beiden Aufnahmezeitpunkten rekonstruiert werden kann.

Aktuell werden die Entfernungswerte allein durch die berechnete Lösung über die Bildpaare ermittelt. Aufgrund von Kameraparametern, wie Auflösung der Kameras, wird mit zunehmender Entfernung zu den erfassten Punkten der Fehler in der Berechnung größer. Durch die Verwendung eines Lasers-Entfernungsmesser soll die Bestimmung der Entfernung des IPS Systems überprüft werden. Das Ziel dieser Arbeit ist das Integrieren eines Laserscanners in den Workflow des IPS. Hierdurch soll die Ungenauigkeit in der Entfernungsmessung über die Bilddaten überprüft werden.

1.1. Motivation

Die Entfernungsmessung über einen Laserscanner bietet viele Vorteile, weshalb ein Laserscanner bei unterschiedlichen Anwendungen genutzt wird. So wird zum Beispiel im Handwerk in vielen Bereichen der Laserentfernungsmesser anstelle des klassischen Maßbands verwendet [3]. Im Gegensatz zu dem Zollstock oder einem Maßband lassen sich mit einem Laserentfernungsmesser Abstände deutlich schneller

1 Einleitung - 1.2 Aufgabenstellung

ermitteln, meist innerhalb weniger Sekunden. Ein Laserscanner benötigt für eine Messung oft nur weniger als eine Sekunde und liefert eine Genauigkeit, die durch herkömmliche Messmethoden oft nicht erreicht werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit auch Entfernungen über größere Distanzen messen zu können. Mit einem Laserscanner sind Messungen von 250 Metern möglich [4], welche mit anderen Messmethoden oft nicht zu erreichen sind, oder mit einer starken Ungenauigkeit verfälscht werden.

Die Entfernungsmessung bei IPS basiert aktuell ausschließlich auf einer Triangulation über ein Stereo-Kamerasystem [5]. Aufgrund von Einschränkungen der Hardware, beispielsweise durch die Auflösung der Kameras oder den Basisabstand der beiden Kameras, ist die Bestimmung der Distanz nur innerhalb eines Bereiches von einigen Metern korrekt. Mit zunehmender Entfernung steigt die Abweichung zu der tatsächlichen Distanz. Die Vorteile in der Verwendung eines Laserscanners liegen darin, dass der Laserscanner einen geringeren Messfehler aufweist und ebenfalls Entfernungen ermitteln kann, die im Rahmen der bildgestützten Erfassung nicht mehr möglich sind.

1.2. Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Tiefeninformationen aus den Stereobildern des IPS, auf die Genauigkeit bei zunehmender Entfernung zu untersuchen. Hierfür soll eine parallele Entfernungsbestimmung mittels eines Laserscanners umgesetzt werden. Um den Laserscanner parallel zu der Aufnahme eines Datensatzes des IPS nutzen zu können, müssen folgende Punkte ausgearbeitet werden.

Der Laserscanner soll in den Datenfluss des IPS eingebunden werden. Hierfür soll eine Integrierung über das Field Programmable Gate Array (FPGA) erfolgen. Durch die Integrierung soll neben der Weiterleitung der Messdaten auch die zeitliche Referenzierung dieser Daten zu den anderen Messdaten des IPS erfolgen. Hierrüber wird später eine Zuordnung der Entfernungswerte des Laserscanners zu den zeitlich zusammenhängenden Entfernungswerten aus den Bilddaten ermöglicht.

Um die Entfernungswerte beider Messmethoden vergleichen zu können, müssen der Laserscanner und der Verlauf des Messstrahls räumlich lokalisiert werden. Hierfür soll eine Methode gefunden werden, den Lasermessstrahl zu dem IPS zu verorten. Durch

1 Einleitung - 1.3 Ausgangssituation

diese Zuordnung wird ermöglicht, beide Messdaten in einem zugrundeliegenden Koordinatensystem darzustellen und damit einen Vergleich zu ermöglichen.

Die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten soll über ein, in dem Rahmen dieser Arbeit erstelltes Tool realisiert werden. Dieses Tool soll die Messdaten einlesen, verarbeiten und grafisch auswerten. Die Bedienung des Tools soll durch eine grafische Oberfläche erfolgen, in welcher die Daten eingelesen und die Messwerte grafisch dargestellt werden. Zusätzlich soll dem Nutzer die Möglichkeit gegeben sein, sich konkrete Entfernungswerte des Laserscanners und die nach dem Zeitstempel zugehörigen Entfernungswerte aus den Bilddaten ausgeben zu lassen.

Ziel des Tools ist es, einen automatisierten Weg für den Umgang mit neuen Messdaten zu schaffen, welcher es ermöglichen soll, auch größere Datenmengen auszuwerten.

Nach der erfolgreichen Umsetzung der genannten Punkte, soll durch eine Messkampagne die Funktionalität der Umsetzung überprüft werden. Ziel der Datenaufzeichnung soll das Bewerten der Entfernungswerte aus den Bildern im Vergleich zu den Distanzwerten des Laserscanners werden.

1.3. Ausgangssituation

Der für diese Arbeit verwendete Laserscanner wurde im Vorfeld in Bezug auf das Verhalten beim Auftreffen auf unterschiedliche Materialien, den Einfluss des Winkels unter dem der Messtrahl auftrifft, und seine Genauigkeit untersucht. Das Paper ist im Anhang unter dem Titel „Untersuchung des Verhaltens eines Punktlaserscanners für die Entfernungsmessung“ zu finden.

Die erste Untersuchung beurteilt das Verhalten des Laserscanners, wenn der Messtrahl durch einen Gegenstand auf halber Entfernung verdeckt wird. Hierfür wurde langsam eine Holzplatte in den länglichen Messtrahl bewegt. Die Messkurve zeigt, dass der Laserscanner sprunghaft auf die neue Entfernung wechselt und keinen gleichmäßigen Übergang zwischen beiden Entfernungen aufzeichnet. Dieses Verhalten erfolgt bereits, wenn nur ein kleiner Teil des Messtrahls (ca. 1/8) verdeckt wird.

Die zweite Testmessung untersuchte die Genauigkeit des Laserscanners in einem Messbereich bis 20 Meter. Die Ergebnisse zeigen, dass der Laserscanner innerhalb dieses Messbereiches eine Abweichung von ca. 5 Zentimetern aufweist.

1 Einleitung - 1.4 Aufbau der Arbeit

Durch Untersuchungen beim Auftreffen des Laserscanners auf weiße und schwarze Oberflächen sowie Glas und Spiegel wurde ermittelt, dass der Laserscanner aufgrund seiner Messweise von dem Untergrund des Objektes, zu dem die Entfernung ermittelt werden soll, beeinflusst wird. So zeigt der Entfernungswert bei schwarzen Oberflächen, Glas und Spiegeln eine höhere Distanz als die wirkliche Distanz. Diese Abweichungen lagen größtenteils innerhalb weniger Zentimeter, wodurch die in dieser Arbeit betrachteten Abweichungen nur geringfügig verfälscht werden.

In dem Umfang dieser Arbeit werden nachfolgend die Entfernungswerte des Laserscanners als absolute Referenz verwendet ohne die zugrundeliegende eventuelle Abweichung des Laserscanners detailliert in die Berechnung einzubeziehen.

1.4. Aufbau der Arbeit

Zur Strukturierung ist die Arbeit in nachfolgende Kapitel unterteilt. Kapitel 2 ordnet diese Arbeit in den Kontext zu verwandten Arbeiten ein. In Kapitel 3 werden die Grundlagen des IPS und dem Laserscanner beschrieben. Zunächst wird die Funktionsweise und beispielhafte Verwendung des IPS beschrieben. Anschließend wird das Funktionsprinzip des Laserscanners erläutert und der Auswahlprozess des verwendeten Modells dargestellt. Die Methodik und deren Umsetzung wird in Kapitel 4 beschrieben. Zu Beginn werden die Anforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung aufgestellt. Im Anschluss werden die Integration des Laserscanners über den FPGA und die räumliche Referenzierung beschrieben. Kapitel 5 erläutert die Funktionsweise und die Umsetzung des Laserscannertools für das Auswerten von Messdaten. Das 6. Kapitel beschreibt die Messkampagne zur Verifizierung der Arbeitsschritte. Es wird die Planung, die Durchführung und die Umsetzung der Messung erläutert.

2. Verwandte Literatur

In diesem Kapitel wird diese Arbeit mit einer verwandten Veröffentlichung verglichen und das Vorgehen dieser Arbeit abgegrenzt.

Die Veröffentlichung mit dem Titel „Low-Level-Fusion eines Laserscanner- und Stereokamera-Systems in der Fahrzeugumfelderfassung“ [6] beschreibt das Zusammenfügen von Messpunkten eines Stereokamerasystems und eines Vier-Ebenen-Laserscanners. Es wird ein Weg beschrieben, wie die Messdaten des Laser Sensors und der Stereodaten auf drei Ebenen miteinander fusioniert werden.

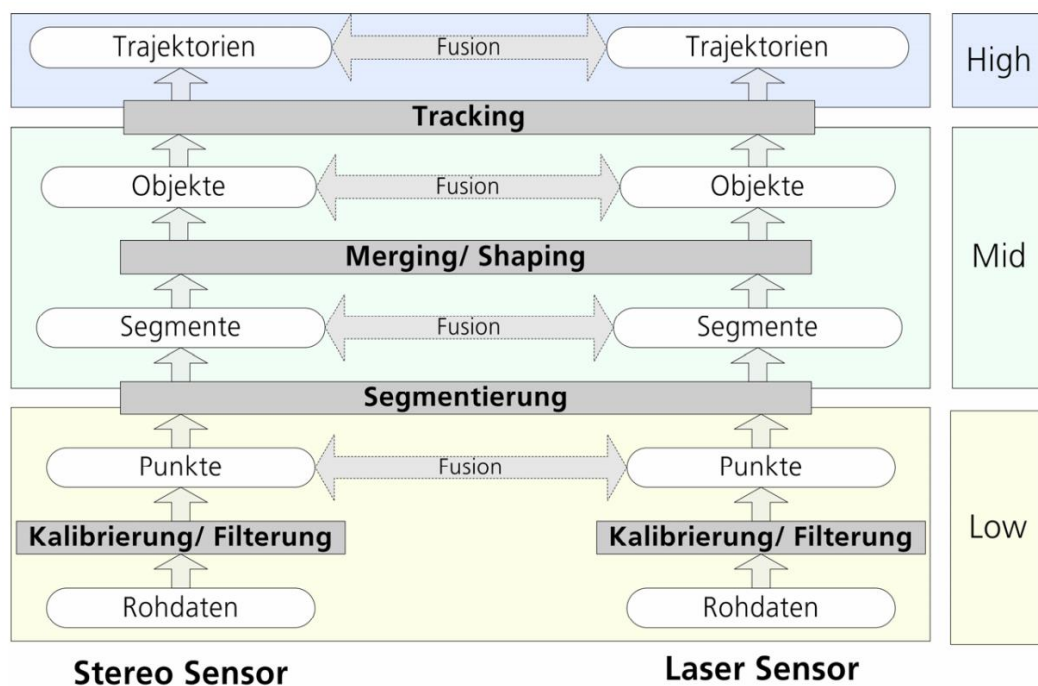


Abbildung 2.1: "Abb. 1. Konkurrierende Prozesskette der Sensoren" [6]

In Abbildung 2.1 ist das Schema aus der Veröffentlichung zu sehen, welches den Ablauf der Fusionierung darstellt. Der Unterschied zu dem in dieser Arbeit thematisierten Inhalt liegt darin, dass der für diese Arbeit verwendete Laserscanner ein Einstrahlentfernungsmesser ist. Dieser zeigt somit unbeweglich in eine bestimmte Richtung und ermittelt einen Entfernungswert zu einem fixen Messpunkt. Bei dem verwendeten Laserscanner der Veröffentlichung handelt es sich um einen Vier-Ebenen-Laserscanner, der mittels eines rotierenden Messkopfes mehrere Messpunkte auf vier Ebenen hintereinander aufzeichnet. Durch die fixierte Richtung des für diese Arbeit verwendeten Laserscanners, kann eine andere Kalibrierungsmethode verwendet werden.

3. Grundlagen

Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Grundlagen und Funktionsweisen der verwendeten Messinstrumente. Für das bessere Verständnis der folgenden Arbeitsschritte wird in Unterkapitel 3.1 das zugrundeliegende IPS vorgestellt, die Funktionsweise beschrieben und ausgewählte Verwendungsmöglichkeiten genauer erläutert. Das Unterkapitel 3.2 beschreibt die Funktionsweise von Laserentfernungsmessungen und den Auswahlprozess des verwendeten Laserscanners.

3.1. Integrated Positioning System (IPS)

Dieser Abschnitt beschreibt das zugrundeliegende Sensorsystem IPS, die Funktionsweise und einige Verwendungsmöglichkeiten.

Das IPS ist ein Multisensorsystem, welches aus einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren besteht. Für die Bildaufnahme werden zwei Kameras verwendet, die zusätzlich zu dem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich, ebenfalls Wellenlängen im Nahinfrarotbereich aufzeichnen können. Die Wellenlängen des sichtbaren Bereiches für den Menschen liegen zwischen 380 nm und 780 nm. Die Wellenlänge von Nahinfraroter Strahlung geht bis zu 3,0 μm [7]. Die entstehenden „Navigationsbilder“ sind in Graustufen aufgezeichnet. Diese Farbskala wird verwendet, um das gesamte Spektrum der Kameras in einem Bild zu verdeutlichen, welches über den für das menschliche Auge sichtbaren Bereich hinausgeht.

Als weiterer Hauptsensor ist eine IMU verbaut. Eine IMU ist eine Zusammenstellung aus mehreren Drehraten- und Beschleunigungssensoren, die als unterstützende Methode für die Aufzeichnung der Lageänderung des Systems verwendet wird [5]. Um die Messdaten der verschiedenen Sensoren zeitlich zusammenzuführen, wird ein temperaturstabiler Schwingquarz verwendet. Dieser gibt einen, für das gesamte System einheitlichen Zeittakt, über welchen die einzelnen Messwerte zeitlich in den Ablauf einer Messung eingefügt werden können.

```
graph LR; subgraph Sensor_Unit [Sensor Unit]; K1[Kamera] <--> K2[Kamera]; IMU[IMU] -- blue --> FPGA[FPGA]; WS[weitere Sensoren] -- blue --> FPGA; K1 -- red --> FPGA; K2 -- red --> FPGA; end; subgraph Computer_Unit [Computer Unit]; Comp[Computer] -- red --> IPS_Appl[IPS Applikation]; end; K1 -- red --> Comp; K2 -- red --> Comp; FPGA -- black --> IPS_Appl;
```

In Abbildung 3.1: IPS Schema sind die wesentlichen Bestandteile und der Datenfluss des IPS dargestellt. Als Grundlage für die Navigation werden, von dem FPGA ausgelöst, jeweils ein Bild der rechten und der linken Navigationskamera aufgenommen. Dieser Datenfluss ist in grün dargestellt. Während die Kameras die Bilddaten an die IPS Applikation auf dem Computer weiterleiten, wird vom FPGA ein Zeitstempel an die IPS App geschickt. Dort werden die Bilder mit dem Zeitstempel versehen und in einer Ordnerstruktur abgelegt. Zusätzlich sammelt der FPGA alle weiteren Sensordaten, markiert diese mit dem zugehörigen Zeitstempel des Eintreffens an der Schnittstelle des FPGA und leitet diese ebenfalls an die IPS App weiter. Auf dem Computer erfolgt die Auswertung der Daten.

Die Aufgabe der IMU ist es unter anderem ein kurzzeitiges Ausfallen der Bildverarbeitung zu überbrücken. Ein Ausfall der Methode über die Bilderfassung kann zum Beispiel entstehen, wenn es zu wenige erkannte Punkte in zwei aufeinander

3 Grundlagen - 3.1.2 Verwendung

folgenden Bildpaaren gibt, sodass zwischen den Aufnahmen keine Bewegung errechnet werden kann. Die IMU-Daten verhindern, dass der zurückgelegte Weg extreme Bewegungen oder Drehungen berechnet, die in diesem Umfang nicht erfolgt sind. Für die Auswertung der Messdaten gibt es unterschiedliche Varianten: Die erste Möglichkeit ist das Plotten der zurückgelegten Strecke in einer Trajektorie. Eine weitere Möglichkeit ist das zusammensetzen der Bilddaten zu einer 3-D Punktwolke.

3.1.2. Verwendung

Es gibt mehrere Varianten des IPS, die für unterschiedliche Einsatzszenarios konzipiert und angepasst wurden. Eine IPS Variante wurde auf einem Helm befestigt, um Aufnahmen in unwegsamer Umgebung durchzuführen, wo es erforderlich ist, beide Hände für die Fortbewegung zur Verfügung zu haben. Mit diesem IPS-Gerät wurde zum Beispiel ein Schiffsrumpf aufgezeichnet, um diesen am Computer zu kartografieren.

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit ist die Erweiterung eines IPS-Sensorkopfes mit einer Thermalkamera. Hiermit lassen sich die aufgenommenen Temperatur-Informationen mit den ermittelten Positionsdaten kombinieren. Durch die zusätzlichen Temperaturquellen lassen sich 3D-Punktwolken thermal eingefärbt erstellen.

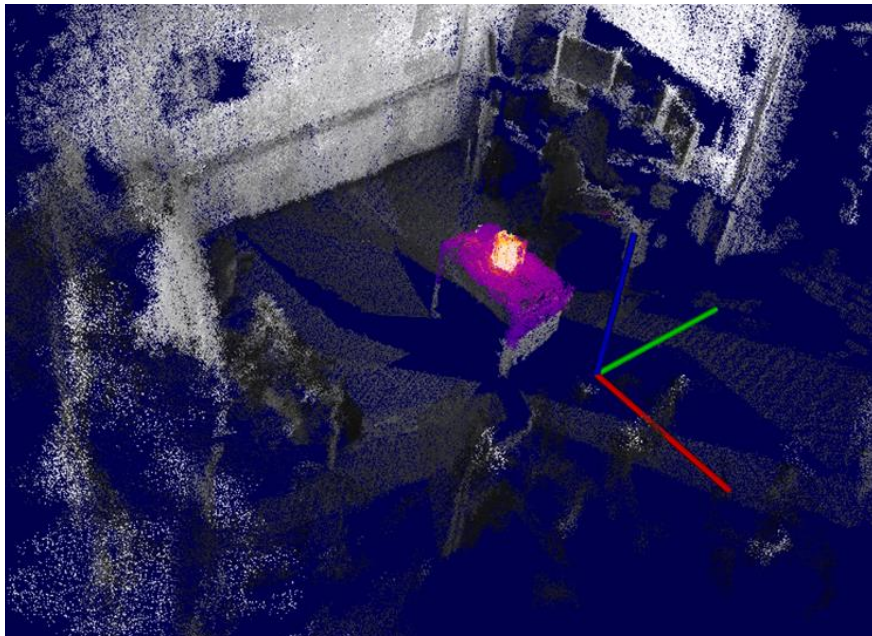


Abbildung 3.2: Thermal eingefärbte Punktwolke

In Abbildung 3.2 ist die Punktwolke aus der Aufnahme eines Büroraums zusehen. In der Mitte der Abbildung ist ein Tisch mit einem heißen Wasserkocher zu erkennen.

3 Grundlagen - 3.2 Laserscanner

Dieser Versuchsaufbau stellt eine exemplarische Umgebung dar, in der relevante Objekte innerhalb der Punktwolke farblich nach einer Temperaturskala eingefärbt werden können. Je heller und orange die Pixel dargestellt sind, desto stärker strahlt die Oberfläche wärme ab. Je dunkler und lila die Pixel eingefärbt sind, desto kühler ist das Objekt.

3.2. Laserscanner

Das folgende Unterkapitel erläutert den verwendeten Laserscanner. im Abschnitt 3.2.1 werden zwei unterschiedliche Funktionsprinzipien eines Laserentfernungsmessers vorgestellt. Der Abschnitt 3.2.2 beschreibt den Auswahlprozess zu dem, im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Laserscanner.

3.2.1. Funktionsprinzip

Für die Entfernungsmessung mittels eines Laserscanners gibt es grundlegend zwei unterschiedliche Messmethoden: das Impulsverfahren und das Phasenvergleichsverfahren.

Das Impulsverfahren ermittelt über die Laufzeitbestimmung die Entfernung zum reflektierenden Objekt.

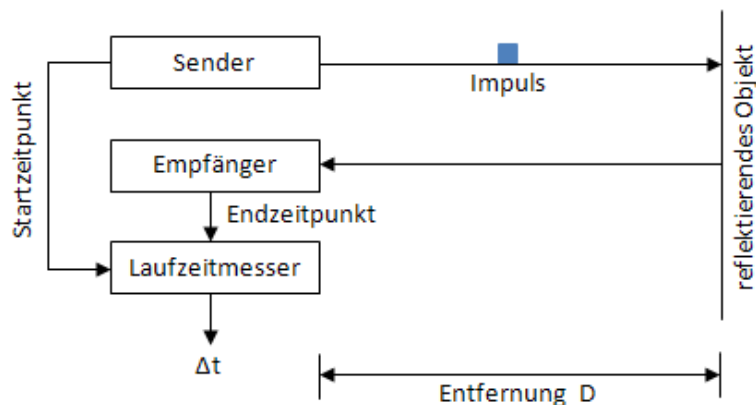


Abbildung 3.3: Laserscanner Impulsverfahren

In Abbildung 3.3 ist der Ablauf einer Entfernungsmessung mit dem Impulsverfahren schematisch dargestellt [8]. Ein Sender strahlt einen definierten Laserimpuls ab. Dieser wird über das Objekt, auf welches der Messstrahl trifft, zurück an den Empfänger reflektiert. Der Laufzeitmesser bestimmt die vergangene Zeit zwischen dem Absenden und Erfassen des Messimpulses. Die gemessene Zeitdauer beschreibt

3 Grundlagen - 3.2.1 Funktionsprinzip

die Länge, die der Lichtimpuls für das doppelte der Strecke benötigt. Für die Berechnung wird die folgende Formel verwendet:

$$D = \frac{c}{2n} * \Delta t$$

Formel 1: Entfernungsbestimmung über die Lichtgeschwindigkeit (n: Brechungszahl der Atmosphäre, c: Lichtgeschwindigkeit, Δt : Differenz zwischen Sende- und Empfangszeit)

Das Phasenvergleichsverfahren ermittelt über Wellenverschiebung die Entfernung zum reflektierenden Objekt.

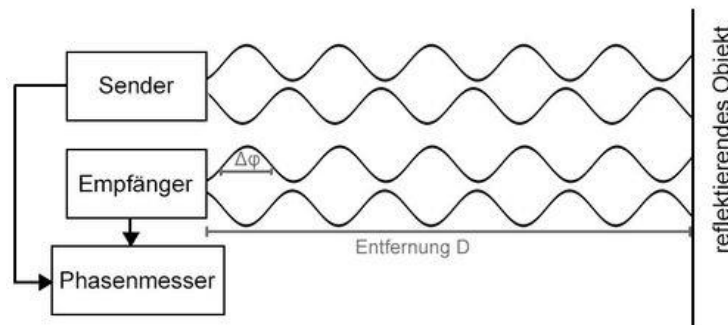


Abbildung 3.4: Phasenvergleichsverfahren

In Abbildung 3.4: Phasenvergleichsverfahren ist der Ablauf einer Entfernungsmessung mit dem Phasenvergleichsverfahren schematisch dargestellt [9]. Ein Sender strahlt zwei Laserstrahlen mit unterschiedlichen Frequenzen aus. Der Empfänger erfasst beide Strahlen und gibt die Information an den Phasenmesser weiter. Dieser ermittelt die Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen, die durch die zurückgelegte Distanz entstehen, und gibt eine Entfernung zu dem reflektierenden Objekt an.

Die wesentlichen Unterschiede der beiden Methoden liegen darin, dass bei dem Impulsverfahren die einzelne Messung deutlich weniger Zeit benötigt als beim Phasenvergleichsverfahren. Ein Impulslaserscanner ermöglicht zum Beispiel eine Messfrequenz von bis zu 1000 Hz [10], während die Messung über ein Phasenvergleichs-Entfernungsmesser ca. eine Sekunde benötigt [11]. Der zweite Unterschied besteht darin, dass die Genauigkeit einer Messung über das Phasenvergleichsverfahren genauer ist als bei einer Messung über das Impulsverfahren. Während ein beispielhafter Impulslaserscanner eine Genauigkeit von 1% Abweichung des Distanzwertes ab einer Entfernung von mehr als 10 Metern angibt aufweist [10], wird die Messgenauigkeit bei einer Phasenmessung mit ± 1 mm angegeben [11].

3.2.2. Auswahl

In diesem Abschnitt wird die Auswahl des geeigneten Laserscanners beschrieben. Dieser Arbeitsschritt ist im Vorfeld der Arbeit durchgeführt worden, wird jedoch für das Verständnis des nachfolgenden Vorgehens hier aufgeführt.

Es gibt für viele unterschiedliche Anwendungsbereiche jeweils spezialisierte Laserscanner. Einige Laserscanner funktionieren Millimeter genau auf einen begrenzten Raum von wenigen Metern und andere Laserscanner können auch Entfernungen in mehreren Kilometern erfassen.

Für die Verwendung in Zusammenhang mit dem IPS sollte der Laserscanner folgende Auswahlkriterien erfüllen:

Das erste Kriterium ist die Größe des Laserscanners. Für die Verwendung der handgetragenen IPS-Mini ist es wichtig, dass der Laserscanner von der Größe neben dem Griff auf der Oberseite des Sensorkopfes montiert werden kann ohne die Handhabung während der Durchführung einer Messkampagne einzuschränken. Als weiteres Kriterium in Kombination mit der Größe ist das Gewicht des Laserscanners möglichst gering zu halten. Hierdurch wird das Gewicht des Sensorkopfes nicht unnötig vergrößert, was sich ebenfalls positiv auf die Handhabung während einer Messung ausübt.

Für die weiterführende Datenverarbeitung ist es wichtig, dass die Messdaten des Laserscanners über eine serielle Schnittstelle ohne spezielle Firmensoftware des Laserscanners ausgelesen werden können. Hierdurch soll eine Anbindung an den FPGA des IPS ermöglicht werden.

Der Laserscanner sollte eine Reichweite von mehr als 20 Metern erfassen können, damit auch Entfernungen gemessen werden können, die nicht mehr von dem IPS über die Bilddaten bestimmt werden können. Als letztes Kriterium soll der Laserscanner eine möglichst hohe Genauigkeit und Entfernungsauflösung in einem Bereich bis 20 Metern aufweisen. Es ist wichtig, dass die Entfernungswerte des Laserscanners genauer als die ermittelten Entfernungswerte aus den Stereodaten sind, damit die Messwerte des IPS überprüft werden können.



Abbildung.5: Laserscanner Benewake TF03 ¹

Während des Auswahlprozesses wurde sich für einen kleinen, kompakten Laserscanner entschieden. Das verwendete Modell heißt Benewake TF 03. Es handelt sich um einen Einstrahl-Entfernungsmesser, welcher aufgrund seiner Größe und des Gewichts von 77 Gramm für die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt wurde. Der Laserscanner erfasst die Entfernung durch das vorhergehend beschriebene Impulsverfahren. Der Messstrahl des Laserscanners ist unbeweglich montiert und ermittelt in einer wählbaren Frequenz zwischen 1 Hz bis 1000 Hz die Distanz. Der Laserscanner hat eine Reichweite von bis zu 180 Metern bei einer Genauigkeit von ± 10 Zentimetern bei Messungen unter 10 Metern und bei Messungen von über 10 Metern eine Abweichung von 1% des Messwertes. Als Schnittstelle verfügt der Laserscanner über eine Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Schnittstelle.

¹ <https://www.mybotshop.de/media/image/product/4580/lg/benewake-tf03-lidar-180m~2.jpg>

4. Methodik

Das folgende Kapitel beschreibt die Methodik für die Umsetzung einer Verwendung des Laserscanners. Um eine Verwendung zu realisieren ist es notwendig, die Daten, welche vom Laserscanner erfasst werden, innerhalb der Aufzeichnungen der IPS-Daten abzulegen. Hierfür wird die Erfassung der Messdaten über eine Schnittstelle des IPS erfordert. Über das Erfassen der Messdaten des Laserscanners besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Daten zeitlich zu den anderen erfassten Daten zu referenzieren. Für das Vergleichen der Messwerte ist eine Kalibrierung nötig. Mithilfe der Kalibrierung sollen die Lage und der Verlauf des Lasermessstrahls in Abhängigkeit der beiden Kameras bestimmt werden. Hierdurch lassen sich die Laserscannerwerte in einen Vergleichswert umwandeln, welcher mit den Werten aus den Stereodaten verglichen werden kann.

Zu Beginn werden die Anforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung definiert. Dann wird die Umsetzung der Integration inklusive einer alternativen Lösung erläutert, für den Fall, dass die Umsetzung nicht wie geplant durchgeführt werden kann. Anschließend wird die Durchführung der Integration und des Laserscanners in das IPS und die zeitliche Referenzierung betrachtet. Zum Abschluss wird das Vorgehen für die Kalibrierung beschrieben. Nach der mathematischen Vorbetrachtung erfolgt die praktische Umsetzung der Erfassung des Messstrahls und die Berechnungen.

In Vorbereitung der folgenden Arbeitsschritte wurde der Laserscanner auf dem IPS Sensorkopf montiert, sodass die Bewegung des Laserscanner relativ zu dem IPS minimiert wird. In Abbildung 4.1: IPS Sensorkopf mit Laserscanner ist der Sensorkopf mit montiertem Laserscanner abgebildet. Auf der rechten Seite über der Kamera ist der Laserscanner Benewake zu sehen. Zwischen dem Laserscanner und dem Handgriff ist zusätzlich ein Bosch-Entfernungsmesser montiert, der für diese Arbeit als Zielvorrichtung verwendet wird.



Abbildung 4.1: IPS Sensorkopf mit Laserscanner

Der Lasermesspunkt des Bosch-Entfernungsmessers, welcher über das Phasenvergleichsverfahren die Distanz ermittelt, ist mit dem menschlichen Auge als roter Laserpunkt zu erkennen. Da die Laserscanner parallel nebeneinander angeordnet sind, treffen beide Messpunkte innerhalb einiger Zentimeter nebeneinander auf dem zu messenden Objekt auf². Da der Messpunkt des Benewake-Laserscanners nicht für das menschliche Auge sichtbar ist, wird für das „Zielen“ der rote Laserpunkt des Bosch-Lasers verwendet.

4.1. Anforderungsanalyse

Für die Verwendung des Laserscanners während eines Messlaufes mit dem IPS lassen sich folgende Anforderungen definieren:

- Erfassen der Messdaten des Laserscanners durch das IPS
- Messdaten durch Zeitstempel von FPGA zeitlich referenziert
- Räumliche Referenzierung der Messpunkte des Laserscanners
- Methode für den Vergleich der Entfernungswerte des Laserscanner und der bildgestützten Berechnung

² Die Untersuchung ist in dem Paper im Anhang beschrieben.

4 Methodik - 4.2 Integration des Laserscanners

Um die Messdaten zu erfassen, muss von Seiten des FPGA eine serielle Schnittstelle bereitgestellt werden. Das Protokoll der Schnittstelle muss dem des Laserscanners entsprechen, um eine Kommunikation zu ermöglichen. Nach dem Erfassen der Messdaten soll jeder Entfernungswert mit einem Zeitstempel von dem FPGA referenziert werden, der den genauen Zeitpunkt der Aufnahme dokumentiert. Hierdurch soll eine Zuordnung der Messwerte während der Auswertung ermöglicht werden.

Eine weitere Anforderung ist die räumliche Referenzierung der Messpunkte zu den Kameras des IPS. Es soll sowohl eine Funktion ermittelt werden, die den Verlauf des Messstrahls des Laserscanners mathematisch beschreibt, als auch ein Koordinatenpunkt, der den Ursprung des Laserstrahls darstellt. Abschließend soll eine Lösung erstellt werden, mit der die Entfernungswerte des Laserscanners und die der bildgestützten Berechnung verglichen werden können.

4.2. Integration des Laserscanners

Das folgende Unterkapitel beschreibt die Umsetzung der Integration des Laserscanners über den FPGA. Dieser Arbeitsschritt wurde von einem Kollegen der Abteilung Weltrauminstrumente umgesetzt. Nachfolgend wird die Umsetzung kurz erläutert.

Der Laserscanner Benewake TF03 stellt für die Kommunikation eine UART Schnittstelle bereit. Um an den FPGA der IPS-Mini angeschlossen zu werden, ist die Verwendung eines UART auf RS232 Konverter Chip nötig, da die IPS-Mini nur eine RS232 Schnittstelle besitzt, welche verwendet werden konnte. Durch das neue Programmieren des FPGA wird erreicht, dass der FPGA die Messdaten, die von dem Laserscanner an die UART-Schnittstelle geleitet werden, mit einem Zeitstempel versieht und an die IPS-Applikation schickt werden. Der FPGA rechnet die 8 Datenbits in einen Entfernungswert in Zentimetern um und speichert bei jedem Erfassen des Messwertes an der Schnittstelle den zugehörigen Zeitstempel. Diese beiden Informationen werden anschließend an die IPS-Applikation auf dem Computer weitergeleitet. In Abbildung 4.2 ist der Datenfluss über den FPGA schematisch dargestellt (in rot). Ebenfalls dargestellt ist der alternative Plan, falls die Umsetzung nicht realisiert werden kann (in grün). Eine detaillierte Erläuterung des Plans ist in Unterkapitel 4.3 aufgeführt.

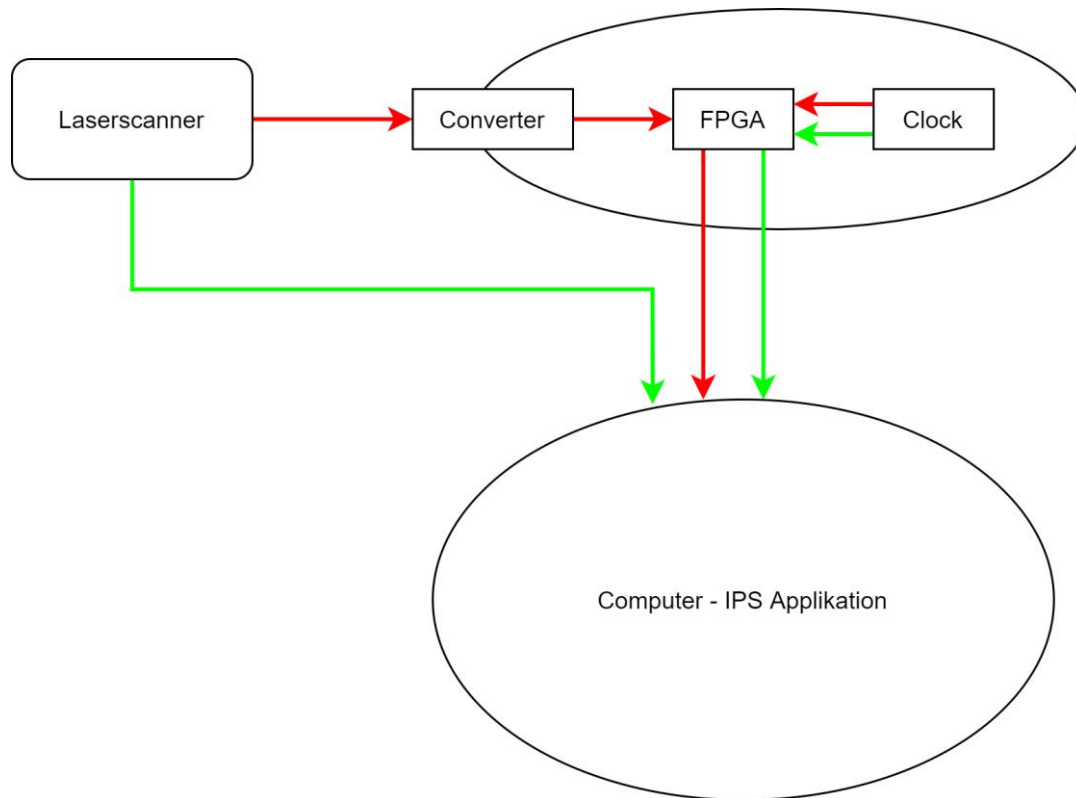


Abbildung 4.2: Datenfluss der Messdaten des Laserscanners

4.3. Alternative Lösungsplan der Integration

Im Rahmen dieser Arbeit wurde parallel zu der Integration über den FPGA ein Plan ausgearbeitet für den Fall, dass die Umsetzung über den FPGA nicht zu realisieren ist. Hierfür wurde ein Vorgehen ausgearbeitet, welches nachfolgend erläutert wird.

Das Erfassen der Daten könnte über eine UART-Schnittstelle direkt an dem Computer erfolgen. Hierfür würde ein Python Programm erstellt werden, welches die Schnittstelle konfiguriert und die Messdaten erfasst. Um die zeitliche Synchronisierung zu erreichen, wird ein Einfluss auf die Messung benötigt, der sowohl in den Bilddaten als auch in den Entfernungsdaten des Laserscanners zu erkennen ist. Diese Problematik könnte dadurch gelöst werden, dass bei einem Messlauf der Sensorkopf mit einem Stativ auf eine Szene ausgerichtet wird und anschließend ein Hindernis durch den Messstrahl bewegt wird. Dieses Ereignis ist in den Messdaten des Laserscanners in Form einer kurzzeitigen Verringerung der Entfernung zu erkennen. In den Bilddaten ist das Hindernis ebenfalls erfasst, worüber der Zeitpunkt beider Datensätze synchron erfasst werden kann. Durch dieses Vorgehen lassen sich der Entfernungswert des

4 Methodik - 4.4 Räumliches Referenzieren

Laserscanner mit der Entfernung aus der trigonometrischen Berechnung vergleichen. Dieser Vorgang muss bei jedem Ausrichten mit dem Stativ erneut durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die erfassten Messwerte zueinander referenziert werden können.

4.4. Räumliches Referenzieren

Das folgende Unterkapitel beschreibt das Vorgehen, um den Messstrahl des Laserscanners räumlich zu referenzieren. Als Grundlage für das Kalibrieren wird ein Koordinatensystem verwendet, welches als Output aus einem institutseigenen Tool (IPS Click, Versionsnummer 0.6) gegeben wird. Durch das Verwenden dieses Systems wird erreicht, dass die Kalibrierung des Laserstrahls in örtlichen Bezug zu den Kameras gesetzt werden kann.



Abbildung 4.3: IPS Click GUI

Nachfolgend ist das Vorgehen mit dem Tool beschrieben, um die Kalibrierungspunkte zu erfassen. In Abbildung 4.3 ist die GUI des Tools mit einem Bildpaar aus der Kalibrierung des Laserscanners dargestellt. Die rote Markierung zeigt den Messpunkt des Laserscanners. Dem Benutzer ist es möglich, Bildpunkte im linken Bild mit einem Mausklick zu markieren. Wird nun von dem Algorithmus der passende Bildpunkt im rechten Kamerabild erkannt, so wird der markierte Punkt von dem Tool erfasst und mit allen Informationen³ gespeichert.

³ Eine beispielhafte Datei mit allen Informationen ist im Anhang zu finden.

```
*****
* IPS Click                                     *
*                                             *
* German Aerospace Center (DLR)               *
* Institute of Optical Sensor Systems          *
* Dpt. Information Processing for Optical Systems (OS-IOS) *
*                                             *
* Contact Rico Fritzsche (rico.fritzsche@dlr.de) *
* Build Creation: Aug  8 2016, 12:57:24, Version 0.6 *
*****

Program Control
-----
Key left          show previous image
Key right         show next image
Key insert        enter specific time stamp & jump to image
Left mouse        save a coordinate into file
Left mouse + key shift  exit program
Use tagID "tagID" ?  enter new tagID or go ahead with 'Return'

12 images found for the master camera. Now you can start working.

left mouse click 1 on image 000166213000
| Img Left :    713.827, 499.301          VALID
| Img Right:    527, 488                 VALID
| NCC Left :    0.00413043, -0.05953
| NCC Right:    -0.201037, -0.0705734
| 3D Coord :    0.00390962, -0.0562743, 0.946493
```

Abbildung 4.4: IPS Click Kommandozeile

In Abbildung 4.4 ist die Kommandozeile des IPS Click Tools nach dem erfolgreichen Matchen des Punktes aus Abbildung 4.3 zu sehen. Unter dem Punkt „3D Coord :“ sind die relevanten Koordinaten des Punktes zu sehen. Über die Vergabe einer ID ist es dem Nutzer möglich, den angeklickten Punkt zu identifizieren. Nach Beendigung des Programmes werden neben weiteren Informationen auch die 3D-Koordinaten aller erfassten Punktes in einem csv-File gespeichert.

Durch dieses Vorgehen werden sowohl die Punkte für die Kalibrierung in Abschnitt 4.4.2 erfasst, als auch die Daten für die Verifikation (Kapitel 6) erstellt.

4.4.1. Vorbetrachtung

Ziel für die Kalibrierung ist es zunächst eine Vektorgleichung aufzustellen, welche den Verlauf des Messstrahls des Laserscanners beschreibt. Anschließend werden über das Einsetzen der gemessenen Entfernung des Laserscanners zu dem erfassten Punkt, die Koordinaten des Laserscanners bestimmt. Diese Koordinaten beschreiben den Ursprung des Messstrahls, welcher für die auswertende Messkampagne relevant wird.

4 Methodik - 4.4.1 Vorbetrachtung

Als erstes wird eine Vektorgleichung für den Verlauf des Messstrahls berechnet. Hierfür wird für einen dreidimensionalen Raum folgende Gleichung verwendet [12]:

$$V = P_1 + \lambda(P_1 - P_2) = \begin{pmatrix} x_{P1} \\ y_{P1} \\ z_{P1} \end{pmatrix} + \lambda \left(\begin{pmatrix} x_{P1} \\ y_{P1} \\ z_{P1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{P2} \\ y_{P2} \\ z_{P2} \end{pmatrix} \right)$$

Formel 2: Allgemeine Vektorgleichung (x, y, z : Koordinaten der Punkte P_1 und P_2 , λ : Skalierungsfaktor des Richtungsvektors)

Für die Kalibrierung ist der Richtungsvektor der Vektorgleichung ($\overrightarrow{RV} = \lambda(P_1 - P_2)$) relevant. Durch das Einsetzen dieses Richtungsvektors kann folgende Formel für die Lagebestimmung des Laserscanners aufgestellt werden:

$$P_{0n} = P_n - \frac{\overrightarrow{RV}}{|\overrightarrow{RV}|} * L_n$$

Formel 3: Formel für die Position des Laserscanners

P_{0n} bezeichnet den Ursprung des Laserstrahls in Abhängigkeit vom Index n . P_n bezeichnet die Koordinaten eines Lasermesspunktes und L_n bezeichnet die Entfernung zu dem Messpunkt, die der Laserscanner bestimmt hat. $\frac{\overrightarrow{RV}}{|\overrightarrow{RV}|}$ steht für den normierten Richtungsvektor der Vektorgleichung. Diese Formel subtrahiert von dem Laserscanner-Messpunkt (P_n) die Länge (L_n) multipliziert mit dem normierten Richtungsvektor, welcher durch die Normierung die Länge eins (hier ein Meter) erhält.

4.4.2. Kalibrierung

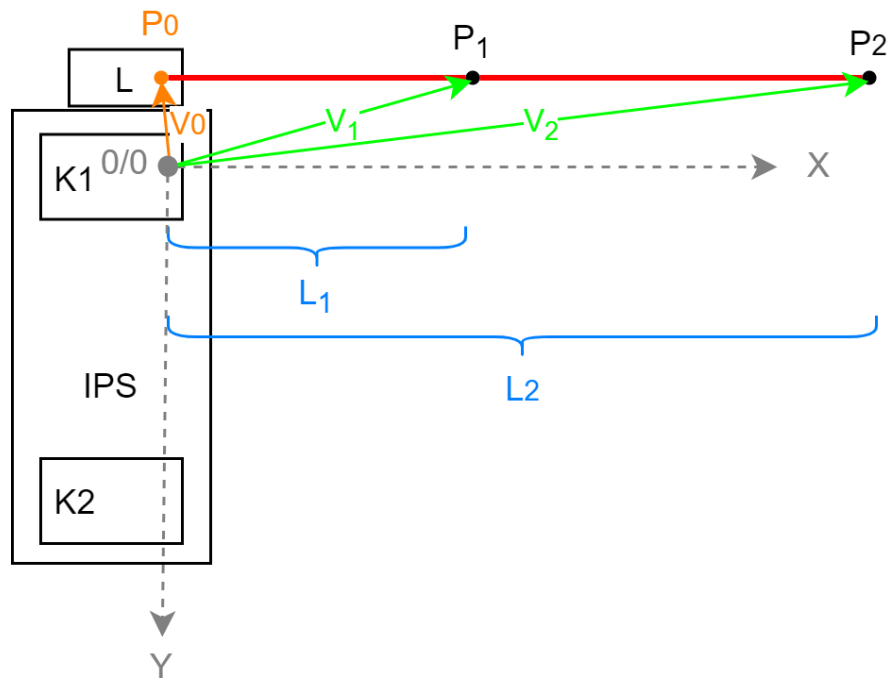


Abbildung 4.5: Laserscanner Kalibrierungsschema

In Abbildung 4.5: Laserscanner Kalibrierungsschema ist die Durchführung der Kalibrierung schematisch dargestellt. K1 und K2 sind die beiden Kameras des IPS, L beschreibt die Lage des Laserscanners. 0/0 ist der Koordinatensystemursprung, welches dem IPS-Clicktool zugrunde liegt. P1 und P2 sind jeweils Punkte, die nacheinander über den Laserscanner aufgenommen wurden. L1 und L2 sind die jeweiligen Entfernungen, die der Laserscanner bestimmt hat und V1 bzw. V2 sind die Ortsvektoren, die über das IPS-Click Tool bestimmt wurden. P0 ist der Ursprung des Lasermessstrahls. Ziel der Kalibrierung ist es, den Vektor V0 zu ermitteln, um die Koordinaten von P0 zu erhalten.

Für die Aufnahme der Punkte wurde der Sensorkopf in einem abgedunkelten Raum⁴ senkrecht vor einer Wand positioniert. Es wurden fünf Aufnahmen aus unterschiedlichen Entfernungen aufgezeichnet und jeweils die Mitte des Laserpunktes über das IPS Click-Tool (siehe Unterkapitel 4.4) ausgewählt. Nach dem Erfassen der Punkte ergeben sich nachfolgende Messdaten zu den fünf Punkten.

⁴ Der Raum wurde abgedunkelt, um den Messpunkt des Laserscanners in den Bildern erkennen zu können.

Punkt	x -Koordinaten	y - Koordinaten	z - Koordinaten	Längenwert
P1	-0.026886000	-0.051396000	1.987418000	2,02
P2	-0.028925357	-0.053668429	1.612755857	1,64
P3	0.022981750	-0.048598750	1.292492000	1,35
P4	0.042432556	-0.055767000	0.944889889	1,02
P5	0.054701063	-0.058260438	0.609915500	0,68

Tabelle 1: Kalibrierungspunkte mit Entfernungswerten des Laserscanners

Als erstes werden von Punkt 1 ausgehend zu allen anderen Punkten die jeweilige Vektorgleichung aufgestellt. Nachfolgend ist exemplarisch die Berechnung aus Punkt 1 und Punkt 2 aufgeführt. Dieses Rechenschema wird für alle fünf Punkte verwendet.

P1 zu P2:

$$\begin{pmatrix} -0,026886000 \\ -0,051396000 \\ 1,987418000 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -0,026886000 & -0,028925357 \\ -0,051396000 & -0,053668429 \\ 1,987418000 & 1,612755857 \end{pmatrix}$$

$$V_1 = \begin{pmatrix} -0,026886000 \\ -0,051396000 \\ 1,987418000 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 0,002039357 \\ 0,002272429 \\ 0,374662143 \end{pmatrix}$$

Aus den fünf Vektorgleichungen wird jeweils der Richtungsvektor verwendet, um den durchschnittlichen Richtungsvektor des Lasermessstrahls zu berechnen. Die allgemeine Vektorgleichung mit dem durchschnittlichen Richtungsvektor lautet nun:

$$V = \begin{pmatrix} -0,026886000 \\ -0,051396000 \\ 1,987418000 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -0,049683503 \\ 0,002677654 \\ 0,680507939 \end{pmatrix}$$

Als dritter Schritt wird der Ursprung des Laserscanners ermittelt. Hierfür werden nach der Formel für die Position des Laserscanners (Formel 3) jeweils durch das Einsetzen des Punktes P_n und dem zugehörigen Laserscanner-Wert L_n in die Gleichung fünf Punkte P_0 berechnet. Nachfolgend ist die exemplarische Rechnung mit dem Einsetzen des ersten Punktes aufgeführt. Diese Rechnung wird mit allen fünf Messpunkten durchgeführt.

$$P_{01} = \begin{pmatrix} -0,026886000 \\ -0,051396000 \\ 1,987418000 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -0,07281507 \\ 0,00392431 \\ 0,99733774 \end{pmatrix} * 2,02 = \begin{pmatrix} 0,07347468 \\ -0,05680486 \\ 0,61279196 \end{pmatrix}$$

4 Methodik - 4.4.2 Kalibrierung

Um einen finalen Ort des Laserscanners und damit einen Ursprung des Messstrahls zu erhalten, wird aus allen berechneten Punkten das arithmetische Mittel gebildet:

$$P_0 = (P_{01} + P_{02} + P_{03} + P_{04} + P_{05}) * 1/5$$

Die berechneten Koordinaten des Laserscanners heißen:

$$P_0 = (0,11057863 / -0,05880455 / -0,048933).$$

Der durchschnittliche Richtungsvektor lautet:

$$\vec{RV} = \begin{pmatrix} -0,049683503 \\ 0,002677654 \\ 0,680507939 \end{pmatrix}$$

Der Ausgangspunkt und der durchschnittliche Richtungsvektor sind das Ergebnis der Kalibrierung. Mithilfe dieser Werte lassen sich nun zu jeder übermittelten Distanz von dem Laserscanner der jeweilige Messpunkt innerhalb des Koordinatensystems der beiden Kameras berechnen. Aus Formel 3: Formel für die Position des Laserscanners lässt sich die Formel zur Berechnung beliebiger Lasermesspunkte ableiten:

$$p_0 + \frac{\vec{RV}}{|\vec{RV}|} * L_n = P_n$$

Formel 4: Lasermesspunkt Berechnung

Durch Einsetzen eines Längenwertes des Laserscanners (L_n) lässt sich der zugehörige Messpunkt und dessen Koordinaten (P_n) bestimmen.

5. Laserscanner Tool

Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Umsetzung des Tools für die Auswertung von Messläufen mit dem Laserscanner. Um die mathematischen Berechnungen und die grafische Darstellung der Messdaten zu realisieren, wurde die Programmiersprache Python gewählt. Die GUI des Tools wurde mithilfe von Tkinter umgesetzt.

5.1. Anforderung

Zielstellung des Laserscanner-Tools ist es, nach der Aufzeichnung der Messdaten einen weitestgehend automatischen Ablauf umzusetzen, der die Auswertung und Darstellung der Messdaten durchführt. Das Tool soll die Funktion haben, die zwei unterschiedlichen Messdatensätze einzulesen, die relevanten Informationen zu extrahieren und die Ergebnisse grafisch auszuwerten. Der erste Datensatz beinhaltet die Daten des Laserscanners. Diese sind in einem mat-File mit dem Namen „LidarTF03.mat“ gespeichert. Die Daten sind in einer Liste angeordnet, welche nach dem folgenden Format aufgebaut ist:

LidarTF03		

1	valid time	μ s
2	acquisition time	μ s
3	distance	cm

Tabelle 2: LidarTF03 Messdaten File

Jeder neue Entfernungswert wird mit der zugehörigen Erfassungszeit und Validierungszeit in eine neue Spalte der Tabelle eingetragen. Die relevanten Informationen sind die Erfassungszeit, welche den Zeitpunkt beschreibt, an dem die Messdaten an der Schnittstelle des Laserscanners erfasst werden und die Distanz.

Der zweite Datensatz beinhaltet die Daten aus dem IPS-Click Tool⁵. Diese sind in einem csv-File gespeichert. Jeder neue Punkt, welcher in das IPS-Click-Tool eingegeben wird, wird in einer neuen Zeile in dem File gespeichert. Die relevanten Informationen aus dem File sind „id_image“ als Zeitstempel zu dem Wert und „Z_meter“ als Entfernungswert.

Nachdem die Daten eingelesen und verarbeitet werden, sollen die Messdaten grafisch durch die GUI ausgewertet werden. Hierfür werden in einem Bild die jeweiligen

⁵ Beispieldatei im Anhang

5 Laserscanner Tool - 5.1 Anforderung

Entfernungswerte in Abhängigkeit des zugehörigen Zeitstempels abgebildet. In einem weiteren Bild ist die Differenz der Distanz des Laserscanners zu der trigonometrischen Lösung aus den Bildpaaren in Abhängigkeit der Entfernung dargestellt.

Neben der grafischen Auswertung sollen die jeweiligen Messwerte händisch ausgelesen werden. Hierfür soll ein Bereich der GUI erstellt werden, in welchem die Messwerte des mat-Files einzeln durchlaufen werden können. Wenn ein naheliegender Wert, bei dem die Differenz der Zeitstempel kleiner als 25000 ist, in dem csv-File vorhanden ist, dann sollen beide Werte untereinander angezeigt werden. Ebenfalls soll die Möglichkeit bestehen, einzelne Entfernungen über einen Zeitstempel zu suchen. Hierfür soll der nächstliegende Laserscanner Entfernungswert und davon abhängig ebenfalls der csv-Wert innerhalb des Datensatz anhand des eingegebenen Zeitstempels gesucht werden.

Eine weitere Funktion ist das Anzeigen von Statistiken. In den Statistiken soll die Gesamtzahl an Messwerten in dem csv-File und in dem mat-File angezeigt werden.

5.2. Funktion

Das folgende Unterkapitel beschreibt die Funktion des Laserscannertools. Es werden die einzelnen Bereiche der GUI und die jeweiligen Funktionen anhand von Screenshots genauer erläutert. In Abbildung 5.1 ist die GUI mit allen Funktionen abgebildet.

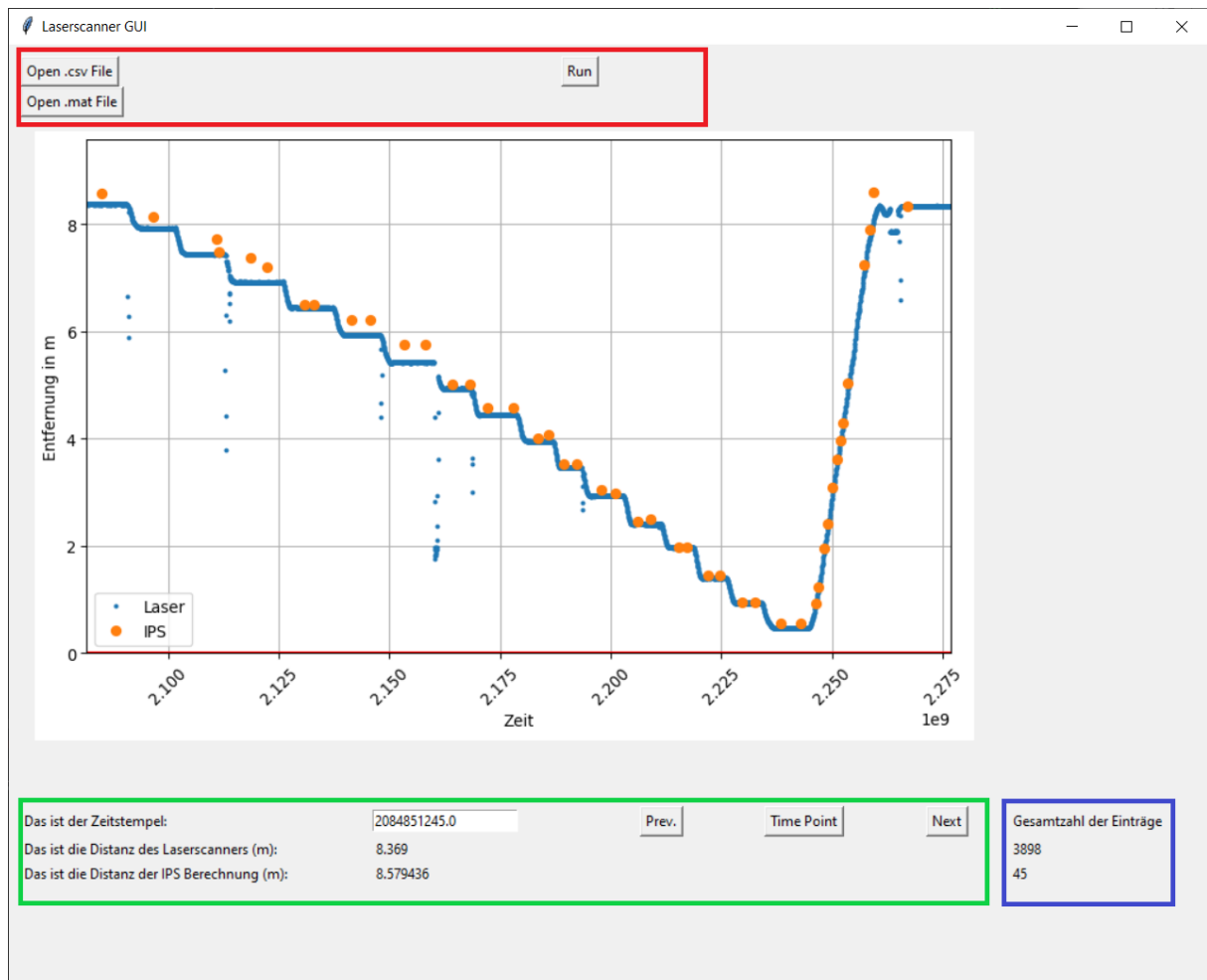


Abbildung 5.1: Laserscanner GUI

Oberhalb des Bildes sind zwei Buttons mit jeweils „Open .csv File“ und „Open .mat File“ (Abbildung 5.1 roter Bereich). Über die Knöpfe werden jeweils Auswahlfenster geöffnet, über die zu den jeweils gewünschten Messdaten navigiert kann, um diese auszuwählen. Der „Run“ Button startet die Berechnung und die Erstellung der Bilder. Sollte bei einem der beiden Inputs keine Datei ausgewählt worden sein, erscheint auf dem Bildschirm ein Warnfenster mit dem Hinweis: „Bitte eine gültige Datei auswählen“. Sobald der „Run“ Button betätigt wird, werden zwei Auswertungsbilder erstellt.

Das erste Bild (in Abbildung 5.1 zu sehen) zeigt die Entfernungen der Messmethoden in Abhängigkeit des Zeitstempels. In blauen Punkten dargestellt sind die Messwerte

5 Laserscanner Tool - 5.2 Funktion

aus dem mat-File, welche von dem Laserscanner stammen und in orangen Punkten dargestellt sind die Messwerte aus dem csv-File, welche die Daten aus der bildgestützten Methode liefert.

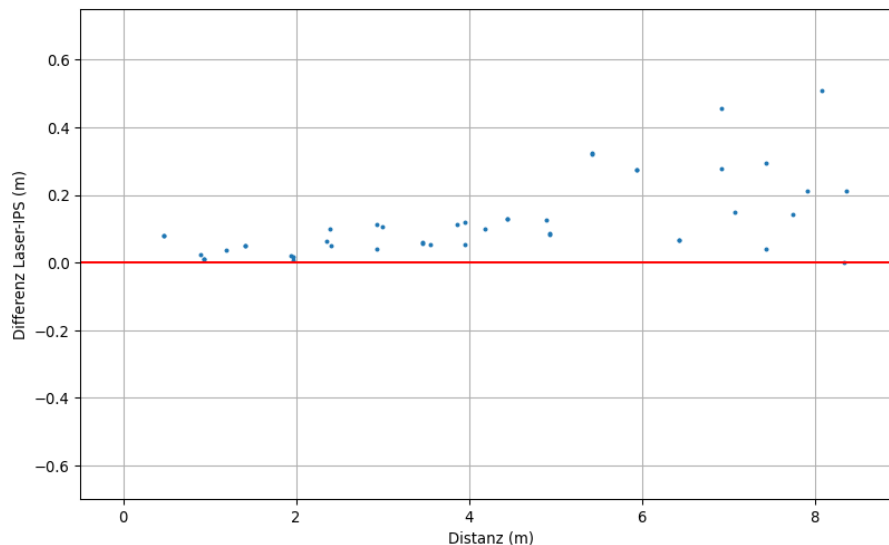


Abbildung 5.2: Auswertungsbild - Differenz in Abhängigkeit zur Distanz

Die zweite Abbildung (Abbildung 5.2) zeigt die Differenz des Laserwertes und des Wertes aus den Bildpaaren in Abhängigkeit zu der Distanz des Laserscanners.

Unterhalb des Bildes in der GUI ist der Bereich zu finden, über den mittels eines Eingabefeldes, zu einem Zeitstempel die nächstgelegenen Messwerte aus dem mat-File und wenn vorhanden aus dem csv-File ausgelesen werden kann.

In Abbildung 5.1 in grün markiert, ist der Bereich dargestellt, der erscheint, nachdem der „Run“ Button betätigt und die Berechnung durchgeführt wurde. In das Eingabefeld neben „Das ist der Zeitstempel:“ kann ein Zeitstempel aus der Messung eingetragen werden. Über den Button „Time Point“ wird der nächstgelegene Zeitstempel in dem mat-File gesucht und der zugehörige Entfernungswert angezeigt.

Das ist der Zeitstempel:	2084851245.0	Prev.	Time Point	Next
Das ist die Distanz des Laserscanners (m):	8.369			
Das ist die Distanz der IPS Berechnung (m):	8.579436			

Abbildung 5.3: GUI-Bereich zum Wertauslesen mit beispielhaften Entfernungswerten

In Abbildung 5.3 ist der Bereich für das Auslesen der Werte nachdem ein Zeitstempel eingegeben wurde, der sowohl ein Laserscanner Wert als auch ein zugehöriger Wert

aus der IPS-Berechnung anzeigt. Mit den Buttons „Prev.“ und „Next“ lässt sich jeweils der vorherige und der nachfolgende Wert aus dem mat-File laden und anzeigen.

Auf der rechten, unteren Seite der GUI (Abbildung 5.1) ist ein Bereich, in dem die Gesamtzahl der eingelesenen Werte aus dem mat-File und csv-File als Statistik angezeigt werden.

5.3. Umsetzung

In dem nachfolgenden Unterkapitel wird die Umsetzung des Tools und der einzelnen Funktionen erläutert. Die Umsetzung ist in drei Bereiche eingeteilt: das Einlesen der Daten, das Auswerten der Daten und das Auslesen spezifischer Entfernungswerte. Die Darstellung der Umsetzung erfolgt schematisch. Die Funktionen die aktiv durch den User betätigt oder aufgerufen werden, sind jeweils in Ellipsen dargestellt. Die Funktionen, die von dem Tool intern aufgerufen werden, sind in Rechtecken abgebildet und der Output des jeweiligen Bereiches wird in abgerundeten Rechtecken umgesetzt.

5.3.1. Einlesen der Daten

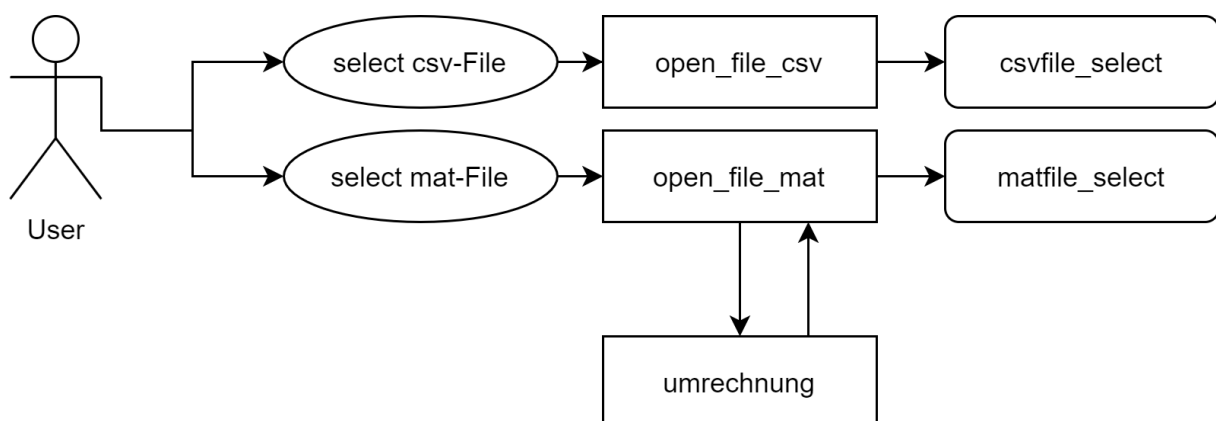


Abbildung 5.4: Schema - Einlesen der Daten

Das Einlesen des csv- und mat-Files wird über zwei separate Funktionen gelöst. Die Funktion `open_file_csv` wird aufgerufen, sobald der User über den Dateimanager die gewünschte Datei ausgewählt hat (siehe Abbildung 5.4). Die Funktion erstellt ein Dataframe der Python Bibliothek Pandas [13]. Aus dem csv-File werden die Informationen „id_image“ als Zeitstempel der Aufnahme und „z_meter“ als Entfernungswert gespeichert.

Aus dem mat-File werden die erste Zeile („valid time“) als Zeitstempel und die dritte Zeile („distance“) als Entfernungswert gespeichert. In der Funktion „umrechnung“

5 Laserscanner Tool - 5.3.2 Auswerten der Messdaten

werden die Laserscanner Werte angepasst. Zunächst wird der „distance“ Wert von Zentimetern in Meter umgerechnet, da der gelieferte Entfernungswert aus dem csv-File ebenfalls in der Maßeinheit Meter gespeichert wird. Anschließend werden alle Entfernungswerte, die 180 Meter betragen, aus der Liste gelöscht. Der Laserscanner gibt einen Entfernungswert von 180 Metern an, wenn er für die Messung kein gültiges Signal erfassen kann, es sich also um eine Fehlmessung handelt.

Um die Laserscanner-Werte in Koordinatenpunkte umzuwandeln, wird die in dem Kapitel 4.4.2 genannte Formel 4: Lasermesspunkt Berechnung verwendet. Jeder Entfernungswert wird mithilfe der Formel in einen Punkt umgewandelt und der jeweilige Z-Wert als neuer Entfernungswert in dem Datenframe gespeichert. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Entfernungswerte verglichen werden können.

„csvfile_select“ und „matfile_select“ beinhalten abschließend jeweils den z-Wert eines Messpunktes als Entfernungswert und einen Zeitstempel als zeitliche Referenz.

5.3.2. Auswerten der Messdaten

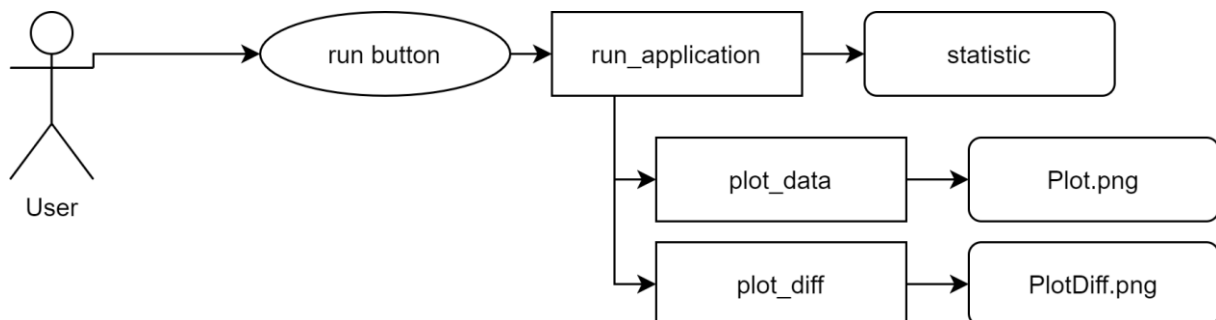


Abbildung 5.5: Schema - Auswerten der Messdaten

Die Auswertung der Messdaten wird über die Methode „run_application“ aufgerufen (siehe Abbildung 5.5). Nach dem Einlesen der Daten betätigt der User den „Run“ Button des Tools. Wurden bei der Auswahl der Messdaten keine Dateien ausgewählt, wird der User mit Warnfenstern darauf hingewiesen, dass keine gültige Datei ausgewählt wurde. Nach der Betätigung des Buttons wird die Funktion „run_application“ aufgerufen, die wiederum zwei Funktionen aufruft. Die Funktion „plot_data“ erstellt das Bild, welches die Messdaten aus dem mat-File und aus dem csv-File in Abhängigkeit der jeweiligen Zeitstempel darstellt. Dieses Bild wird in dem Dateordner unter dem Namen Plot.png abgelegt und in der GUI des Tools dargestellt. Die Funktion „plot_diff“ erstellt ein Bild, in dem die Differenz der Messwerte in

Abhängigkeit der Entfernung dargestellt ist (als Beispiel Abbildung 5.2). Neben den Bildern werden in der Funktion „run_applikation“ die Statistiken, für die Gesamtzahl an Einträgen in dem csv- und mat-File, auf der GUI ausgegeben.

5.3.3. Auslesen spezifischer Entfernungswerte

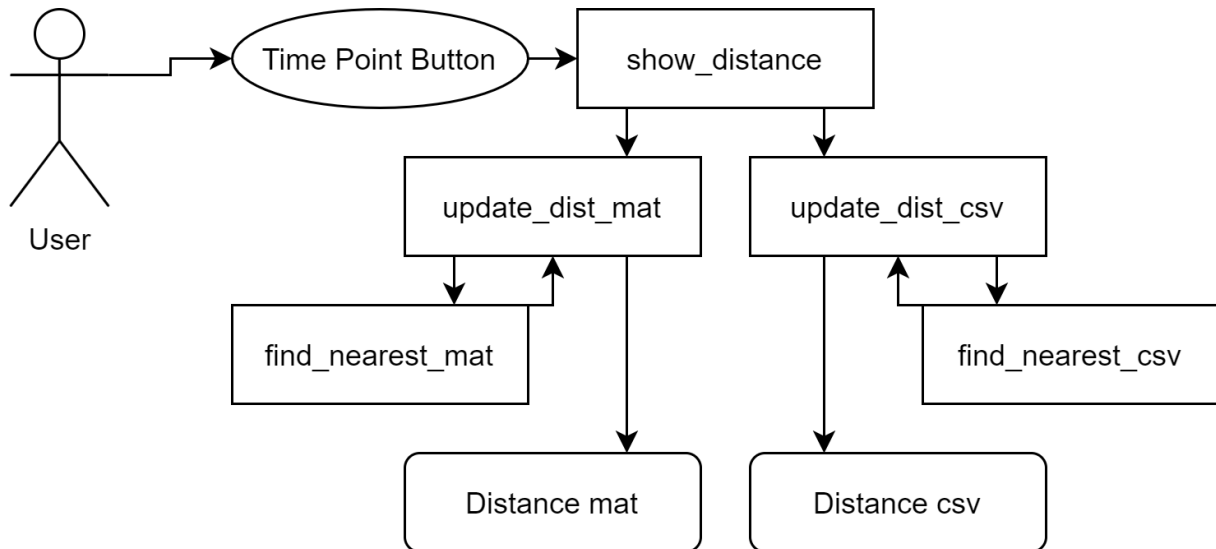


Abbildung 5.6: Schema - Auslesen spezifischer Entfernungswerte

Nach dem Auswerten der Messdaten ist dem User die Möglichkeit gegeben, dass über die Eingabe eines spezifischen Zeitstempels konkrete Entfernungswerte angezeigt werden können (siehe Abbildung 5.6). Nach der Eingabe des Zeitstempels und dem Betätigen des „Time Point“ Button wird die Funktion „show_distance“ aufgerufen. Falls kein Zeitstempel eingetragen ist, erscheint ein Warnfenster. Von der Funktion „show_distance“ werden zwei Unterfunktionen aufgerufen. Die Funktion „update_dist_mat“ ermittelt über die externe Funktion „find_nearest_mat“ den Laserscanner Wert, der dem eingegebenen Zeitstempel am nächsten liegt. Dieser Entfernungswert wird auf der GUI ausgegeben. Die zweite Funktion „update_dist_csv“ bestimmt über die externe Funktion „find_nearest_csv“ den IPS-Wert, welcher am nächsten an dem gewünschten Zeitstempel liegt. Zusätzlich wird überprüft, ob die Differenz zwischen dem gewünschten Zeitstempel und dem naheliegendsten Zeitstempel kleiner gleich 25000 ist. Hierdurch wird erreicht, dass ein zugehöriger Wert aus der Bildberechnung nur einmal angezeigt wird und nur, wenn der Messwert zeitlich innerhalb der benachbarten mat-Werte liegt. Es wird verhindert, dass ein csv-Wert angezeigt wird, der nach dem Zeitstempel erst z.B. 30 Sekunden später und dementsprechend mit einer anderen Entfernung aufgenommen wurde. Wird kein csv-

5 Laserscanner Tool - 5.3.3 Auslesen spezifischer Entfernungswerte

Wert innerhalb der gewünschten Differenz gefunden, wird ein Balken ausgegeben, der verdeutlicht, dass kein passender Wert vorhanden ist.

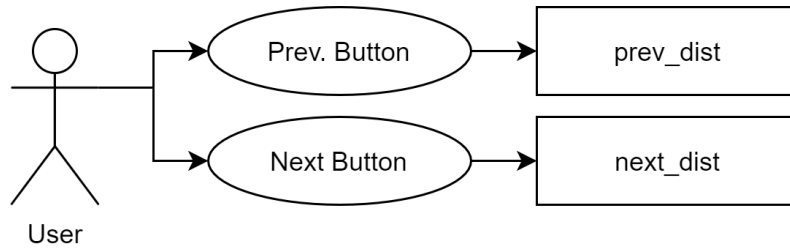


Abbildung 5.7: Schema - Nächste und Vorherige Distanz anzeigen

Der User hat die Möglichkeit über die Buttons „Prev.“ Und „Next“ jeweils sich den nachfolgenden und vorherigen Laserscanner Wert und gegebenenfalls den Wert aus der Bildberechnung anzeigen zu lassen (siehe Abbildung 5.7). Die Funktion „prev_dist“ aktualisiert den ausgegebenen Entfernungswert des Laserscanners mit dem vorherigen in dem mat-File, setzt den Zeitstempel auf den zugehörigen Wert und ruft die Funktion „update_dist_csv“ auf, über die erneut abgefragt wird, ob ein naheliegender csv-Wert existiert. Ist der erste Wert des mat-Files ausgewählt und der „Prev.“ Button wird erneut betätigt, wird weiterhin der erste Wert angezeigt.

Die Funktion „next_dist“ aktualisiert die Ausgabe der Entfernungswerte mit dem nachfolgenden Wert in dem mat-File, gibt den zugehörigen Zeitstempel aus und ruft die Funktion „update_dist_csv“ auf. Ist der Endwert des mat-Files erreicht und der Button „Next“ wird erneut betätigt, wird erneut der letzte Wert des Datensatzes angezeigt.

6. Verifikation

Das folgende Kapitel beschreibt die Messkampagne zur Überprüfung der Integrierung und Genauigkeit der Entfernungsberechnung aus den Bilddaten in Abhängigkeit zu den Laserscanner Messdaten. Das Ziel ist es, die Funktionalität der Integrierung und der Kalibrierung des Laserscanners zu überprüfen und die Entfernungswerte des Laserscanners mit den Entfernungswerten aus den Bilddaten zu vergleichen. Hierfür werden Messungen an zwei unterschiedlichen Umgebungen aufgenommen und ausgewertet.

6.1. Planung

Für die ersten Aufnahmen soll senkrecht auf eine Wand zugelaufen werden und der Sensorkopf in regelmäßigen Abständen auf dem Boden abgestellt werden. Dies stellt sicher, dass das System zwischenzeitlich über einen Zeitraum von mehreren Sekunden nicht bewegt wird. Hierdurch soll ermöglicht werden, dass zu einem konkreten Laserscanner Wert mehrere Bildentfernungswerte aufgezeichnet und ausgewertet werden können.

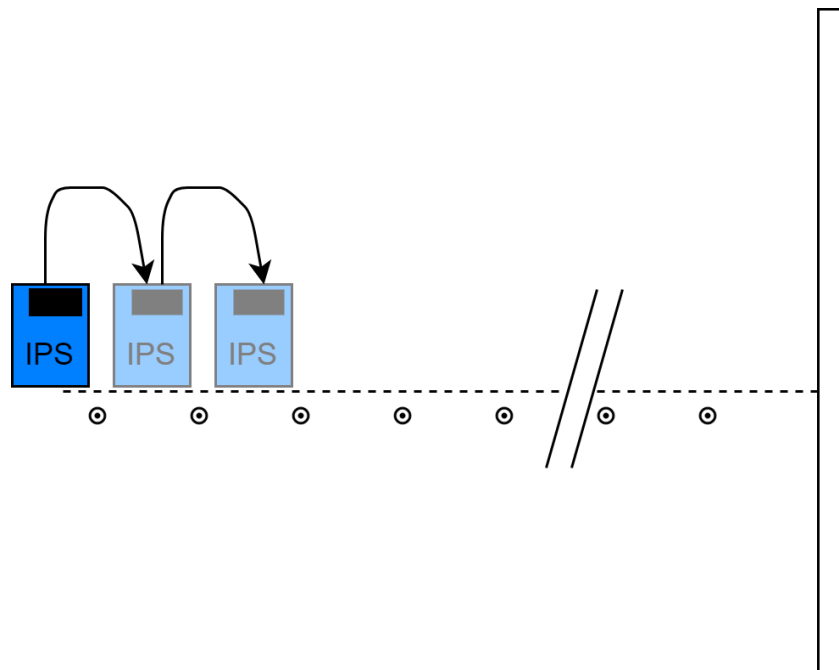


Abbildung 6.1: Schema - Messkampagne zur Verifikation

Um die regelmäßigen Abstände zu ermöglichen, wurde auf dem Boden alle 50 Zentimeter eine Markierung angebracht. Für die Distanz zwischen 8,5 Metern und 0,5 Meter wurden 17 Messpunkte markiert. In Abbildung 6.1 ist die Messkampagne

6 Verifikation - 6.1 Planung

schematisch dargestellt. Das IPS wird mit Blickrichtung senkrecht auf die Wand positioniert und an jeder Markierung für ca. 10 Sekunden auf dem Boden abgestellt. Über die Messungen soll herausgestellt werden, ab welcher Distanz die Methode über die Bilddaten an Genauigkeit abnimmt.

Die zweite Umgebung soll einen realistischen IPS Lauf simulieren. Bei den meisten IPS-Läufen wird der Sensorkopf durchgehend bewegt und nimmt so beispielsweise einen Gebäudebereich inklusive von Zimmern, Gängen und Treppenhäusern auf. Die Schwierigkeit bei dieser Art von Messungen liegt darin, dass die Kameras und auch der Laserscanner von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst werden. Die Kameras können auf Belichtungsverhältnisse treffen, welche das Aufnehmen von Bildern beeinflussen. Der Laserscanner kann auf unterschiedliche Materialien treffen, welche das Messverhalten verfälschen können⁶. Um neben einer detaillierten Einschätzung der Entfernungswerte beider Messmethoden durch die erste Umgebung auch die genannten Faktoren zu untersuchen, wurde eine Messung in der zweiten Umgebung durchgeführt.

⁶ Detaillierte Betrachtung zu unterschiedlichen Materialien sind in dem Paper im Anhang aufgeführt.

6.2. Durchführung

Für die Durchführung wurde die Umgebung wie in Unterkapitel 6.1 beschrieben vorbereitet.

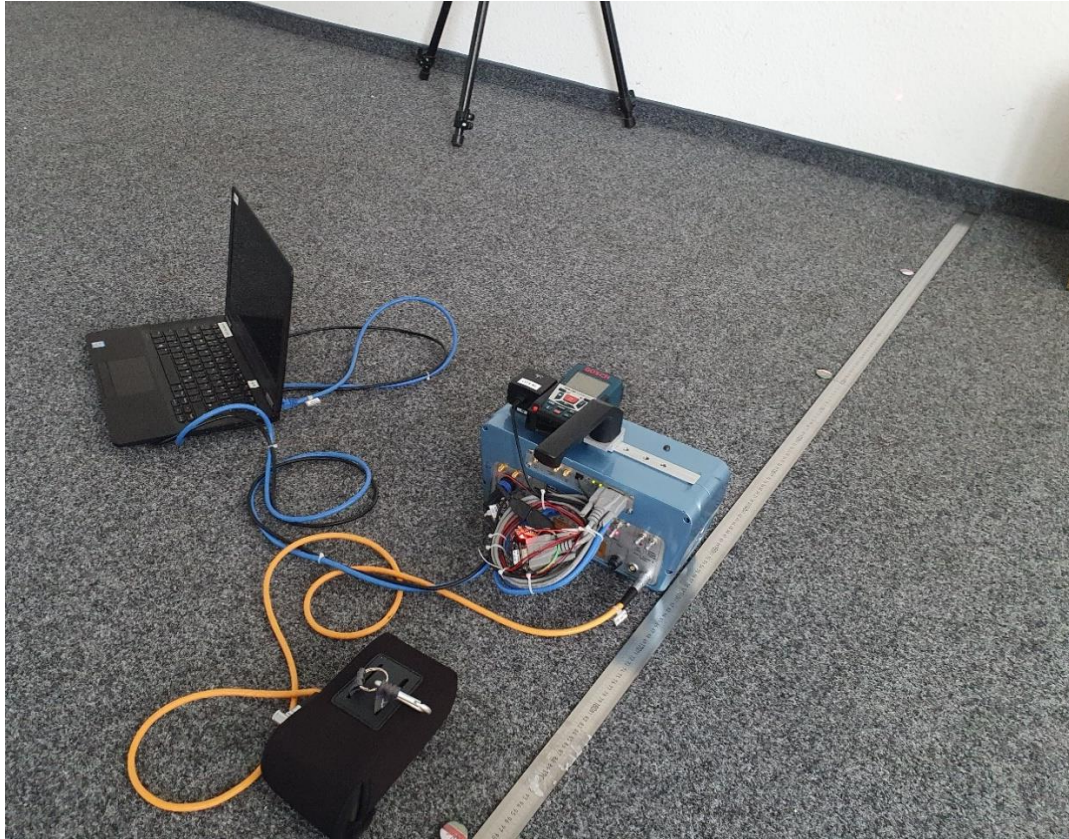


Abbildung 6.2: Durchführung der Validierungsmessungen

Der Ausgangspunkt der Messungen ist ein Punkt mit Blickrichtung des Systems auf die Wand in einer Entfernung von 8,5 Metern. Nach einer Pause von ca. 10 Sekunden, wird das IPS angehoben, zur nächsten Markierung bewegt und an dieser wieder abgestellt. Bei dem Wechsel der Position wurde darauf geachtet, dass der Laserstrahl des Laserscanners möglichst senkrecht auf die Wand zeigt. Dieser Vorgang wird bis zur letzten Markierung vor der Wand wiederholt. In Abbildung 6.2 ist die Position des Sensorkopfes mit dem benötigten Equipment während der Ruhephase bei dem Abstellen dargestellt.

6 Verifikation - 6.2 Durchführung



Abbildung 6.3: IPS-DataCheck 1.Messung

In Abbildung 6.3 ist der erste Datensatz mit Hilfe eines Auswertungstools (IPS-DataCheck, Version 1.159) dargestellt, welches für die Auswertung der Messungen in dem Rahmen dieser Arbeit von einem Kollegen zur Verfügung gestellt wurde. Zu sehen sind das erste Bild Paar, im oberen Bereich und im unteren Bereich sind die Entfernungswerte des Laserscanners grafisch geplottet. Die deutlich kürzeren Messwerte welche in der ersten Hälfte immer zwischen den Stillstands-Phasen zu erkennen sind, entstehen durch das Anheben des IPS. Hierbei wird der Sensorkopf leicht nach unten gekippt, wodurch der Messstahl des Laserscanners dann nicht mehr auf die Wand, sondern den Fußboden vor der Wand trifft. Hierdurch werden kurzzeitig geringere Distanzen aufgezeichnet.

Der Rückweg von der Wand bis zur Ausgangsposition der Messung wird in einer durchgehenden Bewegung ausgeführt. Ziel hiervon ist ebenfalls zu erfassen, wie die

6 Verifikation - 6.3 Bewertung

zeitliche Zuordnung der Messdaten des Laserscanners zu den Bilddaten und damit zu der trigonometrischen Lösung der Entfernungsberechnung funktioniert.

Die beschriebene Messung wurde insgesamt drei Mal durchgeführt, um die Aussagekraft der Messwerte und der folgenden Auswertung zu verstärken. Zusätzlich zu den drei Messungen an der Wand wurde eine weitere Messung durchgeführt. Für die vierte Messung wurde eine „typische“ Messung mit dem IPS simuliert. Hierbei wurde das Gerät aus dem Raum getragen, einen Gang des Gebäudes hin und zurück und zusätzlich durch ein Treppenhaus in eine obere Etage. Nach diesem Rundgang wurde das System ebenfalls wieder am Ausgangspunkt der Messung abgestellt. Durch diese Aufnahme sollte für den Laserscanner eine realistische Verwendung erstellt werden, um die Funktionalität auch während der Bewegung des Sensorsystems und unter unterschiedlichen Lichtbedingungen zu testen.

6.3. Bewertung

Nachfolgend werden die erfassten Messdaten der vier Aufzeichnungen ausgewertet. Zunächst werden die Messdatensätze grafisch verglichen. Es werden beide Messdaten in Abhängigkeit zu den zugehörigen Zeitstempeln als Diagramm dargestellt. Zusätzlich wird für die Messläufe eine Grafik für die Abweichung der beiden Messverfahren in Abhängigkeit der Entfernung erstellt. Abschließend werden Sonderfälle, die während der Messungen aufgetreten sind, betrachtet.

In Tabelle 3 sind die grundlegenden Informationen der vier Messläufe aufgelistet.

Name des Laufes	Länge des Laufes	Laserscanner Werte	IPS Werte
Lauf 1	3min, 14s, 900ms	3898	45
Lauf 2	2min, 32s, 500ms	3050	45
Lauf 3	2min, 30s, 800ms	3050	45
Lauf 4	2min, 2s, 800ms	2507	65

Tabelle 3: grundlegende Informationen Messläufe

In dem folgenden Abschnitt werden die Auswertungsbilder der GUI abgebildet. Die Messwerte des IPS sind in orangen Punkten und die Werte des Laserscanners in blauen Punkten dargestellt.

6 Verifikation - 6.3 Bewertung

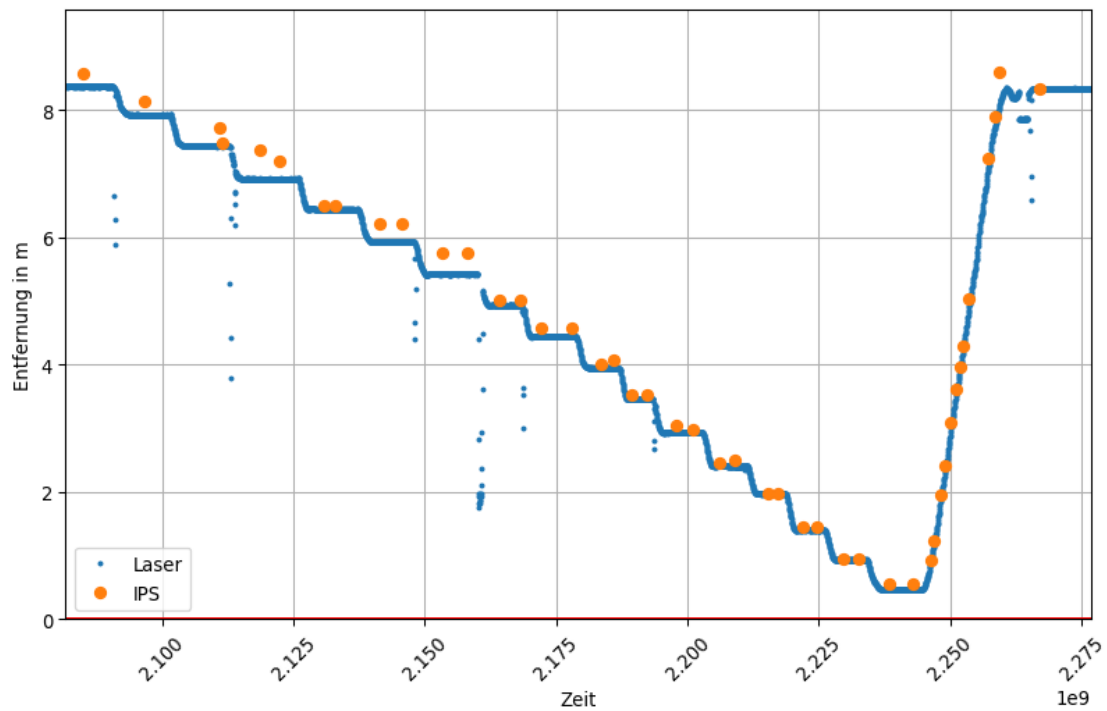


Abbildung 6.4: Messlauf 1 Entfernungswerte - Zeit

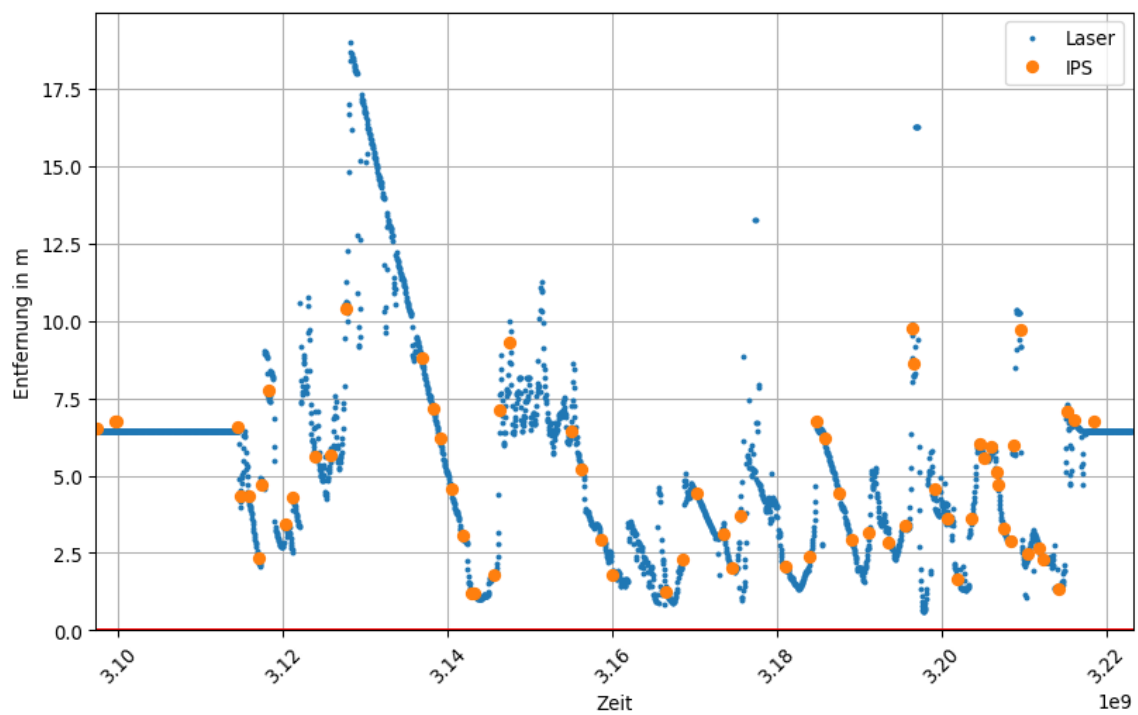


Abbildung 6.5: Messlauf 4 Entfernungswerte - Zeit

6 Verifikation - 6.3 Bewertung

Abbildung 6.4 zeigt die Entfernungswerte in Abhängigkeit der Zeitstempel der ersten Messung. Die Auswertungsbilder der Läufe zwei und drei sind im Anhang zu finden.

Zu erkennen ist die Stufenform der Laserscanner-Werte bei der Bewegung in Richtung der Wand. Durch das Abstellen des Gerätes wurde erreicht, dass die Messwerte des Laserscanners in den jeweiligen Abschnitten unverändert bleiben. Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, dass zu jeder Entfernungsstufe zwei unterschiedliche Bildwerte bestimmt werden können. Es lässt sich erkennen, dass die beiden Punkte meist einen identischen Wert liefern. Es gibt jedoch einige Fälle, in denen die beiden Werte jeweils unterschiedliche Entfernungen aufweisen. Die einzelnen Messpunkte des Laserscanners zwischen den abgestellten Werten sind, wie bereits beschrieben, auf das Ankippen des Gerätes und das Treffen des Messstrahls auf den Boden und nicht die Wand zurückzuführen. Bei der Bewegung von der Wand zurück zum Ausgangspunkt der Messung ist zu erkennen, dass die zeitliche Zuordnung der Messdaten während der Bewegung des Systems, also ohne eine Ruhephase von mehreren Sekunden, gewährleistet ist.

Ab einer Entfernung von ca. vier Metern ist zu erkennen, dass die IPS Werte leicht von den Entfernungswerten des Laserscanners abweichen. Eine detaillierte Auswertung dieser Abweichung erfolgt anhand der zweiten Auswertungsbilder des Laserscanner-Tools.

In Abbildung 6.5 sind die Messwerte der vierten Messung dargestellt. Nach einer längeren Standphase von ca. 16 Sekunden zu Beginn der Messung sind die Messdaten nach der Beschreibung in dem Unterkapitel 6.1 aufgezeichnet worden.

Nachfolgend werden ungewöhnliche Werte des vierten Messlaufes genauer untersucht. Hierbei handelt es sich um Sonderfälle, welche genauer betrachtet und erklärt werden.

Der erste Fall zeigt einen Mehrwert des Laserscanners ebenfalls Entfernungen zu bestimmen, wenn über die Bilddaten keine Erfassung möglich ist. Der zweite Fall entsteht durch das Auftreffen des Lasermessstrahls auf eine gläserne Oberfläche, wodurch die Entfernungswerte verfälscht werden. Der dritte ungewöhnliche Wert wird durch das kurzzeitige Auftreffen des Messstrahls auf eine Wand in größere Entfernung aufgezeichnet.

6 Verifikation - 6.3 Bewertung

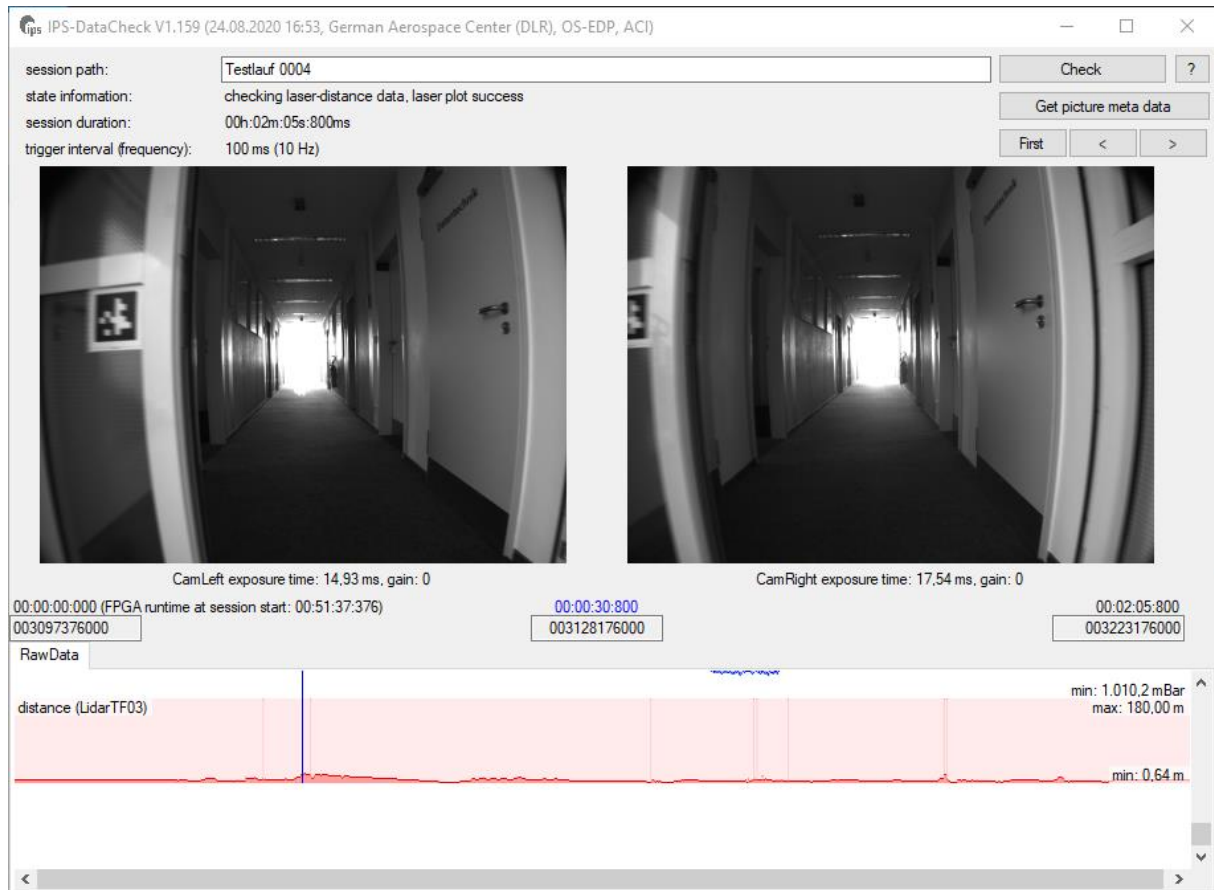


Abbildung 6.6: IPS-DataCheck Testlauf vier, Zeitstempel 3128176000

Die zu erkennende Schräge in Abbildung 6.5 zwischen den Zeitwerten 3,13 und 3,14 zeigt das Laufen auf das Ende eines Korridors zu, wobei der Lasermesspunkt immer auf das Ende dieses Korridors auftrifft und damit die Entfernung konstant abnimmt. In Abbildung 6.6 ist das Auswertungstool zu dem Zeitpunkt der maximalen Entfernung des Laserscanners während dieser Schräge abgebildet. Dieser Entfernungswert des Laserscanners beträgt 18,98 Meter an dem Zeitstempel 3128151711. Zu diesem Zeitpunkt wird deutlich, dass der Laserscanner auch Entfernungen bestimmt, wenn über die Bilddaten keine Ermittlung möglich ist. In diesem Fall werden die Bilder aufgrund von Gegenlicht aus einem Fenster beeinflusst, wodurch das Ende des Korridors nicht erfasst werden kann. Da der Laserscanner nur seine spezielle Wellenlänge an Strahlung erfasst, wird er von anderen Lichtquellen nicht beeinflusst.



Abbildung 6.7: Linkes Kamerabild der vierten Messung, Zeitstempel: 3177376000

Der abweichende Laserscanners Wert von 13,26 Meter bei einem Zeitstempel von 3177404089 ist durch das Auftreffen des Messstrahls auf eine Glaswand zu erklären. In Abbildung 6.7 ist das Bild der linken Kamera zu dem Zeitpunkt, als der Laserscanner Wert aufgenommen wurde abgebildet. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass der Laserpunkt zu diesem Zeitpunkt unter einem besonderen Winkel auf das Glas trifft, wodurch die Entfernung verfälscht wird.

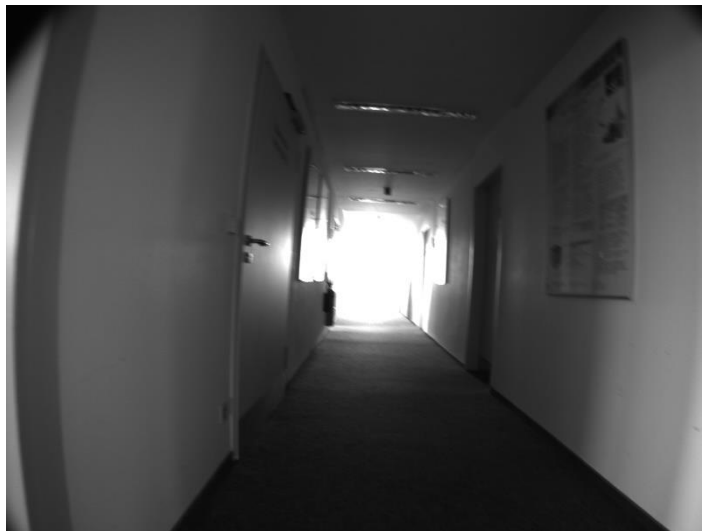


Abbildung 6.8: Linkes Kamerabild der vierten Messung, Zeitstempel: 3196876000

Der Entfernungswert des Laserscanner zu dem Zeitstempel 3196905028 beträgt 16,27 Meter. Hierbei handelt es sich in diesem Fall um keinen Messfehler, sondern erneut um den Korridor, welcher von dem Laserscanner gemessen werden kann, jedoch von den Kameras aufgrund von Gegenlicht nicht erfasst werden kann.

6 Verifikation - 6.3 Bewertung

Nachfolgend werden die Auswertungsbilder der Testläufe, welche die Differenz beider Messmethoden in Abhängigkeit der Entfernung darstellen, genauer betrachtet. Als erstes wird ein Bild aus dem ersten Versuchsaufbau gezeigt, gefolgt von dem Bild der zweiten Untersuchung.

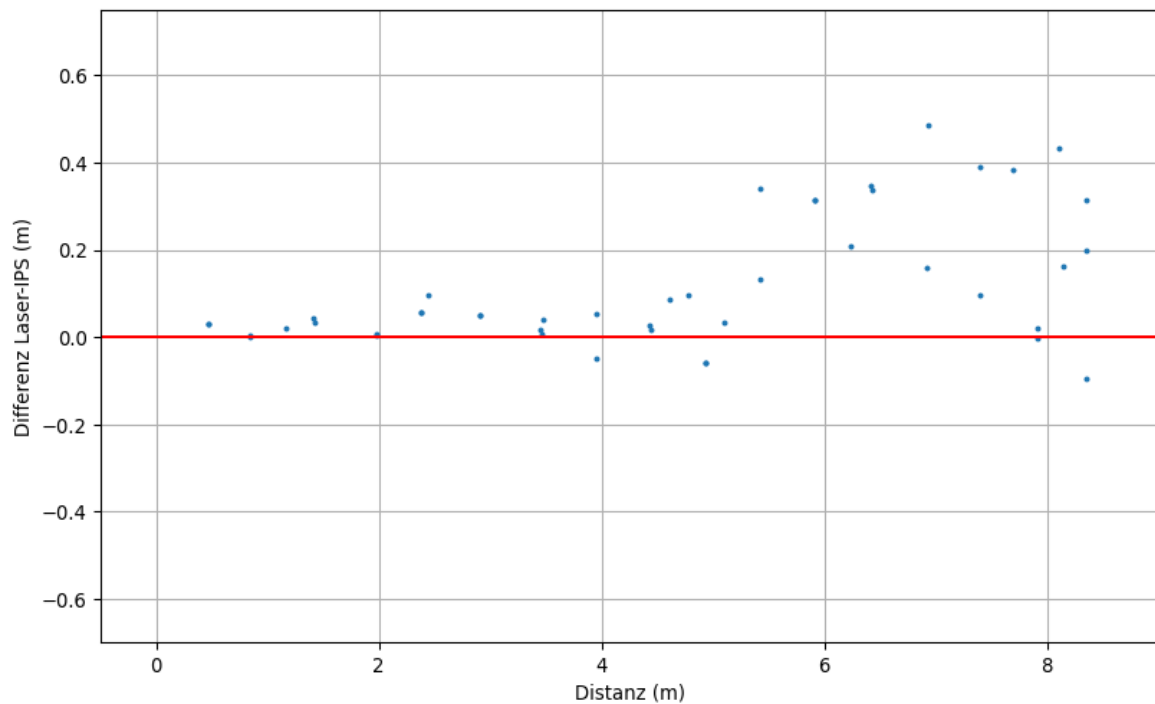


Abbildung 6.9: Messlauf 2 Differenz Laserscanner zu IPS - Entfernung

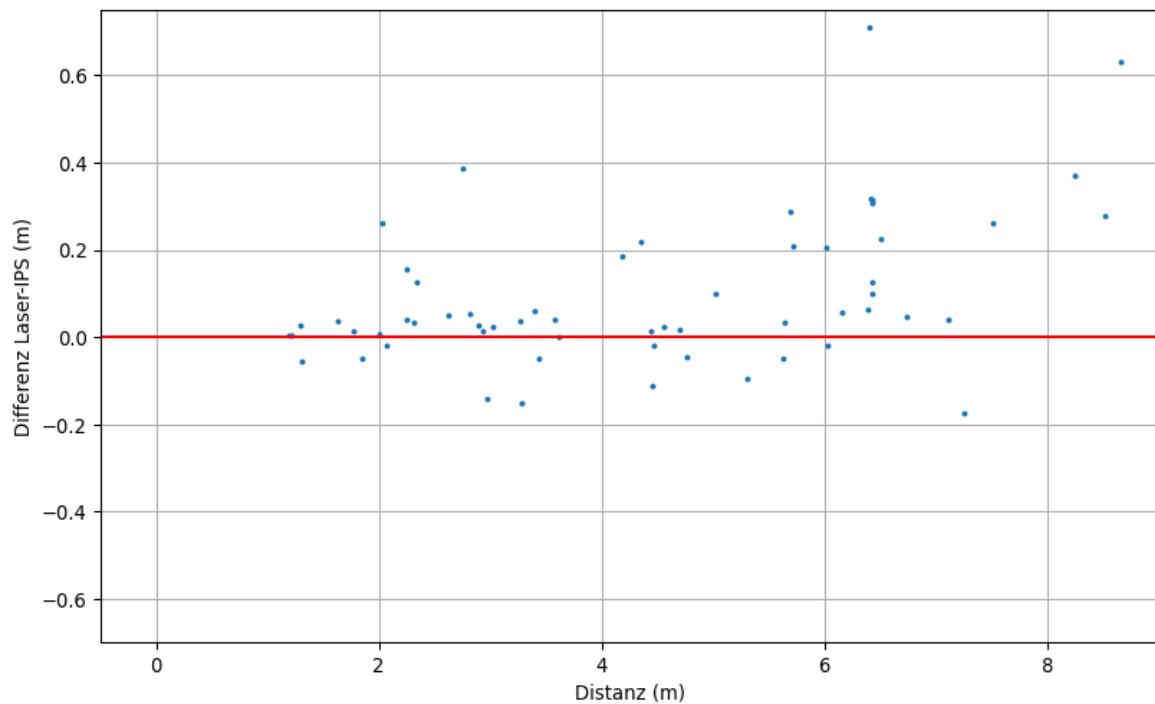


Abbildung 6.10: Messlauf 4 Differenz Laserscanner zu IPS - Entfernung

6 Verifikation - 6.3 Bewertung

In Abbildung 6.9 ist die Differenz der Entfernungswerte des Laserscanners von den Werten aus den Bildpaaren in Abhängigkeit zu der Entfernung dargestellt. Diese Darstellung zeigt die Messdaten der zweiten Messung. Die Bilder der ersten und dritten Messung befinden sich im Anhang. Auf dem Bild ist zu sehen, dass die Differenz zwischen den beiden Messwerten bis zu einer Entfernung von ca. fünf Metern kleiner als 15 Zentimeter ist. Bei größeren Entfernungen als ca. fünf Metern steigt die Differenz zwischen den Messwerten zum Teil auf einen Wert von 48 Zentimeter. Dies ist ein Hinweis, dass die Genauigkeit der rechnerischen Entfernungsbestimmung mit diesem Sensorkopf abnimmt. Ab ca. fünf Meter ist die Entfernungsbestimmung über den Laserscanner genauer.

In Abbildung 6.10 ist die Abweichung bei dem vierten Testlauf dargestellt. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Laserscanner Messwerten und den berechneten Werten aus den Bildpaaren bereits zwischen zwei und vier Metern eine Differenz von bis 20 Zentimetern aufweisen. Einzelne Grenzwerte weisen eine Differenz von ca. 39 Zentimetern auf. Der Großteil der Werte befindet sich innerhalb des Bereiches von weniger als 40 Zentimeter Abweichung. Die maximale Differenz weist ein Messwert bei ca. 6,5 Metern auf. Hier ist eine Differenz von ca. 70 Zentimetern aufgetreten. Die im Vergleich zu den Messungen eins bis drei leicht erhöhte Ungenauigkeit lässt sich auf die veränderte Durchführung zurückführen. Durch die Bewegung des IPS, das Auftreffen des Laserstrahls auf unterschiedliche Oberflächengegebenheiten und durch Messfehler bei der Erfassung der Bilddaten ist bei dem vierten Testlauf die Differenz zum Teil größer als bei den Messungen eins bis drei.

7. Diskussion

In dem folgenden Kapitel wird das Ergebnis der Arbeit diskutiert. Es werden die Ergebnisse interpretiert, aufgetretene Probleme erläutert und die Grenzen dieser Arbeit aufgezeigt.

7.1. Interpretation der Ergebnisse

Die gelieferten Ergebnisse zeigen, dass die Distanzbestimmung über Stereodaten mit zunehmender Entfernung einen steigenden Rechenfehler aufweist. Unter idealen Bedingungen, welche in Testlauf eins bis drei untersucht wurden, zeigt sich, dass ab einem Entfernungswert von ca. fünf Metern die Entfernungswerte der Bilddaten beginnen von den Werten des Laserscanners stärker abzuweichen. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei der Abweichung um einen zufälligen Fehler handelt. Es treten keine erkennbaren Muster bei der Abweichung auf, welche auf einen systematischen Fehler hinweisen würden. Ebenfalls gibt es auch bei größeren Distanzen IPS-Entfernungswerte, welche auf einige Zentimeter den Laserscanner-Werten entsprechen.

Hiermit bestätigt sich die Annahme, dass die Verwendung eines Laserscanners für die Entfernungsbestimmung genauer ist als die reine Bestimmung der Entfernung über Stereodaten.

Eine mögliche Erklärung der Ergebnisse ist, dass Aufgrund der Einschränkung durch die Hardware der Kameras und des limitierten Abstandes zwischen den Kameras die Genauigkeit der Bilddaten beschränkt ist. Würde die Möglichkeit bestehen, hochauflösende Kameras zu verwenden, oder den Abstand zwischen den Kameras zu vergrößern, könnte der Berechnungsfehler des Abstandes verringert werden. Jedoch würde durch andere Kameras oder einen größeren Basisabstand die Eigenschaften des IPS verändert werden, wodurch unter Umständen die Handhabung beeinträchtigt wäre. Um einen größeren Basisabstand zu ermöglichen müsste beispielsweise das Gehäuse des Sensorkopfes verbreitert werden, wodurch der Transport und die Handhabung während einer Messung beeinträchtigt wären. Wie diese Arbeit zeigt, kann die Erweiterung des Systems durch einen Laserscanner eine alternative Möglichkeit sein, genauere Entfernungswerte während einer Messung zu ermitteln.

7.2. Limitation der Untersuchung

Diese Untersuchungen dieser Arbeit beziehen sich auf die Verwendung eines unbeweglichen Einstrahl-Laserscanners. Es werden nicht die Möglichkeiten untersucht, die durch einen rotierenden Mehrebenen-Laserscanner gegeben wären. Durch das Verwenden eines Einstrahl-Laserscanners wird zu jedem Zeitpunkt nur ein Entfernungswert ermittelt. Hierdurch lässt sich, wie in der Arbeit gezeigt, eine Einschätzung der Genauigkeit der Entfernungsbestimmung über Stereodaten erstellen, jedoch ist es nicht möglich zu einem Aufnahmezeitpunkt mehrere Entfernungswerte gleichzeitig zu vergleichen. Hierdurch könnten die Einschätzung der Genauigkeit auf unterschiedliche Bereiche der Bilder erweitert werden.

Durch das Ermitteln der Entfernungswerte aus den Stereodaten über das Tool „IPSClick“ werden die Ergebnisse dieser Arbeit durch den Nutzer beeinflusst. Da die genaue Position des Laserscanner-Messpunktes von einem Menschen bestimmt wird, kann zusätzlich durch die Fehler in der Berechnung ebenfalls ein menschlicher Fehler auftreten. Der Nutzer kann durch nicht genaue Auswahl des Mittelpunktes die Ergebnisse verfälschen. Eine Möglichkeit für nachfolgende Untersuchungen wäre das Implementieren einer automatisierten Bestimmung der Entfernungswerte aus den Stereobildern, welche den Laserscanner-Werten zugeordnet werden können.

Da der verwendete Laserstrahl des Benewake-Lasers nicht mit dem menschlichen Auge zu erkennen ist und auf größere Entfernung bei vorhandenem Umgebungslicht ebenfalls nicht mehr in den Bildern des IPS zu erkennen ist, wurde wie in der Vorbereitung beschrieben der rote Laserpunkt des Bosch-Entfernungsmessers als Position des Messpunktes angenommen. Dies führt im Besonderen bei dem vierten Messlauf zu einem zusätzlichen Fehler, da bei diesem Versuch der Sensorkopf nicht senkrecht auf eine Wand ausgerichtet war. Durch das schräge Auftreffen beider Laserstrahlen kann es zu einem leicht verfälschten Entfernungswert des Laserscanners im Vergleich zu dem Stereowert, welcher auf dem roten Laserpunkt beruht, kommen. Um diesen Fehler in den Messungen eins bis drei zu minimieren, wurde der Sensorkopf senkrecht auf die Wand ausgerichtet, wodurch keine Änderung der Entfernung durch die leicht versetzte Position der Messpunkte entsteht.

Ein zusätzliches Problem ist bei der Bestimmung der Entfernungsdaten aus den Stereobildern aufgetreten. Bei dem Auswerten der Daten des vierten Messlaufs mit

7 Diskussion - 7.2 Limitation der Untersuchung

dem IPSClick-Tool ist regelmäßig die Problematik aufgetreten, dass die Anwendung den geklickten Punkt nicht als geeignete Stelle erkannt hat. Das bedeutet, dass der Algorithmus keine Triangulation zu diesem Punkt berechnen kann, wodurch keine Koordinaten ermittelt werden können. Der sichtbare Mittelpunkt des Laserscanners konnte so nicht als verwertbarer Entfernungswert verwendet werden. Zum Teil konnte in unmittelbarer Umgebung des sichtbaren Laserpunktes ein geeigneter Punkt durch Klicken gefunden werden, welcher dann verwendet werden konnte. Mit zunehmender Entfernung trat diese Problematik häufiger auf, sodass es in den Datensätzen Zeitpunkte gibt, zu den kein passender Entfernungswert bestimmt werden konnte.

8. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Tiefeninformationen aus Stereobildern des IPS mit Entfernungswerten eines Laserscanners verglichen. Hierfür wurde der Laserentfernungsmesser in den Workflow des IPS integriert und örtlich referenziert. Das Unterkapitel 8.1 fasst die durchgeführten Arbeitsschritte zusammen und in dem Unterkapitel 8.2 wird ein Ausblick auf weiterführende Möglichkeiten mit dem Laserscanner gegeben.

8.1. Zusammenfassung

Durch die erfolgreiche Integrierung des Laserscanners über den FPGA des IPS wurde der Anforderungspunkt der zeitlichen Referenzierung der Laserscanner Daten, also die Zuordnung eines Zeitstempels zu dem Erfassen der Messdaten, erfüllt.

Die räumliche Referenzierung wurde über das Tool „IPSClick“ umgesetzt. Durch die Aufnahme von fünf Lasermesspunkten auf einer Wand in unterschiedlicher Entfernung wurden fünf Koordinatenpunkte ermittelt, über die zunächst eine Funktion ermittelt wurde, die den Verlauf des Laserscanner-Messstrahls beschreibt. Durch das Einsetzen der Entfernungswerte in die Vektorgleichung wurde der Nullpunkt des Laserscanners bestimmt.

Für die Auswertung der Messwerte wurde ein Tool programmiert, welches die Messwerte des Laserscanners einliest, mit der Kalibrierung umrechnet und grafisch mit den Messwerten aus der trigonometrischen Berechnung vergleicht. Das Tool verfügt über eine GUI, über welche der User die Messdaten einlesen, auswerten und konkrete Entfernungswerte nach dem Zeitstempel abfragen kann.

Für die Überprüfung der Arbeitsschritte in dieser Arbeit wurde eine Messkampagne durchgeführt. Es wurden insgesamt vier Testläufe aufgezeichnet. Dreimal wurde ein Versuch durchgeführt, bei welchem senkrecht auf eine Wand zugelaufen wurde. Durch diesen Versuch wurde die Differenz der beiden Messmethoden zwischen 8,5 und 0,5 Metern alle 50 Zentimeter untersucht. Der vierte Messlauf simuliert einen IPS-Messlauf bei normaler Verwendung. Hierbei wurde ein Rundlauf durch das Gebäude aufgezeichnet.

8 Fazit - 8.2 Ausblick

Die Auswertung der Messkampagne zeigt, dass die Messwerte der Bilddaten ab einer Distanz von ca. 5 Metern bei optimalen Bedingungen stärker abweichen von den Laserscanner-Werten, also dass die Ungenauigkeit ab diesem Wert zunimmt.

8.2. Ausblick

Durch das erfolgreiche Referenzieren eines Laserscanners und der Aussage, dass ein Laserscanner in der Entfernungsbestimmung ab einer Distanz von ca. 5 Metern genauer als die bildgestützte Entfernungsbestimmung ist, besteht die Möglichkeit, durch die Verwendung eines Mehrebenen-Laserscanners zeitgleich mehrere Entfernungswerte zu erfassen. Diese Entfernungswerte könnten in Zukunft verwendet werden, die Navigationslösung des IPS, welche grundlegend auf den Entfernungswerten der Stereobilder beruht, zu korrigieren. Hierdurch könnte die Genauigkeit der Navigation weiter verbessert werden.

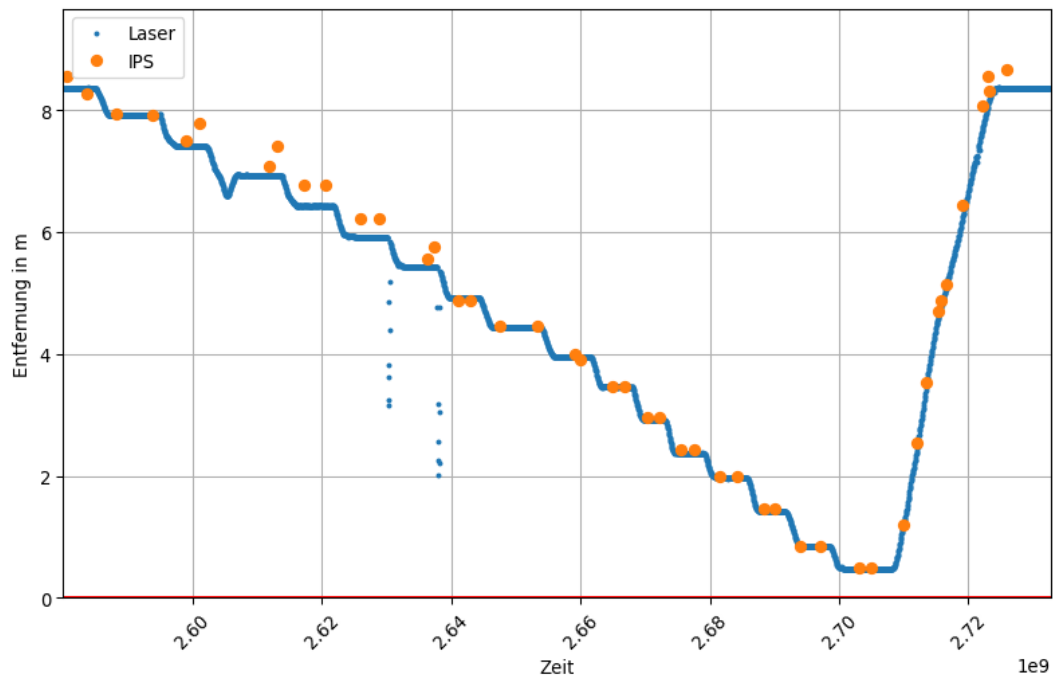
Das Tool, welches im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde, könnte um nachfolgende Funktionen erweitert werden. Über einen Reiter könnte zwischen den beiden Auswertungsbildern gewechselt werden, sodass die gesamte Auswertung in der GUI angezeigt werden können. Des Weiteren könnte die Auswertung von mehreren Messläufen gleichzeitig einen Mehrwert. Hierdurch könnte vor allem das zweite Auswertungsbild mehr Information über die Genauigkeit der beiden Messmethoden im Vergleich zueinander liefern.

Literatur- und Quellenverzeichnis

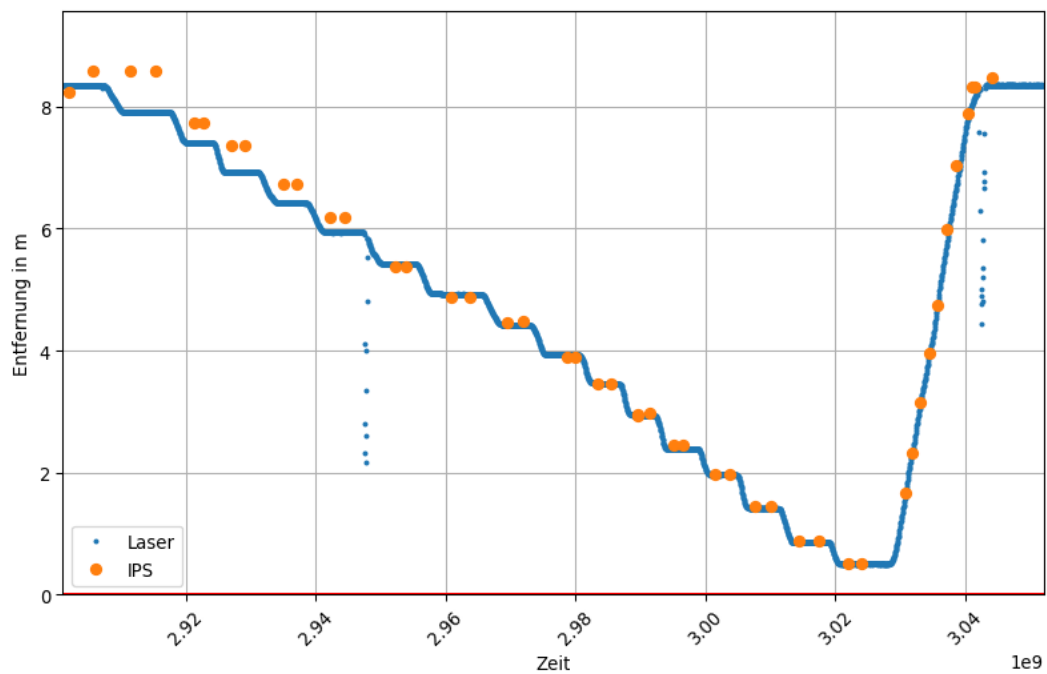
- [1] E. W. a. V. S. S. Grafarend, „Das global positioning system.,“ Physik Journal 1.1, 2002.
- [2] D. B. M. B. A. C. I. E. F. D. G. A. S. J. W. a. S. Z. Anko Börner, „IPS – a vision aided navigation system,“ 2017.
- [3] M. Kahner, „<https://www.michael-kahner.de/>,“ [Online]. Available: https://www.michael-kahner.de/c_laserentfernungsmesser.html. [Zugriff am 2020].
- [4] C. S. D. U. A. S. N. Mulsow, „Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems,“ Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, 2004.
- [5] D. Grießbach, „Stereo-vision-aided inertial navigation,“ Berlin, 2015.
- [6] M. Haberjahn, „Low-Level-Fusion eines Laserscanner- und StereokameraSystems in der Fahrzeugumfelderfassung,“ 2010.
- [7] „<https://de.wikipedia.org/>,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum.
- [8] „Impulsverfahren,“ [Online]. Available: <https://www.laserscanning-europe.com/de/content/impulsverfahren>.
- [9] „Phasenvergleichsverfahren,“ [Online]. Available: <https://www.laserscanning-europe.com/de/3d-laserscanner-kaufen>.

- [10 L. Benewake(Beijing)Co., „<https://acroname.com/>,“ [Online]. Available:
] [https://acroname.com/sites/default/files/assets/tf03_product_manual_v0.4_en.p
df](https://acroname.com/sites/default/files/assets/tf03_product_manual_v0.4_en.pdf).
- [11 R. B. GmbH, „<https://www.bosch-professional.com/>,“ [Online]. Available:
] [https://www.bosch-professional.com/de/de/pdf/productdata/glm-250-vf-
sheet.pdf](https://www.bosch-professional.com/de/de/pdf/productdata/glm-250-vf-sheet.pdf).
- [12 L. Papula, „Mathematische formelsammlung. Vol. 4.,“ Wiesbaden, Springer
] Fachmedien, 2017, p. 57.
- [13 „<https://pandas.pydata.org/>,“ [Online]. Available:
] [https://pandas.pydata.org/pandas-
docs/stable/reference/api/pandas.DataFrame.html](https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/reference/api/pandas.DataFrame.html).

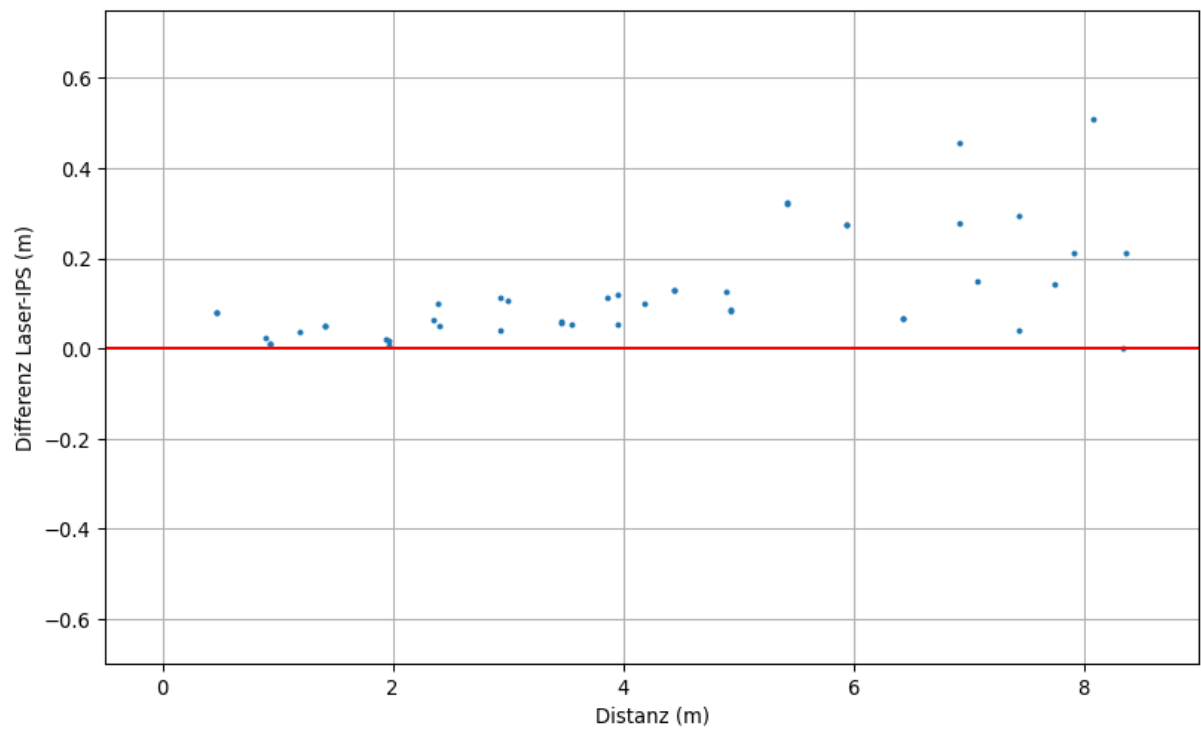
Anhang



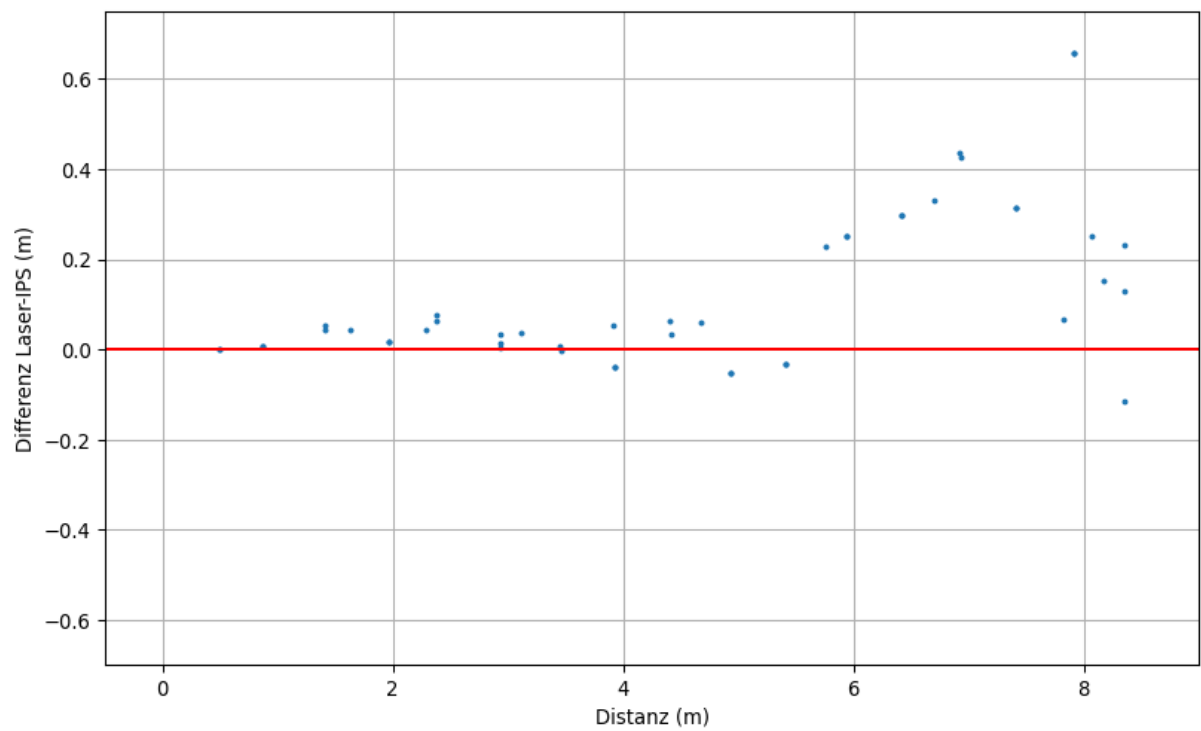
Messlauf 2 Entfernungswerte - Zeit



Messlauf 3 Entfernungswerte - Zeit



Messlauf 1 Differenz Laserscanner zu IPS - Entfernung



Messlauf 3 Differenz Laserscanner zu IPS - Entfernung

Beispielhaftes csv-File aus den Messungen

id tag	1	2	3
id_image	1,26E+0	1,27E+0	1,3E+09
uL_img	737309	838709	835329
vL_img	513564	511874	417234
uR_img	610	712	711
vR_img	503	501	405
xL_ncc	343691	166116	16279
yL_ncc	-411513	-436345	-167459
covL_11	0,00563	0,00564	0,00565
covL_21	-9,4E-07	-4,7E-06	-1,8E-05
covL_12	-9,4E-07	-4,7E-06	-1,8E-05
covL_22	0,00563	0,00563	0,00565
xR_ncc	-91689	40449	39449
yR_ncc	-5051	-53013	-17856
covR_11	0,00619	0,00618	0,00618
covR_21	9,27E-06	-4,3E-06	-1,4E-05
covR_12	9,27E-06	-4,3E-06	-1,4E-05
covR_22	0,00618	0,00618	0,00062
x_meter	51899	25137	24959
y_meter	-60954	-65271	-25699
z_meter	1509837	1513205	1533184
cov_11	0,00755	0,00124	0,01249
cov_21	0,00229	-0,0004	-0,01616
cov_31	-0,05715	0,09434	0,09654
cov_12	0,00229	-0,0004	-0,01616
cov_22	0,00688	0,00718	0,03924
cov_32	-0,04582	-0,04946	-0,20337
cov_13	-0,05715	0,09434	0,09654
cov_23	-0,04582	-0,04946	-0,20337
cov_33	11428	11545	12154

Untersuchung des Verhaltens eines Punktlaserscanners für die Entfernungsmessung

Immanuel Rettig

1. Einleitung

Das IPS - Integrated Positioning System ist ein System zur Selbstlokalisierung. Es ist ein Multisensorsystem und besteht grundlegend aus zwei Kameras und einer Initialen Messeinheit (Zusammenstellung aus Dreh- und Beschleunigungssensoren). Über die Kamerabilder in Verbindung mit den Beschleunigungs- und Drehdaten kann der zurückgelegte Weg rekonstruiert werden. Die Entfernungsmessung ist ein wesentlicher Bestandteil zu Ermittlung der Trajektorie.¹

Aufgrund der exponentiell steigenden Ungenauigkeit der Entfernungsbestimmung über die Bilder wird hier die unterstützende Verwendung ein Laserscanner untersucht. Die Entfernungswerte des Laserscanners könnten als Beispiel zum Vergleichen und gegebenenfalls korrigieren der Entfernungswerte aus dem Algorithmus verwendet werden.

Mithilfe der Untersuchungen soll eingeschätzt werden, ob der Laserscanner eine geeignete Genauigkeit aufweist. Die Anwendung des angedachten IPS-Sensorkopfes befindet sich meist in Umgebungen bis zu 20 Metern, wobei die maximal Tiefenbestimmung des Sensorkopfes aufgrund seiner Basisbreite und der Auflösung der Kameras bei ca. 8 Metern liegt. Hierfür wurde bei den Messungen mit dem Laserscanner ein besonderes Augenmerk auf diesen Entfernungsbereich gelegt.

Zusätzlich wird das Verhalten des Laserscanners bei unterschiedlichen Materialien und Winkeln während der Messungen untersucht.

2. Laserscanner

Der Laserentfernungsmesser Benewake TF 03 ist ein Punktlaserscanner mit einer Reichweite von 180 Metern. Die Entfernung wird über die Laufzeitbestimmung des ausgesendeten Laserimpulses zu der Oberfläche, auf die der Laserstrahl auftrifft, bestimmt. Der Laserscanner

verwendet eine Wellenlänge von ca. 905 Nanometern und liegt damit im Nahinfrarotbereich. Die Abtastfrequenz lässt sich wahlweise zwischen 1-1000 Hertz einstellen und gibt eine Entfernungsauflösung von 1 Zentimeter wieder. Der Messpunkt hat eine ovale Form und wird mit zunehmender Entfernung größer. So weist der Messpunkt bei 20 Metern eine Breite von 20 Zentimetern und eine Höhe von 6 Zentimetern auf ($50\text{m} \pm 50 \cdot 14\text{cm}$, $100\text{m} \pm 100 \cdot 28\text{cm}$, $150 \pm 150 \cdot 42\text{cm}$).²

3. Vorgehensweise

Für die Einschätzung wurden sechs verschiedene Messaufszenarien untersucht. Um die Entfernungswerte bei allen Messungen zu überprüfen, wurde zusätzlich ein Bosch-Laserscanner verwendet. Das Gerät verwendet für die Entfernungsmessung eine Pulsmodulation. Durch die Eigenschaften, dass eine Messung ca. ein bis zwei Sekunden dauert und eine Genauigkeit bis in den Millimeterbereich aufweist, handelt es sich um die Methode der Pulsmodulation. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden der Versatz, welcher in der Abbildung 1 zu erkennen ist, angepasst, sodass die Werte des Bosch-Laserscanner mit dem Benewake-Laserscanner direkt vergliche werden können.

¹ Genauere Informationen: **Data fusion algorithm for indoor navigation based on multi-sensor approach** (Baumbach, Dirk und Griessbach, Denis und Zuev, Sergey 2012 Sydney, Australia.

² Weblink: <https://www.manualslib.com/manual/1545160/Benewake-Tf03.html#manual>

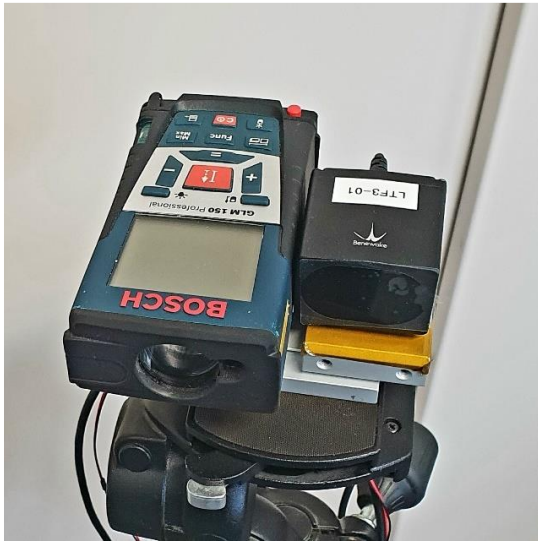


Abbildung 1: Benewake und Bosch Laserscanner

In Abbildung 1 ist der Messaufbau dargestellt.

Das Spektrum des Laserscanners ist nicht mit dem menschlichen Auge sichtbar. Um die Position des Messpunktes zu lokalisieren, wurde der sichtbare, rote Laserpunkt des Boschentfernungsmessers verwendet.

Es wurden Testbilder in unterschiedlichen Entfernungen mit einer Kamera aufgezeichnet, die zusätzlich Nahinfrarot empfindlich ist. Hierrüber konnte die Position bzw. der Verlauf des Lasermessstrahles im Vergleich zu dem roten Messpunkt bestimmt werden.



Abbildung 2: Lasermesspunkte Benewake und Bosch-Laser

In Abbildung 2 sind die Messstrahlen beider Geräte dargestellt. Der runde, obere Messpunkt (1) gehört zu dem Bosch-Laserscanner, der längliche untere Messpunkt (2) zu dem Benewake-Laserscanner. Diese Aufnahme wurde aus einer Entfernung der Laserscanner von ca. 4,5 Metern aufgenommen.

Aufgrund dieser Anordnung ist es für die nachfolgenden Untersuchungen nicht mehr zwingend erforderlich, die Position den Messstrahls mithilfe einer nahinfrarotfähigen Kamera zu ermitteln. Die Position kann über den sichtbaren Punkt des Bosch-Messgerätes abgeschätzt werden.

Verdecken des Laserstrahls

Für die Untersuchung, wie sich das Verdecken eines Teils des Laserstrahles auf die angezeigten Entfernungen des Laserscanners auswirkt wird ein Messaufbau benötigt, der eine konstante Position und Entfernung des Laserscanners beispielsweise zu einer Wand voraussetzt. Diese Entfernung wird als Basis der Messung betrachtet. Für das „Verdecken“ wurde ca. auf der halben Entfernung des Laserscanners zur Wand eine Holzplatte langsam in den Messstrahl und wieder hinausbewegt.

Die Messungen zeigen, dass auch bei langsamer Bewegung der Platte sprunghaft auf die neue Entfernung gewechselt wird. An den Wechselstellen ist kaum abrunden des Grafen zu erkennen.

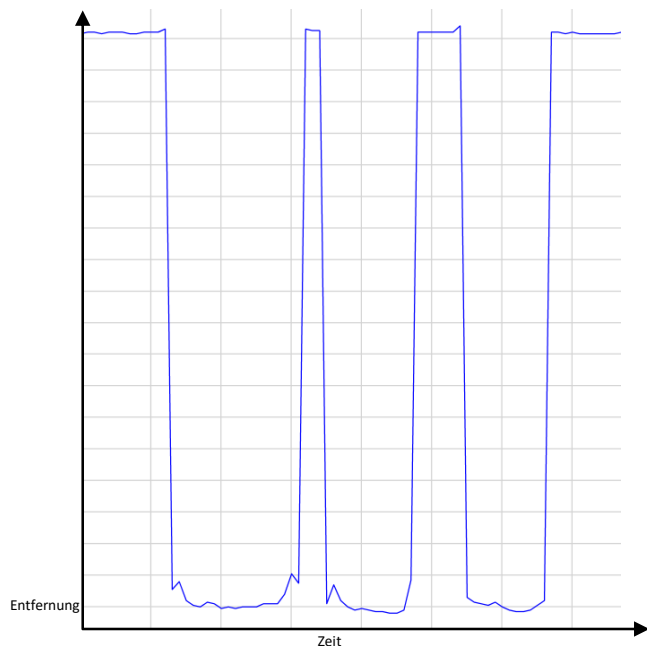


Abbildung 3: Messkurve Verdecken

In Abbildung 3 ist zu sehen, dass bei der dreimaligen Unterbrechung des Messtrahls die gemessene Entfernung sprunghaft wechselt. Dieses Phänomen tritt bereits auf, wenn ein kleiner Teil des Lasers (ca. 1/8 der Breite) verdeckt wird.

Das Verdecken des Laserstrahls bewirkt ein sehr sprunghaftes Wechseln der Entfernungen, es gibt keine Abrundung der Kurve mit Zwischenwerten. Ebenfalls zeigt die Messung, dass der Laserscanner intern die nur einen kleinen Teil des für die Messung verwendet. Hierbei werden immer die naheliegendsten Entfernungswerte verwendet. Es ist unerheblich, ob ein Teil der Werte deutlich größere Entfernungen zurückliefern.

Genauigkeitsbetrachtung

Um den Messfehler zu überprüfen, wurden zwischen 1 und 20 Metern 40 Vergleichsmessungen durchgeführt. Zusätzlich wurden über die Entfernung von 25, 29, 34, 63, 100 Metern Werte ermittelt, um ebenfalls die größeren Distanzen zu vergleichen.

Für die Durchführung wurde jeweils gleichzeitig ein Wert von beiden Messgeräten abgelesen.

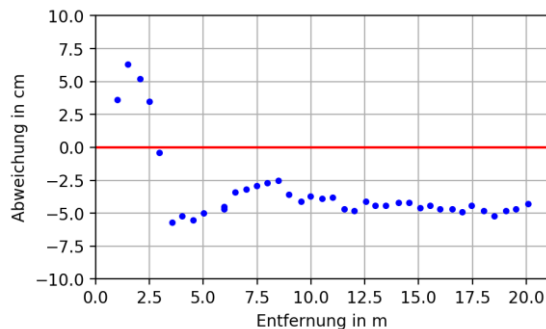


Abbildung 1: Abweichung Benewake zu Bosch

In Abbildung 4 sind die Abweichungen des Benewake-Lasers zu dem Bosch-Gerät zwischen 1 bis 21 Metern grafisch dargestellt. Die Messungen über die großen Distanzen ergaben ebenfalls Abweichungen von ca. zehn Zentimetern.

Der Laserscanner weist bei einer Großzahl der Messungen einen kleinen Fehler von ca. fünf Zentimetern auf. Bei der trigonometrischen Berechnung über die Bilder steigt der Entfernungsfehler exponentiell, während die Abweichung des Laserscanners annähernd gleichbleibt.

Oberflächenfarbgebung (hell/dunkel)

Ähnlich wie im sichtbaren Spektrum wird das Licht von hellen und dunklen Oberflächen unterschiedlich stark reflektiert. Helle Oberflächen reflektieren einen großen Teil des einfallenden Lichtes, während bei dunklen Oberflächen das Licht zum größten Teil absorbiert wird und nur ein kleiner Teil reflektiert wird. Ähnlich verhalten sich Lichtstrahlen um die 905 Nanometer. Helle Oberflächen weisen eine bessere Reflektion der Laserstrahlen auf als dunkle Oberflächen, wodurch sie mit den Laserscanner besser erfasst werden können. Um diesen Effekt zu dokumentieren, wurde in einer Entfernung von ca. 3,3 Meter eine schwarze Pappe an der Wand befestigt. Nachdem die Messaufzeichnung gestartet wurde, wurde ein weißes Papierblatt bei gleichbleibender realer Entfernung in den Messstrahl bewegt. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass der Benewake-Laserscanner einen Entfernungsunterschied aufzeigt. Die Messungen zeigen, dass die schwarze

Pappe einen Unterschied von plus sechs Zentimetern im Vergleich zu dem weißen Papier aufweist.

Die Oberflächenfarbgebung zeigt, dass die Oberflächenfarbe einen Einfluss auf das Messergebnis hat. Während helle Oberflächen genauer erkannt werden, tritt bei Oberflächen, die eine geringere Reflektion haben ein größerer Fehler auf. Dieses Verhalten lässt sich mit dem Ablauf im Lasersensor, der den reflektierten Strahl empfängt, erklären.

Der Sensor misst die empfangenen Wellen der Wellenlänge 905 Nanometer, die von der Laserdiode ausgesendet werden. Wenn der Sensor eine bestimmte Anzahl an Impulsen empfangen hat, also ein interner Grenzwert überschritten wurde, gibt dieser ein Signal an den Chip in dem Laserscanner, der die Zeit zwischen Absenden und Empfangen des Signales misst und einen Entfernungswert berechnet. Trifft der Laser auf eine gut reflektierende Oberfläche, so wird dieser Schwellenwert bereits überschritten, wenn der Laserimpuls noch nicht seine volle Intensität erreicht hat. Wie in Anhang 2 zu sehen, hat der Laserimpuls einen Kurvenverlauf, in welchem die Intensität stetig ansteigt, bevor die volle Intensität erreicht wird. Bei einer Oberfläche, die den Laserstrahl gut reflektiert, werden zum Beispiel bereits bei einer Intensität von 10 Prozent der Schwellenwert überschritten und das Signal an den Chip im Laserscanner wird gesendet. Trifft der Laserscanner jedoch auf eine Oberfläche, welche schlecht reflektiert, so wird zum Beispiel eine Intensität von 90 Prozent benötigt, um den Schwellenwert zu erreichen.

In der Beispielrechnung würde der Laserscanner nun den Weg den das Licht in der Zeit des Anstieges von 10 auf 90 % des Impulses als Fehler zu der angegebenen Entfernung addieren.

$$C_0 * 2,919ns = 0,875m$$

Zwei Objekte, die jeweils bei 10 bzw. 90% der Signalstärke den Schwellenwert des Sensors überschreiten, würden dann theoretisch einen Fehler von 88 Zentimetern aufweisen. Das gut reflektierende Objekt erscheint näher und das schlecht reflektierende weiter entfernt.

Glas

Da der Laserscanner bei dem Einsatz mit IPS auch auf Glas verwendet werden wird, beispielsweise bei Gebäudefenstern, wurde eine gesonderte Untersuchung in Verbindung mit Glas durchgeführt.

Für den Versuch wurde der Laserscanner in einer Entfernung von ca. 4 Metern senkrecht auf ein Fenster ausgerichtet. Um die Differenz zu dokumentieren, wurde wieder ein Blatt Papier auf Höhe des Glases in den Messstrahl bewegt. Das Ergebnis zeigt ähnlich wie bei

der Oberflächenfarbgebung einen Messfehler. Die angezeigte Entfernung bei Glas zeigt eine größere Entfernung und damit einen Messfehler von 5 cm. Bei den Messungen aus anderen Winkeln als 90° lässt sich kein eindeutiges Verhalten ableiten. Der Messstrahl wird an dem Glas in alle Richtungen gestreut, wodurch bei jeder Messung unterschiedliche Abweichungen entstanden sind. Bei den durchgeführten Versuchen hat die Abweichung jedoch nicht 10 cm überschritten.

Spiegel

Ähnlich wie bei Glas waren auch gesonderte Untersuchungen für das Verhalten bei Spiegeln notwendig. Es wurde insgesamt drei unterschiedliche Messaufbauten realisiert. Eine Untersuchung bei wurde bei 90° senkrecht auf den Spiegel durchgeführt. Bei der zweiten Messung wurde der Spiegel von 90° seitlich gedreht, wobei der Messpunkt den Drehpunkt dargestellt hat. Der dritte Aufbau wurde so gewählt, dass der gespiegelte Strahl auf unterschiedliche Entfernungen trifft.

Der erste Versuch mit dem senkrecht auf den Spiegel treffende Messstrahl weist gleiches Verhalten wie bei den Untersuchungen mit Glas auf, der Spiegel scheint weiter hinten zu liegen.

Für die erste Messung wurde ähnlich wie bei dem Glas-Versuchsaufbau der Laserstrahl senkrecht auf den Spiegel ausgerichtet. Unter dieser Bedingung weist der Spiegel identisches Verhalten wie mit Glas auf.

Der zweite Versuch dient der Untersuchung, welchen Einfluss unterschiedliche Winkel des Spiegels auf das Ergebnis der Messung haben. Als Ergebnis lässt sich die Entfernung zum Laser und ein zusätzlicher Fehler von bis zu 50 Zentimetern aufzeichnen. Dieser Fehlerwert ist positiv und erhöht damit die angezeigte Entfernung. Der Fehler tritt bei gleichen Messungen in ähnlicher Weise wiederholt auf.

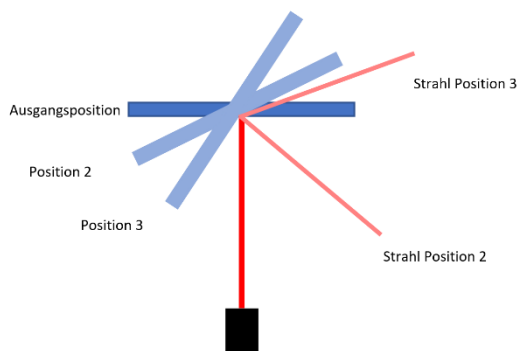


Abbildung 1: Aufbau und Durchführung Spiegeldrehung

In Abbildung 5 ist der Aufbau und die Durchführung des zweiten Versuches dargestellt. Die Entfernung zwischen

Laserscanner und dem Punkt wo der Laserstrahl auf den Spiegel trifft, bleibt unverändert. Der Strahl wird an dem Spiegelpunkt in alle Richtungen gestreut, ein Teil geht dabei direkt in den Laserscanner zurück, und ein Teil geht nach dem Reflexionsgesetz weiter zur nächsten Oberfläche. Diese beiden Strahlenanteile haben Einfluss, auch die gezeigte Entfernung des Laserscanners. Der Anteil der einzelnen Bestandteile ändert sich in Abhängigkeit des Winkels.

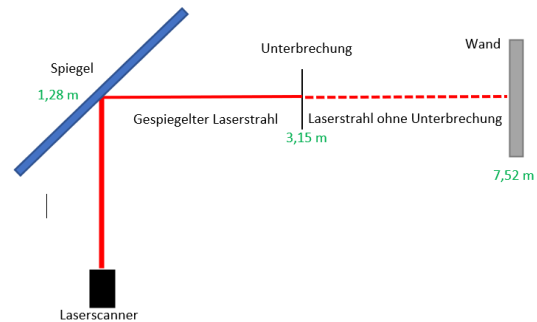


Abbildung 2: Spiegel mit Unterbrechung

Der dritte Versuch wurde wie in Abbildung 6 dargestellt durchgeführt. Die Entfernungen betragen vom Laserscanner ausgemessen: zum Spiegel 1,28 Meter, zur Unterbrechung 3,15 Meter (über den Spiegel) und ohne Unterbrechung zur Wand 7,52 Meter. Der Laserstrahl wird unter einem Winkel von ca. 45° auf den Spiegel ausgerichtet. Während der Messung wird der Messstrahl nach dem Spiegel unterbrochen.

Dieser Versuch dient zum Nachweisen, dass der nach dem Reflexionsgesetz gespiegelte Strahl ebenfalls ein Einfluss auf das Ergebnis des Laserscanners hat. Ohne dass die Entfernung vom Laserscanner geändert wird, ändert sich die berechnete Entfernung durch den Laserscanner in Abhängigkeit der Entfernung hinter dem gespiegelten Strahl.

Für den Wert bis zur Unterbrechung gibt der Laserscanner einen Wert von 1,42 Metern und damit eine Abweichung von 14 Zentimeter an. Der Wert ohne Unterbrechung beträgt 1,79 Meter und zeigt damit ein Fehler von 37 Zentimeter.

Die Untersuchungen von Glas und Spiegel zeigen, dass die Wellenlänge 905 Nanometer in Bezug auf die Materialien anderes Verhalten als das sichtbare Licht aufweist. Der Messstrahl geht nicht fast ungehindert durch Fensterglas und wird auch nicht zu größtem Teil im Spiegel nach dem Reflexionsgesetz gespiegelt. Unterschiedliche Winkel bei Glas und Spiegel zeigen, dass annähernd ausreichend Licht direkt zum Sensor reflektiert wird, jedoch hat auch der gespiegelte Strahl einen Einfluss auf das Ergebnis, sodass Messungen auf Glas und Spiegel einen größeren Fehler als andere Materialien aufweisen können.

Signalanalyse

Um den Impuls des Laserscanners grafisch zu erfassen, wurde eine Fotodiode und einem Hochgeschwindigkeits-Oszilloskop eingesetzt. Hierdurch konnten weitere Eigenschaften des Laserscanners dokumentiert werden. Es konnte die Länge des Messimpulses von ca. 8 Nanosekunden und eine Anstiegszeit von 10 auf 90 % der Signalstärke von ca. 3 Nanosekunden aufgezeichnet werden.

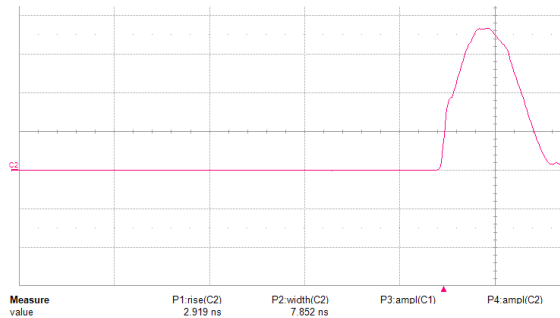


Abbildung 1: Oszilloskopaufnahme eines Messimpulses

In Abbildung 7 ist ein aufgezeichneter Impuls inklusive der Länge und Anstiegszeit zu sehen.

Ebenfalls über das Oszilloskop nachgewiesen wurde, dass der Laserscanner jeweils mehrere Messungen zu einem Ausgangssignal zusammenfasst, um die sensorbedingten Schwankungen zu reduzieren.

Der Sensor fasst immer 100 Messungen zu einem Ausgangssignal zusammen, sodass zum Beispiel bei einer Auslesefrequenz von 5 Hz Messimpulse in 500 Hz gesendet werden. Diese Methode nennt man Oversampling. Die Obergrenze der Messimpulse liegt bei 10 kHz, sodass alle Auslesefrequenzen über 100 Hz nur mit 10 kHz gemessen werden.

4. Auswertung

In Bezug auf die Genauigkeit ist der Laserscanner eine unterstützende Erweiterung für das Integrated Positioning System. Die Messwerte des Laserscanners zeigen eine geringe Abweichung der tatsächlichen Entfernung, wodurch diese Werte einen geeigneten zusätzlichen Input für das IPS bedeuten.

Das Verdecken des Laserstrahls bewirkt ein sprunghaftes Wechseln der Entfernungen. Wird der Laserscanner während einer Messung durch ein Objekt zum Teil unterbrochen, so wird als Messwert die neue Entfernung zum unterbrechenden Objekt gewertet.

Die Oberflächenfarbgebung zeigt, dass die Farbe der Oberfläche Einfluss auf das Messergebnis hat. Diese Abweichungen müssen bei der Verwertung der Messdaten gegebenenfalls berücksichtigt und korrigiert werden.

Die Untersuchungen von Glas und Spiegel zeigen, dass die Entfernungswerte des Laserscanners beim Auftreffen auf diese Materialien vor allem unter einem schrägen Winkel meist einen größeren Fehler aufweisen, wodurch die Messdaten gegebenenfalls nicht weiter verwendet werden sollten.

Durch diese unterschiedlichen Messszenarien wurde verschiedene Eigenschaften des Laserscanner erfasst und beschrieben, wodurch bei nachfolgenden Untersuchungen mit dem Laserscanner eine bessere Handhabung während der Messungen und Auswertung der Ergebnisse ermöglicht wird. Bei den Messungen sollte darauf geachtet werden, dass der Laserstrahl, wenn möglich nicht auf Glas oder Spiegel treffen sollte. Falls der Laserstrahl während der Messungen auf Glas trifft, so können die Werte nachfolgend korrigiert werden, um den Fehler auszugleichen.

5. Ausblick

Nachfolgend werden Möglichkeiten beschreiben, die nach einem erfolgreichen Kombinieren des Laserscanners und des IPS die Messungen der einzelnen Geräte und Messmethoden verbessern können.

Die Abweichungen bei dem Laserscanner, die bei der Oberflächenfarbe entstehen, könnten mithilfe von ausgelesenen Helligkeitsinformationen aus den Kamerabildern des IPS korrigiert werden. Hierfür müsste eine Tabelle erstellt werden, welche Farbhelligkeit im Durchschnitt welche Abweichung bei dem Laserscanner hervorruft. Über diese Tabelle könnten die Entfernungswerte des Laserscanners korrigiert werden, um die Abweichung zu verringern.

Für das IPS könnten die Entfernungswerte des Laserscanners verwendet werden, um die berechneten Entfernungen über die Stereobilder zu vergleichen und gegebenenfalls zu korrigieren. Entweder über eine Look-Up-Tabelle oder über Bildverarbeitung könnte der Messpunkt des Laserscanners lokalisiert und dann als Messpunkt für die trigonometrischen Berechnungen genommen werden. Die Look-Up-Tabelle müsste zu jedem Entfernungswert des Laserscanners in der rechten und linken Kamera die genauen Pixel auf dem Sensor aufzeigen, um so direkt über die Lage der Pixel die mathematische Berechnung für die Entfernungswerte aus den Bildern zu erhalten.

Zusätzlich könnten die Werte des Laserscanners in den Bereichen verwendet werden, wo die Entfernungsbestimmung über die Stereobilder aufgrund der Entfernung nicht mehr möglich ist. Hier würde der Laserscanner Werte liefern, die einen zusätzlichen Informationsgehalt der Messaufzeichnungen des IPS ermöglichen. Hierrüber könnten dann Bildpunkte

außerhalb der Reichweite des IPS mit Entfernungsinformationen verknüpft werden.

Die Ungenauigkeiten, die beim Auftreffen des Messtrahls auf Glas oder einen Spiegel auftreten, würden ein System erfordern, welches evaluiert, ob die gelieferten Messwerte verwendet werden können. Hierfür könnte man beispielsweise die Schwankung der Messwerte verwenden. Bei den Messungen auf Glas und Spiegel zeigten die Messwerte stärkere Schwankungen bis zu 20 Zentimetern, zwischen den einzelnen Ausgangssignalen, während bei Oberflächen wie Stein oder Papier die Messwerte meist ca. zwischen zwei Zentimetern schwanken.