

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

3D Kollisionsvermeidung in Alltagsumgebungen unter Verwendung eines PMD-Sensors

Bachelorarbeit an der
Hochschule Ulm
Fakultät Informatik
Studiengang Technische Informatik

vorgelegt von
Markus Stowasser

September 2009

Gutachter: Prof. Dr. Christian Schlegel
Zweitgutachter: Prof. Dr. Rüdiger Lunde

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht und mit genauer Quellenangabe dargelegt habe.

Ulm, den 31.8.2009

Markus Stowasser

Abstract

Die noch relativ neuen 3D Time-of-Flight Kameras zeigen ein großes Potential im Bereich der mobilen Roboter. Durch ihr Sichtfeld lösen sie Probleme vor allem bei der Kollisionserkennung und speziell bei Outdoor Robotern. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit den möglichen Verfahren der Hinderniserkennung in Innenräumen mit Hilfe einer 3D Time-of-Flight PMD Kamera, insbesondere mit einem Verfahren aus kombinierter Verwendung von PMD Kamera und Laserscanner, um eine besonders robuste kollisionsfreie Fahrt zu realisieren.

Dabei liegt der Fokus auf der nötigen Verarbeitungen der Daten auf Seite des PMD Sensors. Es wird die Anwendung von Glättungsfilttern und einem Filter für ungenaue Messwerte vorgestellt, durch welche eine Qualitätssteigerung der Hinderniserkennung zu erreichen ist. Desweiteren werden verschiedene Verfahren beschrieben, mit denen erfolgreich Messwerte der befahrbaren Fläche identifiziert werden, welche von den Messwerten der Hindernisse unterschieden werden müssen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind im Bezug auf alltägliche Hindernisse ermittelt.

Danksagung

Besonderer Dank geht an die beiden Masterstudenten Matthias Lutz und Andreas Steck, die mir nicht nur bei vielen Entscheidungen mit konstruktiver Kritik zur Seite standen, sondern auch gerne meine allgemeinen Fragen zur Bachelorarbeit beantworteten.

Des weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Schlegel, der mir trotz seines engen Terminkalenders seine Hilfe anbot.

Dank geht auch an meinen Nachbarn und Lehrer Manfred Till, welcher mir sein Wissen über Rechtschreibung und Grammatik bereitstellte.

Als letztes geht noch ein besonderer Dank an meine Freunde und Kommilitonen, mit denen ich auch während der Bachelorarbeit viel Zeit verbracht habe, Meinungen über die Bachelorarbeiten austauschen und Spaß haben konnte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	WAHRNEHMUNG MIT EINEM 2D LASERSCANNER	3
2.2	3D WAHRNEHMUNG DURCH ULTRASCHALL	4
2.3	WAHRNEHMUNG MIT EINEM 3D LASERSCANNER	5
2.4	OUTDOOR ROBOTER	6
2.5	VERWENDUNG VON LASERSCANNER UND TOF KAMERA	6
2.6	VERWENDUNG VON NORMALER KAMERA UND TOF KAMERA	7
2.7	STAND DER TECHNIK IM LABOR DER HS ULM	7
3	Grundlagen	9
3.1	PMD SENSOREN	9
3.1.1	FUNKTIONSWEISE	9
3.1.2	DATEN DES PMD[VISION] O3	10
3.1.3	KAMERAFEHLER	10
3.1.3.1	UNSYSTEMATISCHE KAMERAFEHLER	10
3.1.3.2	SYSTEMATISCHE KAMERAFEHLER	11
3.1.4	VORTEILE UND NACHTEILE	11
3.2	RANSAC	12
3.3	FILTER	14
3.3.1	MITTELWERTFILTER	15
3.3.2	GAUSS-FILTER	16
3.3.3	MEDIANFILTER	16
3.4	SMARTSOFT	17
3.5	CDL	17
4	Methode	19
4.1	ANFORDERUNGEN UND EINSCHRÄNKUNGEN	19
4.2	INTEGRATION DER PMD KOMPONENTE UND WAHL DES VERFAHRENS	21

4.3	PLATZIERUNG VON PMD SENSOREN AUF DEM PIONEER	24
4.3.1	VERWENDUNG VON EINEM SENSOR	25
4.3.2	VERWENDUNG VON MEHREREN SENSOREN	27
4.4	TRIGGERUNG	30
4.5	ALGORITHMUS	33
4.5.1	KAMERAANBINDUNG	36
4.5.2	ZUGRIFF AUF BILDDATEN	38
4.5.3	GLÄTTUNGSFILTER	39
4.5.4	MESSUNGSICHERHEITEN ERMITTELN UND AUSWERTEN	40
4.5.5	BEFAHRBARE FLÄCHE UND HINDERNISSE ERMITTELN	42
4.5.5.1	EINFACHES ABSTANDSVERFAHREN	43
4.5.5.2	BODENKALIBRIERUNGSVERFAHREN	45
4.5.5.3	NUTZEN DES RANSAC ALGORITHMUSES	50
4.5.6	BESTIMMUNG DER PMD DATEN IM LASER KOORDINATEN SYSTEM	52
4.5.7	FUSION UND SENDEN DER DATEN	57
5	Ergebnisse	59
5.1	HINDERNISERKENNUNG	61
5.1.1	PARAMETERSATZ A	62
5.1.2	PARAMETERSATZ B	69
5.1.3	PARAMETERSATZ C	75
5.2	SPEZIALFÄLLE	80
5.2.1	SPIEGELNDE OBERFLÄCHEN	81
5.2.2	TRANSPARENTE GEGENSTÄNDE	81
5.3	EINSCHRÄNKUNGEN	82
5.3.1	MAXIMALWEITE DER KOLLISIONSERKENNUNG	82
5.3.2	SICHTFELD	85
5.3.3	MAXIMALE FAHRTGESCHWINDIGKEITEN	86
5.3.4	FAZIT	87
5.4	TESTFAHRT	87
5.5	GESAMTFAZIT	88
6	Zusammenfassung und Ausblick	89
6.1	AKTUELLER STAND	89
6.2	VERBESSERUNGSMÖGLICHKEITEN	90

Kapitel 1

Einleitung

Roboter sind heutzutage nicht mehr auf abgegrenzte und gut vorstrukturierte Einsatzgebiete in der Produktion beschränkt und sollen ihre Aufgaben mit immer weniger Vorwissen bewältigen. Dabei ist es wichtig, dass sie sich gefahrlos und ohne andere in Gefahr zu bringen in ihrer Umgebung bewegen, d. h. verschiedene Hindernisse selbstständig erkennen und ausweichen. Mit fortschreitender Entwicklung stiegen die Anforderungen und damit auch die Schwierigkeit des zu bewältigenden Terrains bzw. die Anforderung an den Roboter in einer möglichst unmodifizierten Umgebung zu navigieren. Selbst in einfach erscheinenden öffentlichen Gebäuden existieren für Roboter schwierige Herausforderungen wie Glaswände, Spiegel, Treppen, kleine Stufen oder nur durch Geländer begrenzte Emporen.

Somit wird echtzeitfähiges, dreidimensionales Erkennen von Hindernissen immer wichtiger, wozu ein 2D Laserscanner, welcher heute noch Stand der Technik ist, im Gegensatz zum PMD Sensor nur bedingt fähig ist, da er nur eine Ebene statt eines gesamten Bildes scannt. Dadurch übersieht man alle Objekte, die entweder über oder unter der Scanebene liegen, z. B. Tischplatten, Spielzeug oder nach unten führende Treppen. Ein 3D Laserscanner hingegen kann wie auch der PMD Sensor eine Punktwolke aufnehmen und solche Hindernisse erkennen, ist aber wie in (SLNH01) erörtert um einige Faktoren teurer und wegen seiner Aufnahmezeit, die je nach Auflösung zwischen einer und 20 Sekunden liegt, nicht unbedingt zum Echtzeiteinsatz geeignet, sein Zielgebiet liegt eher in der Architekturvermessung.

Ein PMD Sensor aber ist preisgünstig und besitzt eine für Echtzeitanwendungen geeignete Bildwiederholrate, ist somit also für die Anwendung in der Servicerobotik geeignet.

Allerdings verfügen auch PMD Sensoren über Nachteile und da der Einsatz von PMD-Sensoren noch nicht ausreichend untersucht wurde, verfolgt diese Arbeit die Idee eines kombinierten Verfahrens mit Daten vom Laserscanner und des PMD Sensors, um das Risiko zu minimieren und auf diese Weise eine sicherere Hinderniserkennung zu realisieren. Dabei ist der Laserscanner für die Hinderniserkennung von großen Objekten, wie Stühlen, Schränken

und Wänden zuständig und der PMD Sensor für die Kollisionserkennung von negativen Hindernissen, wie Treppenabgängen und kleinen Hindernissen, wie Spielzeuge, die sich außerhalb des Sichtbereichs des Laserscanners befinden. Da die Kollisionserkennung des Laserscanners schon implementiert ist, müssen in dieser Bachelorarbeit die nötigen Verarbeitungsschritte und Probleme der Hinderniserkennung mit Hilfe des PMD Sensors erklärt und aufgezeigt werden, sowie die Fusion der Daten des Laserscanners und der PMD Kamera.

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Wahrnehmung mit einem 2D Laserscanner

Der heute am weitesten verbreitete Ansatz in der mobilen Robotik zum Erkennen von Hindernissen ist die Verwendung eines 2D Laserscanners. Eine etablierte Firma stellt hierbei SICK dar, von der ein Modell in Abbildung 2.1 illustriert ist.



Abbildung 2.1: Fotoaufnahme eines 2D Laserscanners der Firma SICK
(Quelle: mysick.com)

Dabei wird die Umwelt zyklisch gescannt, die gemessenen Entfernungswerte eventuell in das Koordinatensystem des Roboters transformiert und entschieden, welche Werte als Hindernisse genutzt werden. Im Standardfall, bei dem der Laserscanner waagrecht angebracht ist, können alle gemessenen Entfernungen als Hindernisse angenommen werden, weil im Normalfall alle Objekte, die sich auf Höhe des Laserscanners befinden unbefahrbar sind, da der Laserscanner sich über der befahrbaren Fläche befindet. So ergibt sich eine 2D Darstellung der Umwelt.

Ein Beispiel dazu findet sich in Abbildung 2.2, in der der von oben betrachteten Szene der Roboter links oben und die mit dem Laserscanner wahrgenommenen Entfernungswerte rot dargestellt sind.

Um die Entfernung eines Objekts festzustellen, wird ein Laserstrahl ausgesandt und wieder empfangen. Durch die zeitabhängige Phasenverschiebung des modulierten Lichts und der Konstante der Lichtgeschwindigkeit kann somit die Entfernung des Objekts ermittelt werden. Zur Wahrnehmung einer ganzen Zeile muss der Laserstrahl abgelenkt werden. Dies geschieht üblicherweise durch einen Spiegel.

Näheres findet sich in (WBBH05).

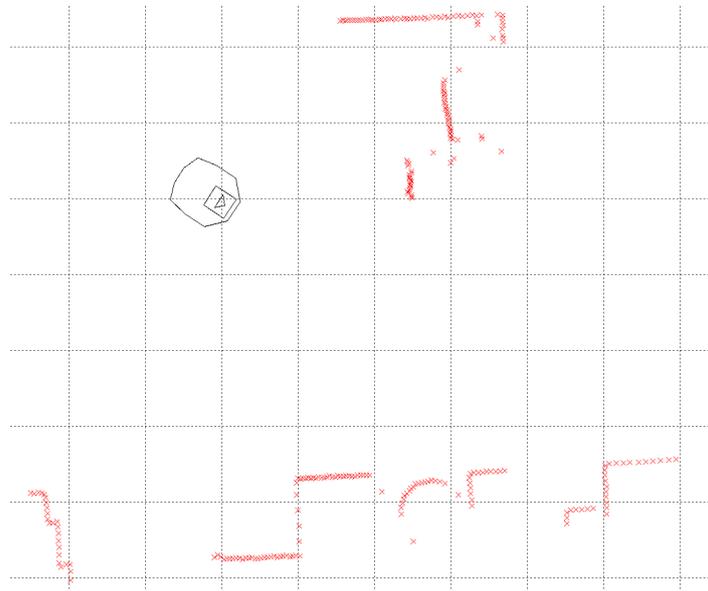


Abbildung 2.2: Visualisierung eines Laserscans

2.2 3D Wahrnehmung durch Ultraschall

Dreidimensionale Wahrnehmung kann durch Ultraschall realisiert werden. Das Verfahren zur Wahrnehmung per Ultraschall basiert, wie auch das des Laserscanners, auf der Laufzeitmessung, allerdings in diesem Fall auf der Laufzeitmessung von Schall, statt von Licht. (SN04a).

Nachteile entstehen hier durch die leichte Störung und Interferenzen beim Gebrauch von mehreren Geräten. Ein großer Vorteil gegenüber dem Laserscanner ist die Erkennung von transparenten Hindernissen, wie z. B. Glas.

2.3 Wahrnehmung mit einem 3D Laserscanner

Auch mit Laserscannern ist es möglich, die Umgebung dreidimensional wahrnehmen, wobei es mehrere Ansätze gibt.

Laut (SLNH01) kann man kommerzielle 3D Laserscanner in zwei Gruppen unterteilen, zum einen die auf lichtschnitt-, zum anderen die auf laufzeitbasierte. Da beim ersten Verfahren von Sensoren die auf Objekte projizierten Laserstreifen erkannt werden müssen, ist dieses Verfahren zeitintensiv und daher wird meist das laufzeitbasierte Verfahren verwendet.

Im Normalfall wird in der Robotik ein, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, auf einer Drehachse montierter 2D Laserscanner verwendet, der durch Drehungen und wiederholte Aufnahmen 3D Scans erzeugt.

Es gibt aber auch Verfahren, bei denen der Laserstrahl intern in zwei Dimensionen abgelenkt wird und somit die Drehung des gesamten Scanners entfällt. Dies geschieht in der Regel mit zwei Spiegeln, denn die theoretische Möglichkeit einen einzigen Spiegel in zwei Richtungen zu drehen ist technisch aufwändiger als die Verwendung von zwei Spiegeln. Solche Systeme werden in der Robotik allerdings weniger bevorzugt, da diese teuer sind und für die Service-robotik oft ungeeignet große Maße besitzen.

Viele Geräte beider Verfahren haben den Nachteil, dass sie für eine gesamte Bildaufnahme ein bis mehrere Sekunden benötigen, was erstens die Aufnahme verzerrt, wenn sich währenddessen die Kamera oder ein im Blickfeld liegendes Objekt in Bewegung befindet und zweitens dazu führt, dass die Reaktionszeit verlängert wird.

Rechtzeitiges Reagieren und korrekte Aufnahmen sind in der Servicerobotik allerdings von großer Bedeutung, vor allem wenn sich der Roboter in der Bewegung befindet, daher wird in den meisten Fällen die Verwendung eines 2D Laserscanners bevorzugt.

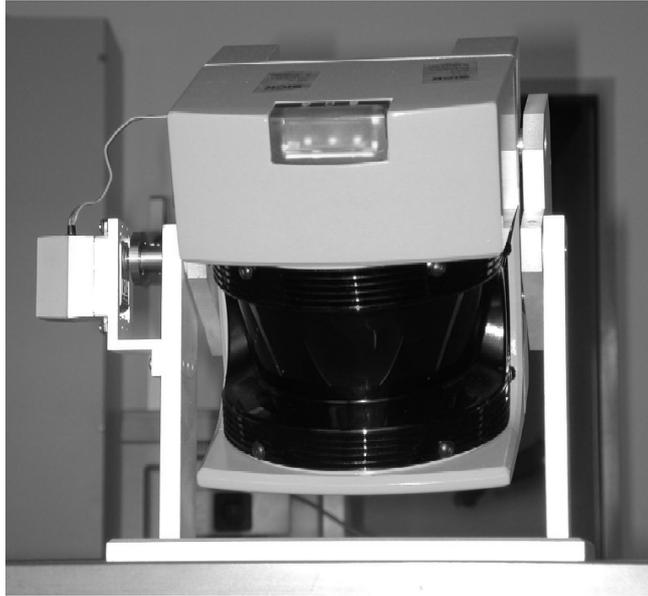


Abbildung 2.3: Foto eines 3D Laserscanners (NL01)

2.4 Outdoor Roboter

Gerade im Bereich der Outdoor Roboter ist die dreidimensionale Wahrnehmung der Umgebung sehr wichtig, da es bei unebenem Terrain nicht mehr möglich ist, den Boden als flache Ebene anzunehmen. Um kollisionsfreie und reibungslose Fahrt zu garantieren muss zwischen unbefahrbarem und befahrbarem Boden unterschieden werden. Bei diesem Problem ist es sehr vorteilhaft, ständig neue 3D Tiefeninformationen zur Verarbeitung zu erhalten und somit ist vor allem in diesem Bereich die Verwendung eines PMD Sensors sinnvoll.

In (PBP07) und (SHPB08), welche sich mit Outdoor Roboter unter Verwendung von PMD Sensoren beschäftigen, sind nähere Informationen zu finden.

2.5 Verwendung von Laserscanner und ToF Kamera

Wie in (YSP⁺09) erörtert, ist ein Verfahren, welches 2D Scan Daten mit 3D Punktwolken fusioniert, indem die 3D Daten in das 2D System gewandelt werden, ein effektives und leicht zu implementierendes Verfahren, um Obstacle Avoidance basierend auf Laserscanner und PMD Sensor zu realisieren. Wenn zuvor bereits ein auf 2D Daten basierendes System verfügbar ist, sind nur wenige Änderungen an der Architektur notwendig.

In (YSP⁺09) werden die von einem SwissRanger gewonnenen 3D Punkte in das Koordinatensystem eines SICK Laserscanners transformiert und in so genannten “Bins” entlang der Laserstrahlen abgelegt. In diese Bins werden auch die Werte des Laserscanners eingetragen.

Nachdem dies geschehen ist, kann für jede Bin der minimale Abstand zum Laserscanner ermittelt werden, was zu einem virtuellen Laserscan führt, bestehend aus Minima des Laserscans und Time-of-Flight Scans.

Dieser virtuelle Laserscan kann nun genauso behandelt werden wie der echte Laserscan zuvor, er kann also auch von der auf Laserscans basierten “motion planning and obstacle avoidance” Komponente genutzt werden.

Um die 3D Koordinaten des SwissRangers in die 2D Polarkoordinaten des SICK Laserscanners zu übertragen, wird in (YSP⁺09) eine Rotation um den Neigungswinkel des SwissRangers und dann eine Translation um den Vektor vom SwissRanger zum SICK benötigt. Die Rotations- und Translationsparameter werden durch eine explizite Kalibrierung mit einer Art Tisch ermittelt. Dabei werden die Tischbeine vom Laserscanner erfasst und mit Markierungen auf dem Tisch über den Tischbeinen verglichen, welche vom SwissRanger erfasst werden. Aus diesen jeweils vier Punkten können nun die Parameter ermittelt werden.

2.6 Verwendung von normaler Kamera und ToF Kamera

Es gibt auch Ansätze die das Vereinen der Daten einer normalen und einer ToF Kamera verfolgen.

In (DT05) und (HFS07) wird dieser Ansatz verwendet, um mit einem auf MRF (Markov Random Fields) basierten Algorithmus eine höhere Auflösung und Rauschminimierung zu erreichen. Dabei wird die Tatsache genutzt, dass Farbunterschiede im Bild der Kamera meist auch mit Tiefenunterschieden zusammenhängen. So kann ein Tiefenbild mit höherer Auflösung als das der niedrigauflösenden ToF Kamera bestimmt werden, indem die Farbübergänge der hochauflösenden normalen Kamera ermittelt und diese als wahrscheinliche Orte für Höhenunterschiede angenommen werden. Außerdem kann das Rauschen einer ToF Kamera verringert werden, indem Tiefenwerte geglättet werden, wenn sich an der selben Stelle im normalen Kamerabild eine Fläche mit geringem Farbunterschied befindet.

Dieses Verfahren ist allerdings meist mit hohem Rechenaufwand verbunden und zielt eher auf genauere Vermessungen, als auf Hinderniserkennung.

2.7 Stand der Technik im Labor der HS Ulm

Der bisher aktuelle Aufbau besteht aus einem autonomen mobilen Pioneer-Roboter mit SICK Laserscanner und Ultraschall zum Erkennen der Umwelt. Der Laserscanner ist waagrecht angebracht, hat einen Öffnungswinkel von 180 Grad und misst 360 Werte, einen Wert jedes halbe Grad. Die Hinderniserkennung arbeitet ausschließlich auf Basis des Laserscanners, da das Ultraschallsystem sehr ungenaue Werte liefert und leicht gestört werden kann.

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 PMD Sensoren

3.1.1 Funktionsweise

Das Funktionsprinzip des PMD Sensors (Photonic Mixer Device) basiert auf dem Laufzeitverfahren. Dabei wird Infrarotlicht ausgesandt und wieder empfangen. Die gemessene Entfernung beträgt

$$d = \frac{t}{2} \cdot c \quad (3.1)$$

wobei t der Zeit des Licht von der Aussendung bis zum erneutem Empfang und c der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

Im einfachsten Verfahren, beruhend auf der Pulslaufzeit, wird ein Puls ausgesandt, vom Ziel reflektiert und mit einem Empfänger wieder aufgenommen. Dabei wird die Zeit t dazwischen gemessen und die Distanz d mit Formel 3.1 berechnet. Durch die hohe Lichtgeschwindigkeit muss die Zeitmessung allerdings sehr genau erfolgen. Um Genauigkeiten im Millimeterbereich zu erreichen, müssen Messungen im Pikosekundenbereich erfolgen. (KRI06)

Deshalb wird folgendes Verfahren meist bevorzugt:

Die Lichtquelle der PMD Kamera sendet aktiv mit bekannter Frequenz moduliertes Licht aus. Das Licht wird von der Szene reflektiert und wieder vom PMD Sensor aufgenommen, der nun durch Korrelation des empfangenen Eingangs- und bekannten Ausgangssignals pixelweise Phasenverschiebungen bestimmen kann. Mit Hilfe der zeitabhängigen Phasenverschiebung kann die Laufzeit t für jeden Pixel berechnet werden, von der aus wiederum die gewünschte Entfernung d durch Formel 3.1 bestimmt werden kann (KRI06).

Tieferes Wissen wird in (WGS04), (KRI06) und (LK06) vermittelt.

3.1.2 Daten des PMD[vision] O3



Abbildung 3.1: Fotoaufnahme des PMD Sensors PMD[vision] O3

Der Öffnungswinkel des zur Verfügung stehenden PMD Sensors mit der Bezeichnung PMD[vision] O3 der Firma PMD Technologies beträgt 40° an der langen und 30° kurzen Seite. Die Auflösung eines gemessenen Bildes beträgt 64×48 Pixel, der Sensor ermittelt also 3072 Messwerte pro Bild. Dies kann mit einer maximalen Bildwiederholrate von 25 Hz geschehen. Die maximale Integrationszeit beträgt $5000 \mu\text{s}$, die Modulationsfrequenz 20 MHz . (PMD08)

3.1.3 Kamerafehler

In (MDHW08) und (KRI06) werden die Fehler des PMD Sensors ausführlich besprochen. Sie werden in systematische und unsystematische Fehler unterteilt, wobei systematische Fehler im Gegensatz zu unsystematischen Fehlern gemildert werden können.

Im Verlauf dieser Bachelorarbeit muss entschieden werden, wie mit diesen Fehlern umgegangen wird.

3.1.3.1 Unsystematische Kamerafehler

Es bestehen drei unterschiedliche unsystematische Kamerafehler. (MDHW08)

Das Rauschen (Noise) führt zu einer Verzerrung der Messwerte und kann nicht unterdrückt werden.

Multiple Ways Reflection tritt bei konkaven Objekten auf, wie z. B. in der Szene von Abbildung 5.1(f). Dabei wird das Infrarotsignal vom reflektierten Infrarotlicht überlagert, welches den längeren Weg über mehrfache Reflexion zurückgelegt hat.

Light Scattering bezeichnet die Beeinflussung des reflektierenden Infrarotlichts von nahen Objekten auf ferne Objekte (siehe Abbildung 4.16(b)).

3.1.3.2 Systematische Kamerafehler

Neben den unsystematischen existieren vier systematische Fehler. (MDHW08)

Der entfernungs betreffende Fehler tritt durch die asymmetrische Antwort des Infrarotsignals auf, welche eine *unharmonische* sinusförmige Beleuchtung verursacht. Bei der Entfernungsberechnung wird allerdings angenommen, es handle sich um eine *harmonische* sinusförmige Beleuchtung und so entstehen Ungenauigkeiten bei der Berechnung.

Der amplituden betreffende Fehler hängt von der Entfernung ab. Er ergibt sich durch Nichtlinearitäten des Halbleiters und führt zu verschiedenen Entfernungsmessungen bei gleicher Entfernung.

Der verzögerungs betreffende Fehler tritt durch unterschiedliche Verzögerungen bei Ausenden und Empfang der Pixel auf. Somit ergeben sich Fehler bei der Entfernungsmessung.

Fixed Pattern Noise entsteht durch ungleiche Materialeigenschaften der CMOS-Bauteile und verursacht für jeden Pixel einen konstanten Messfehler.

Diese vier Fehler sind, wie in (FM08) eingehend behandelt wird, durch Kalibrierung behandelbar.

3.1.4 Vorteile und Nachteile

Der Hauptvorteil des PMD Sensors liegt in der Aufnahme eines kompletten, dreidimensionalen Bildes, welches im Gegensatz zum Laserscanner unabhängig von der Bewegung des Roboters aufgenommen wird, denn beim Laserscanner wird das Bild aus mehreren nacheinander aufgenommenen Scans zusammengesetzt. Dies ist, wie schon in der Einleitung (1) besprochen, ein großer Vorteil zum 2D Laserscanner. Die hohe Bildwiederholrate ist der zweite große Vorteil, der dazu beiträgt, Echtzeiterkennung von Hindernissen zu ermöglichen. Das ausgesandte Licht des Sensors ist außerdem nicht augenschädlich.

Doch der Sensor hat auch große Nachteile, vor allem die niedrigen Öffnungswinkel (siehe 3.1.2), die geringe Höchstentfernung L , ermittelt mit Formel 3.2, und das gegenüber dem Laserscanner starke Rauschen.

Mit der Formel

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_{mod}} \quad (3.2)$$

aus (MWSP06) mit der Modulationsfrequenz f_{mod} und der Lichtgeschwindigkeit c ergibt sich die maximal wahrnehmbare Distanz.

Aus ihr folgt:

$$L = \frac{299792458 \frac{m}{s}}{2 \cdot 200000000 Hz} \quad (3.3)$$

$$L = 7,49m \quad (3.4)$$

Die maximal wahrnehmbare Entfernung beträgt also 7,49 m .

Die nachfolgende Aufzählung zeigt die Vor- und Nachteile der PMD Sensoren zusammenfassend.

Vorteile:

- Hohe Bildrate
- 3D Bild
- Sofortige Entfernungsdaten
- Nicht augenschädliches Licht

Nachteile:

- Niedrige Öffnungswinkel
- Starkes Rauschen
- Geringe Maximalentfernung

3.2 Ransac

Ransac (Random Sample Consensus) ist ein Algorithmus zum Bestimmen eines beliebigen Modells innerhalb von Messwerten. In der Robotik kann man ihn zum Beispiel dazu nutzen, Flächen in einer Punktwolke zu finden. Ein Beispiel wird in Abbildung 3.2 dargestellt, in der die blauen Punkte die Punktwolke aus Messwerten bildet und die mit Ransac ermittelten Flächen dunkelgrau veranschaulicht sind. Der Algorithmus ist, im Gegensatz zu ähnlichen Algorithmen, wie zum Beispiel die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, unanfällig gegen Ausreißer. Somit können Flächen auch in komplexeren Punktwolken gefunden werden, ohne dass sich die Punkte verschiedener Flächen gegenseitig beeinflussen.

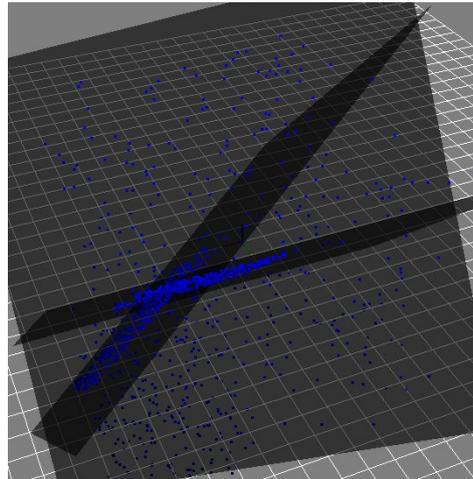


Abbildung 3.2: Flächenermittlung mit Hilfe des Ransac Algorithmus
(Quelle: babel.isa.uma.es/mrpt)

Laut (Esc06) funktioniert der Algorithmus wie folgt:

1. Wähle aus den Messwerten zufällig Punkte der Anzahl s aus, die nötig ist, um die Parameter des Modells zu bestimmen.
2. Ermittle die Parameter des Modells mit Hilfe der gewählten Punkte.
3. Finde alle Punkte innerhalb eines bestimmten Abstands d zur Modellkurve. Weist diese Teilmenge eine bestimmte Mindestanzahl t von Punkten auf, so wird diese Teilmenge gespeichert.

Der obige Teilalgorithmus wird n mal wiederholt und schließlich wird aus der Menge der Teilmengen, die Consensus Sets genannt werden, die Teilmenge mit den meisten Punkten gewählt. Ist die Menge der Consensus Sets eine Leermenge, so wurde kein Modell unter diesen Bedingungen gefunden.

Die Parameter d des Maximalabstands, t der Mindestanzahl und n der Iterationen ist dabei frei wählbar und sollte immer auf Bedacht des Problems gewählt werden.

Um die Anzahl notwendiger Iterationen n zu bestimmen, mit denen der Algorithmus zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit p erfolgreich abschließt, das heißt am Ende existiert mindestens ein Consensus Set, ist folgende Formel 3.5 aus (Esc06) zu verwenden:

$$n = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - e)^s)} \quad (3.5)$$

Dabei stellt p die gewünschte Wahrscheinlichkeit, e der relative Anteil von Ausreißern und s die für die Modellparameter nötige Anzahl an Punkten dar.

Ebene					Gerade				
s	3				s	2			
p	0,99				p	0,99			
e	0,1	0,3	0,5	0,7	e	0,1	0,3	0,5	0,7
n	4	11	35	169	n	3	7	17	49
p	0,95				p	0,95			
e	0,1	0,3	0,5	0,7	e	0,1	0,3	0,5	0,7
n	3	8	23	110	n	2	5	11	32

Tabelle 3.1: Beispieltabelle für nötige Anzahl an Iterationen bei Ebenen und Geraden

Tabelle 3.1 zeigt einige Beispielwerte anhand Formel 3.5, in der die benötigten Anzahlen an Iterationen n zum Erhalten eines Consensus Sets mit einer Wahrscheinlichkeit p für Geraden bzw. Ebenen mit Anteil e Ausreißern dargestellt sind.

So sind z. B. bei einer Geraden mit 30% Ausreißern 7 Iterationen nötig, um mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% ein Consensus Set zu erhalten, für eine Ebene mit 30% Ausreißern 11 Iterationen und für eine Ebene mit 50% Ausreißern schon 35 Iterationen.

Anhand Tabelle 3.1 und Formel 3.5 erkennt man gut, dass die Komplexität des Algorithmuses exponentiell mit p und e steigt.

Im Sinne dieser Arbeit besteht die Möglichkeit mit Hilfe des Ransac Algorithmuses die befahrbare Bodenfläche zu ermitteln.

3.3 Filter

Zur Vermeidung von Ausreißern durch Fehlmessungen in einer Messreihe ist ein Glättungsfilter empfehlenswert. Da es mehrere dieser Filter gibt, werden nun drei für die Arbeit relevanten genauer anhand eines Beispiels erklärt. In Abbildung 3.3 ist zur Verdeutlichung ein künstliches Graustufenbild gezeigt, bei dem jeder Pixel einen grauwert kodierten Tiefenmesswert repräsentiert. Dieses ist zu Demonstrationszwecken geeignet, da, wie in echten Aufnahmen, stetige Übergänge sowie Ausreißer vorhanden sind. Zu beachten sind die schwarz und weiß

hervorgehobenen Pixel, die sowohl Fehlerwerte als auch richtig gemessene Werte darstellen können. In den meisten Fällen sind einzelne Pixel mit starker Abweichung zu Nachbarpixeln allerdings Fehlmessungen. Die folgenden Beispiele dienen zur Veranschaulichung, welche Auswirkungen 5x5 Filter auf das gegebene Bild haben.

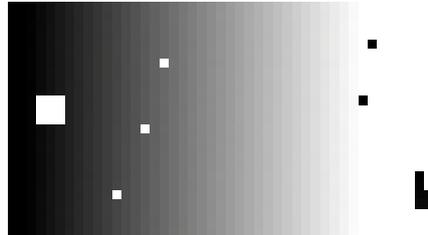


Abbildung 3.3: Ausgangsbild für Filter

3.3.1 Mittelwertfilter

Der Mittelwertfilter ist der einfachste Glättungsfilter, der das Mittel der Werte des betrachteten Fensters um einen Pixel ermittelt und diesem zuweist.

In Abbildung 3.4 wird die Funktionsweise anhand einer Beispielnachbarschaft dargestellt, wobei der Pixel in der Mitte mit dem Wert 42 der Ausgangspixel ist. Es werden, wie in Formel 3.6 mathematisch dargestellt, alle Werte der Pixel in der Nachbarschaft addiert und durch die Anzahl der Pixel geteilt, wobei x_i der jeweilige Wert des Pixels i und n die Anzahl der Pixel der Nachbarschaft darstellt. Somit erhält man den Wert x , welcher dem Ausgangspixel zugewiesen wird (BK08).

Nach Anwendung des Verfahrens auf jeden Pixel ist der Filtervorgang abgeschlossen. Wird der Filter auf Bild 3.3 angewandt, so ergibt sich das gefilterte Bild 3.5.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.6)$$

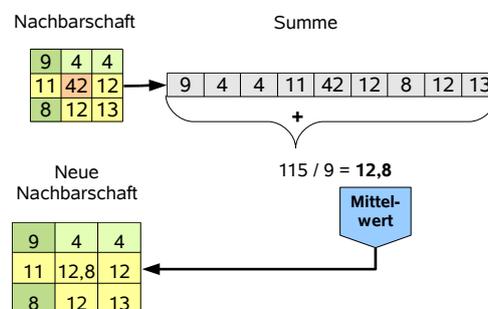


Abbildung 3.4: Funktionsweise des Mittelwertfilters

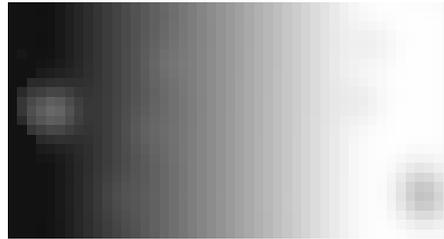


Abbildung 3.5: Anwendung des Mittelwertfilters

3.3.2 Gauß-Filter

Der Gauß-Filter gewichtet die Werte der Nachbarpixel abhängig von der euklidischen Distanz zum Pixel auf den der Filter angewandt wird, indem die Gewichtung mit steigender Distanz sinkt und der Wert des Eigenpixels am höchsten gewertet wird (BK08). Im Endeffekt werden Kanten besser bewahrt als z. B. beim Mittelwertfilter.

Nach Anwendung des Verfahrens auf jeden Pixel ist der Filtervorgang abgeschlossen. Wird der Filter auf Bild 3.3 angewandt, so ergibt sich das gefilterte Bild 3.6.

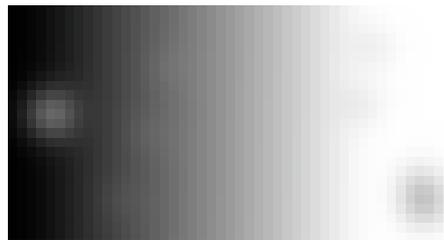


Abbildung 3.6: Anwendung des Gauß-Filters

Als großer Nachteil des Gauß-Filters zählt ein höherer Rechenaufwand, obwohl er sich in diesem Fall ähnlich zum Mittelwertfilter verhält.

3.3.3 Medianfilter

Der Medianfilter funktioniert ähnlich wie der Mittelwertfilter, nur dass statt dem Mittel der Werte der Median der Werte zugewiesen wird (BK08). Dadurch ergeben sich stärkere Kanten im Vergleich zu den anderen Filtern.

Die Funktionsweise wird in Abbildung 3.7 anhand einer Beispielnachbarschaft dargestellt, wobei der Pixel in der Mitte mit dem Wert 42 der Ausgangspixel ist. Dabei wird der Median ermittelt, was dem Wert in der Mitte einer sortierten Reihe entspricht. Im Beispiel steht an dieser Stelle der Wert 11. Der ermittelte Median wird dem Ausgangsbildpunkt zugewiesen.

Nach Anwendung des Verfahrens auf jeden Pixel ist der Filtervorgang abgeschlossen. Wird der Filter auf Bild 3.3 angewandt, so ergibt sich das gefilterte Bild 3.8.

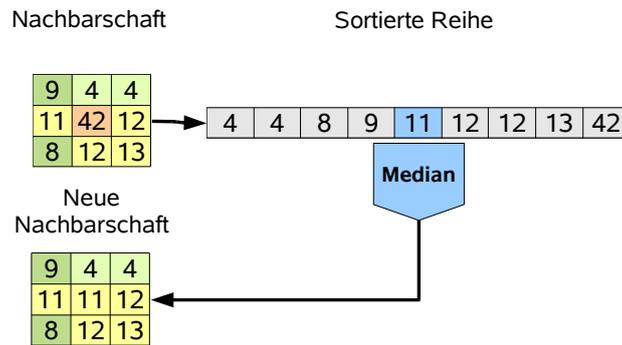


Abbildung 3.7: Funktionsweise des Medianfilters

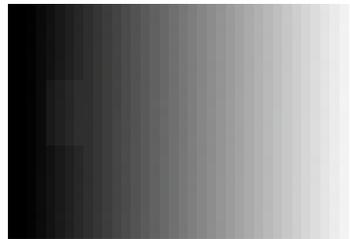


Abbildung 3.8: Anwendung des Medianfilters

3.4 Smartsoft

SmartSoft ist ein auf Kommunikationspattern und Komponenten basiertes Framework für die Entwicklung von Robotiksoftware. Die lose Kopplung der Komponenten, welche auch zur Laufzeit ausgetauscht werden können, ist ein grundlegendes Feature, mit dem Änderungen am System, wie z. B. Austausch von Sensoren mit zugehörigen Komponenten, einfach zu bewerkstelligen sind. (Bru07)

Das System der Robotersoftware an der Hochschule Ulm basiert auf SmartSoft, es ist folglich notwendig auch die in dieser Arbeit entstehende Software in dieses System zu integrieren.

3.5 CDL

CDL ist ein Verfahren zur Kollisionsvermeidung (Sch98), (SN04b). Im SmartSoft System der Hochschule Ulm gibt es eine Implementierung dieses Verfahrens, welches auf Laserscans beruht. Die Verwendung dieser CDL Komponente in dieser Bachelorarbeit ist vorteilhaft, da ein hoher Aufwand einer eigenen Implementierung einer Kollisionsvermeidung entfällt.

Kapitel 4

Methode

4.1 Anforderungen und Einschränkungen

Die Anforderungen an die Arbeit mit dem Titel “3D Kollisionsvermeidung in Alltagsumgebungen unter Verwendung eines PMD-Sensors” müssen für die Zielsetzung geklärt werden.

Um Kollisionen zu vermeiden, ist es notwendig, in Erfahrung zu bringen, wodurch diese entstehen können. Im Fall eines Fahrzeugs wie dem vorhandenen Pioneer Roboter, der sich auf einer Fläche bewegt, kann jedes Objekt, das sich von dieser Fläche positiv sowie negativ abhebt zu unerwünschten Kollisionen führen. Die maximale Höhe, in der Objekte zu Kollisionen führen können, ist durch die Höhe des Roboters begrenzt.

Bevor allerdings mit Hilfe einer Programmroutine diese Objekte erkannt werden können, müssen sie wahrgenommen werden. Dazu ist es erforderlich zu ermitteln, *an welchen Orten* am Roboter *ein PMD Sensor zu montieren ist*, und falls das Sichtfeld eines Sensors nicht ausreicht, *Montierstellen für mehrere Sensoren* zu analysieren, so dass das *notwendige Sichtfeld* abgedeckt wird.

Der zweite Teil der Arbeit widmet sich der *Entwicklung einer Software*, die mit Hilfe von Algorithmen die oben beschriebenen *Hindernisse erkennt*. Diese Software soll wie in Punkt 3.4 beschrieben *in die vorhandene SmartSoft Architektur integriert* werden.

Einschränkungen ergeben sich bei dieser Arbeit durch den limitierten Sichtbereich eines einzelnen Sensors und die Anzahl von nur zwei vorhandenen PMD Sensoren. Somit ist es nicht möglich, einen beliebig großen Bereich der Umwelt abzudecken, sondern es muss, wie zuvor erwähnt, potentiell sinnvolle Montierstellen für die Sensoren ermittelt werden.

Zusätzlich sollte die Rechenzeit des Algorithmuses in einem Bereich liegen, in dem der Roboter weiterhin funktionsfähig ist, was von der Fahrtgeschwindigkeit abhängt. Ein angemessener Wert ist aus der Rate zu entnehmen, mit der die vorhandene Kollisionsvermeidungskomponente

CDL einen Zyklus abarbeitet. Die Wiederholrate dieses Zykluses beträgt 10 Messungen pro Sekunde. Also ist die Einhaltung von einer Rate von 10 Hz ein guter Orientierungswert.

Wird diese Rate nicht erreicht, kann durch Reduktion der Geschwindigkeit weiterhin ein betriebsfähiger Bereich eingehalten werden. Dazu ist folgende Formel für die maximale Geschwindigkeit v , abhängig von der Reaktionszeit t_r , der Entfernung, ab der ein Hindernis erkannt wird, s und der Bremsverzögerung a , verwendbar:

$$v = -\frac{t_r \cdot 2a}{2} + \sqrt{\left(\frac{t_r \cdot 2a}{2}\right)^2 + s \cdot 2a} \quad (4.1)$$

Diese Formel entspricht einer Umformung und Lösung der quadratischen Formel für den Halteweg.

Eine weitere Vorgabe ist, dass an der SmartSoft Komponente CDL keine Änderung vorgenommen wird.

Zusammenfassend ergeben sich die Anforderungen und Einschränkungen in der folgenden Aufzählung.

Anforderungen:

- Abdecken des nötigen Sichtbereichs
 - Ermitteln der Anzahl der nötigen Sensoren
 - Erörtern der Montageplätze der Sensoren
- Entwickeln einer Software
 - Entwickeln einer Kollisionserkennung per PMD Sensor
 - Einordnung in die SmartSoft Architektur

Einschränkungen:

- Sichtbereich eines einzelnen Sensors
- Mögliche Platzierungsorte der Sensoren
- Rechenaufwand muss innerhalb eines betriebsfähigen Bereichs liegen
- Nutzen von maximal zwei Sensoren
- Keine Änderung der CDL Komponente

4.2 Integration der PMD Komponente und Wahl des Verfahrens

Um PMD Daten verarbeiten und weiterzuleiten zu können, muss eine SmartSoft Komponente erstellt und in das schon vorhandene System eingefügt werden. Die Einordnung in das System hängt von dem verwendeten Verfahren der Kollisionserkennung mit Hilfe des PMD Sensors ab.

Aufgrund der Einfachheit, Robustheit und Vorteile der Verwendung von Sensoren unterschiedlicher Typen des in 2.5 gezeigten Verfahrens, in welchem Daten von Laserscanner und Time-of-Flight Kamera fusioniert werden und des in 2.7 angesprochenen Vorhandenseins einer Kollisionsvermeidung, welche auf Laserscans basiert (Abbildung 4.1), ist die Entscheidung dieses Verfahren zu verwenden naheliegend.

Andere mögliche Verfahren sind einfache Verwendung des PMD Sensors oder die Fusion von PMD Daten mit einfachen Kameradaten, wie in Punkt 2.6 beschrieben, um höhere Genauigkeit zu erreichen.

Die Nachteile des einfachen Verfahrens sind gleich den Nachteilen der PMD Sensoren, welche in Punkt 3.1.4 ausführlich besprochen sind. Vor allem durch die niedrige Maximalentfernung (Formel 3.2) und die niedrigen Öffnungswinkel ist die Abdeckung eines großen Sichtbereichs nur schwer möglich, was allerdings mit der Kombination aus PMD Sensor und Laserscanner sehr einfach realisierbar ist.

Die Verwendung des in Punkt 2.6 gezeigten Verfahrens hingegen ist nicht zu empfehlen, da ein hohes Risiko der Überschreitung des in 4.1 genanntem betriebsfähigen Rechenaufwands besteht. Laut (DT05) benötigte ein moderner Rechner mit einem optimiertem Algorithmus ca. eine Sekunde zur Erstellung eines fusioniertem Bildes.

Durch die oben erörterten Vorteile und Überwiegen der Nachteile der anderen Verfahren ist die Wahl des in Punkt 2.5 gezeigten Verfahrens mit Laserscanner und Time-of-Flight Kamera die beste Wahl.

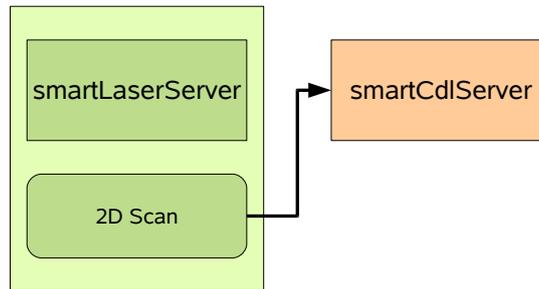


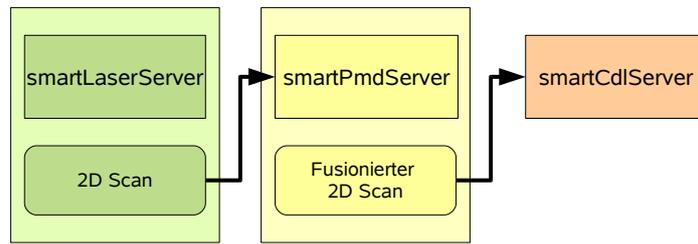
Abbildung 4.1: Laser zu Cdl Architektur

Für dieses Verfahren gibt es wiederum mehrere Architekturmöglichkeiten, die in Abbildung 4.2 visualisiert sind.

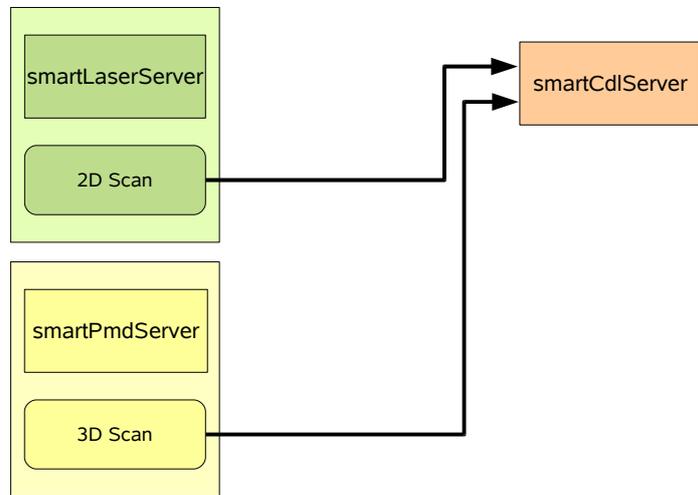
Architektur A bildet eine Kette aus den beteiligten Komponenten, die jeweils die Daten von der vorherigen Komponente verarbeiten. So benötigt das Verfahren keine Änderungen an den anderen Komponenten und die Datenübertragung zwischen den Komponenten bleibt effizient. Architektur B hingegen basiert darauf, dass die Cdl Komponente die Daten fusioniert. Dadurch ist die Architektur zwar leichter erweiterbar, aber es müssen Änderungen an der Cdl Komponente vorgenommen werden, was in einer Verletzung der Vorgabe in 4.1 resultiert. Ein weiteres Problem ist die erhöhte Datenübertragungslast, die dadurch entsteht, dass die PMD Komponente nun die gesamte 3D Punktwolke übertragen muss. Außerdem erfolgt die Fusion der Daten in der Cdl Komponente.

Architektur C eliminiert einige Nachteile von Architektur B durch Einführung einer eigenen Komponente, die die Aufgabe übernimmt, die Daten zu fusionieren. Dies ist architektonisch die Beste der drei Varianten, da jede Komponente ihre eigene, abgegrenzte Aufgabe besitzt und leicht Erweiterungen möglich sind. Allerdings steigt die Datenübertragungslast über die der Architektur B hinaus und die bisherige Wahrung einer minimalen Komplexität einer Komponente sollte eingehalten werden, denn die Anzahl der SmartSoft Komponenten sollte aus Übersichtlichkeit nicht leichtfertig erhöht werden. Eine reine Fusionskomponente würde diese minimale Komplexität nicht einhalten.

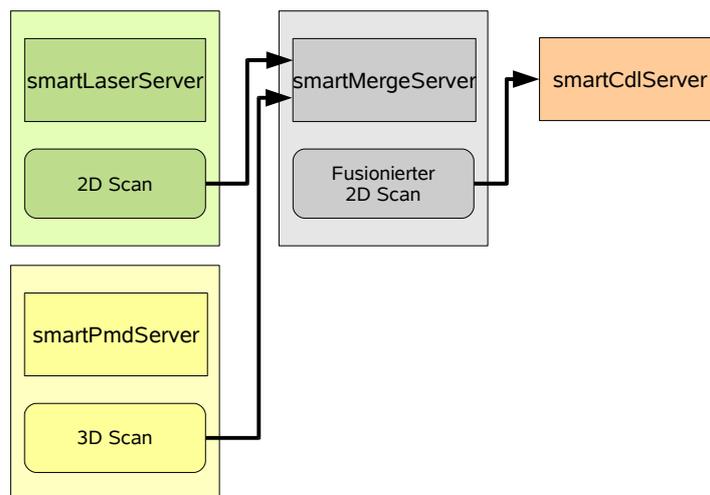
Zur Erhaltung der effizienten Datenübertragung, weil die Erweiterbarkeit, sowie der Aufbau des SmartSoft Systems nicht im Aufgabenbereich dieser Bachelorarbeit liegen und die Granularität der SmartSoft Komponenten eine Rolle spielt, ist die Umsetzung der Architektur A optimal.



(a) Architektur A



(b) Architektur B



(c) Architektur C

Abbildung 4.2: Mögliche SmartSoft Architekturen

4.3 Platzierung von PMD Sensoren auf dem Pioneer

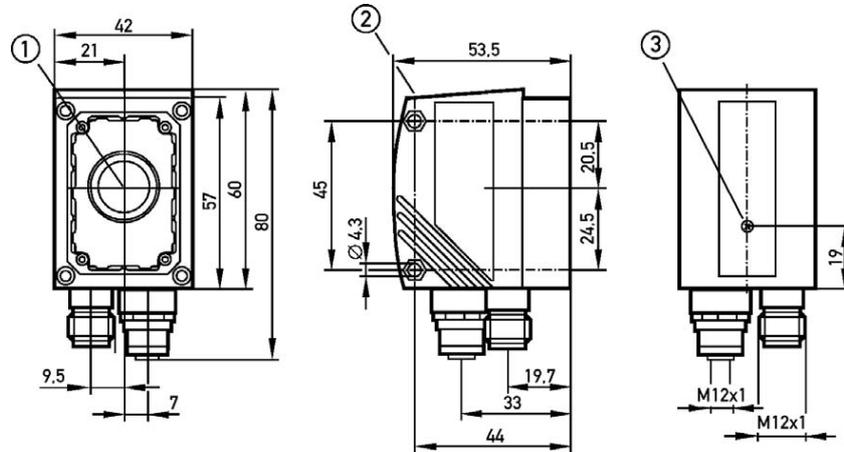


Abbildung 4.3: Maße des PMD Sensors PMD[vision] O3

Die Platzierung nimmt einen starken Einfluss auf die Qualität der Scanwerte. Ideal wäre ein Blickfeld, welches den kompletten Bereich vor dem Roboter übersieht und eine Qualität der Scans, die nicht von der Entfernung abhängt. Jedoch ist die maximale Messdistanz, sowie die Öffnungswinkel stark eingeschränkt, wie in 3.1.2 und 3.1.4 vermerkt ist. Weitere Einschränkungen entstehen durch die Platzierung selbst, denn der PMD Sensor kann nicht überall angebracht werden. Die Maße des PMD Sensors, welche in Abbildung 4.3 gezeigt werden, die Blickfelder der anderen Sensoren und mechanische Möglichkeiten der Platzierung definieren potentielle Plätze.

Die wichtigsten Kriterien nach der eine Platzierung bewertet wird, sind die Sicht auf einen nahen Bereich vor dem Roboter, die Sicht auf einen weiten Bereich vor dem Roboter, die seitliche Sicht und die durchschnittliche Entfernung vom Boden bzw. die damit verbundene Qualität der Scans.

Zur Veranschaulichung und Evaluation wird der Versuchsaufbau in Abbildung 4.4 aus unterschiedlichen Positionen mit dem PMD Sensor aufgenommen. In der Szene befinden sich ein roter Würfel rechts vorne in 2 cm, ein blauer Becher in der Mitte rechts in 35 cm, ein Klebeband in der Mitte links in 35 cm, ein roter Zylinder hinten links in 75 cm und ein blauer Würfeln hinten links in 120 cm Entfernung zum Roboter.

Die Sichten von den Montageplätzen der Sensoren werden in Abbildung 4.7 farbige Pfeile dargestellt.

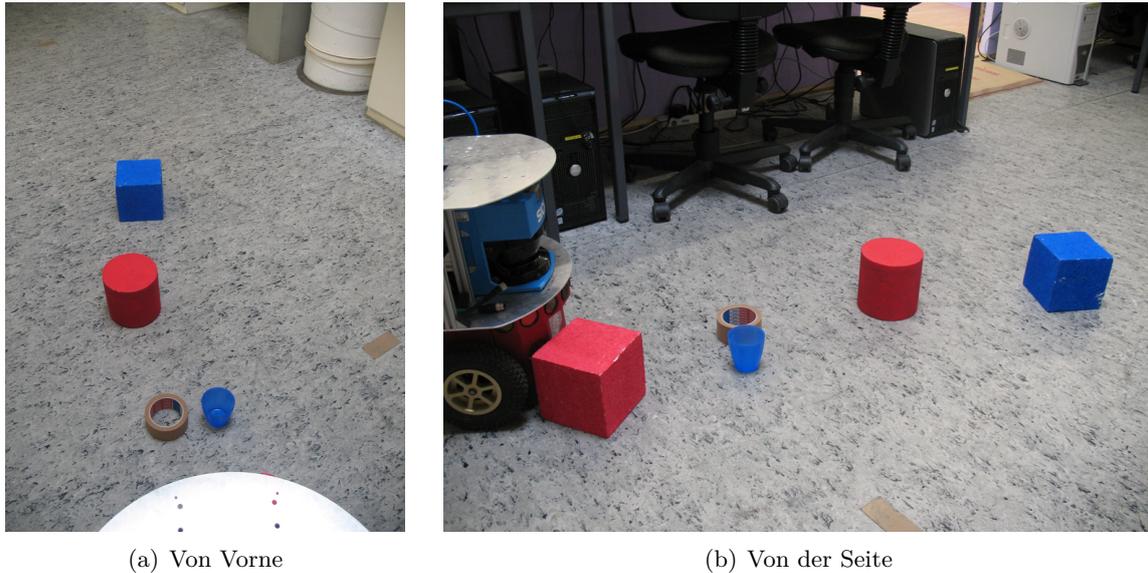


Abbildung 4.4: Versuchsaufbau Platzierung

Die nahe Sicht ist wichtig, da bei den meisten Montagemöglichkeiten ein toter Winkel nahe des Roboters, also zwischen dem Roboter und dem PMD Sensor existiert, in den Hindernisse durch Drehung des Roboters oder noch während des Abbremsens hineinfallen können.

Die weite Sicht hingegen sorgt für die Zeit, die zum Abbremsen verfügbar ist, denn je weiter der PMD Sensor sieht, desto früher kann ein Hindernis erkannt werden und desto früher kann gebremst werden.

Die seitliche Sicht stellt sicher, dass sich Hindernisse nicht am Rand des Sichtfelds auf die seitlichen Teile des Roboters, im Fall des Pioneers die Räder, zubewegen und somit Kollisionen verursachen.

Die durchschnittliche Entfernung zum Boden ist dafür verantwortlich, wie gut kleine Hindernisse vom Boden unterschieden werden können. Je weiter der Sensor vom Boden entfernt ist, desto eher fällt ein kleines Objekt in die Messungenauigkeit des Sensors.

4.3.1 Verwendung von einem Sensor

Bei Verwendung von nur einem Sensor spielen die in 3.1.4 besprochenen Nachteile eine große Rolle, auf Nähe hat die PMD Kamera ein kleines Blickfeld, auf die Weite ungenaue Entfernungswerte.

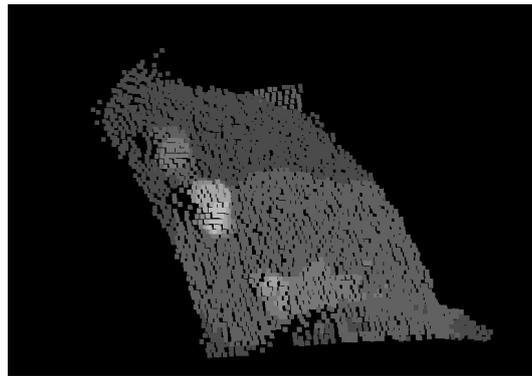
Am Galgen (blauer Pfeil) Die Platzierung am Galgen hat den Vorteil eines großen Blickfelds vor dem Roboter. Allerdings sind durch die hohe Entfernung bei glattem Boden

die Kamerafehler sehr stark und nur sehr ungenaue Werte auf weite Entfernung vor dem Roboter möglich (siehe 3.1.3). Die Unterscheidung zwischen Boden und niedrigen Hindernissen fällt außerdem deutlich schwerer als aus der Nähe aus, denn Objekte gehen oft im Rauschen unter. Bei Aufnahme des Versuchsaufbau (Abbildung 4.5 (a)) sind der hintere Zylinder, sowie der hintere Würfel gut zu erkennen, die niedrigen Gegenstände auf mittlere Entfernung gehen stark im Rauschen verloren und der nahe Würfel wird von der Plattform verdeckt.

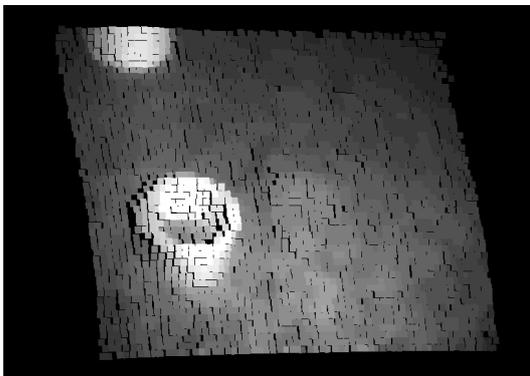
Auf der Plattform (roter Pfeil) Hier ist die Nähe des Bodens ein Vorteil mit dem niedrige Hindernisse leichter vom Boden unterschieden werden können. Allerdings ist das Sichtfeld zu klein um Hindernisse zu erkennen, die bei Näherung mit den seitlichen Kanten des Roboters angefahren werden. Zusätzlich existiert ein toter Winkel unter dem Sensor, in den kleinere Hindernisse fallen können, wenn sich der Roboter dreht. Bei Erhöhung des Neigungswinkels wird der tote Winkel zwar verkleinert, aber auch die weite Sicht. Bei Aufnahme des Versuchsaufbau mit zwei unterschiedlichen Neigungswinkeln, Abbildung 4.5 (b) mit ca. 30° und Abbildung 4.5 (c) mit ca. 55° , ist zu erkennen, dass mit starker Neigung zwar der nahe Würfel erkennbar ist, sich aber der Zylinder in 75 cm Entfernung schon außerhalb des Sichtbereichs befindet. Beim Verkleinern des Winkels zur Steigerung der Sichtweite geht allerdings der nahe Würfel aus dem Bild verloren.

Die Platzierung von einem einzelnen Sensor unter der Plattform ist keiner Untersuchung wert, da sich in der Mitte der Laserscanner befindet, dessen Sicht nicht verdeckt werden darf und eine Platzierung links oder rechts schließt die Sicht der jeweils anderen Seite aus und führt somit zu einem unzureichendem Blickfeld.

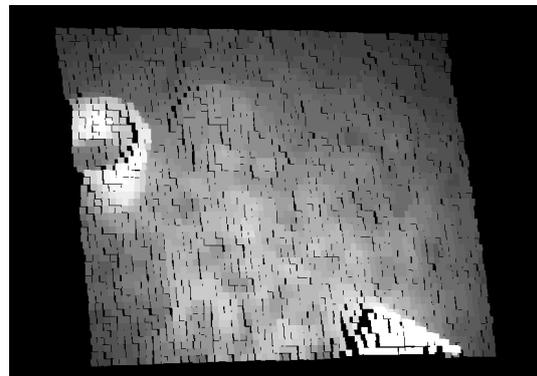
Anhand der Bilder 4.5 und den vorherigen Ermittlungen ist zu erkennen, dass die gewünschte Genauigkeit zusammen mit dem benötigten Blickfeld mit einem einzelnen Sensor nicht erreicht werden kann. Damit die Verwendung von PMD Sensoren des Typs PMD[vision] O3 einen sinnvollen Vorteil bietet, ist es empfehlenswert, mehrere Sensoren mit unterschiedlichen Blickwinkeln zu nutzen und diese auf Nähe zum Boden zu montieren, um Genauigkeit sowie ein genügend großes Blickfeld zu erreichen.



(a) Platzierung am Galgen



(b) Platzierung auf der Plattform 1



(c) Platzierung auf der Plattform 2

Abbildung 4.5: Platzierungsmöglichkeiten 1

4.3.2 Verwendung von mehreren Sensoren

Um den nötigen Bereich mit einer gewünschten Genauigkeit zu überblicken, werden mindestens zwei PMD[vision] O3 Sensoren benötigt.

Auf der Plattform (gelbe Pfeile) Um ein größeres Blickfeld zu erlangen, können zwei Sensoren links bzw. rechts verschoben und nach links bzw. rechts gedreht auf der Plattform montiert werden. Allerdings löst dies nicht das Problem des toten Winkels, welches in 4.3.1 angesprochen wird. Hierfür müsste ein extra Sensor weiter Richtung Boden geneigt werden, welcher so zwar das Feld direkt vor dem Roboter wahrnimmt, aber nicht mehr die Umgebung, welche weit genug entfernt ist, um rechtzeitig auf Hindernisse zu reagieren.

Unter der Plattform (grüne Pfeile) Die Stellung von zwei Sensoren links und rechts vom Laserscanner direkt unter der Plattform löst mehrere Probleme. Zum einen sind die Blickfelder so organisiert, dass der Platz vor der linken bzw. rechten Kante des Roboters gut wahrgenommen werden kann und zum anderen sind die Sensoren nun tief genug gelegen, dass eine gute Sicht nach vorne und gleichzeitig eine ausreichende Sicht nach

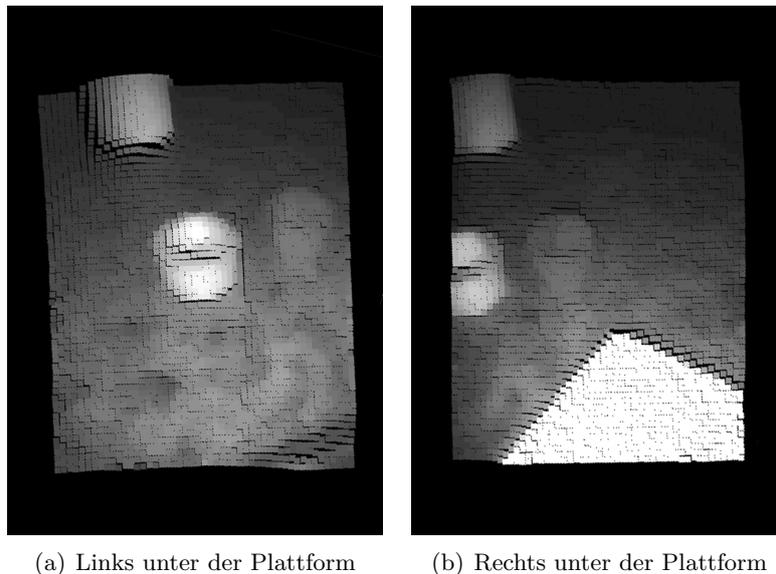
unten möglich ist, was den toten Winkel minimiert und in den meisten Fällen ein Objekt nahe des Roboters noch im Blickfeld liegt. Bei Aufnahme des Versuchsaufbau in Abbildung 4.6 ist zu erkennen, dass alle Objekte bis auf den Würfel in 120 cm Entfernung sehr gut zu erkennen sind.

Aus Vergleich der Bilder 4.6 und den vorherigen Ermittlungen kann geschlossen werden, dass die Verwendung von zwei Sensoren auf den Positionen unter der Plattform am meisten Vorteile bietet. Der einzige Nachteil besteht in der eingeschränkten weiten Sicht, die mit ca. 90 cm zum Bremsen bei einer Bremsverzögerung von 500 mm/s^2 und einer Geschwindigkeit von 950 mm/s allerdings ausreichend ist (Formel 4.1).

Eine Verwendung von drei Sensoren bietet den Vorteil, einen am Galgen montieren zu können, um somit auch höhere Hindernisse wahrzunehmen, allerdings stehen im Rahmen dieser Bachelorarbeit wie in 4.1 erwähnt nur zwei Sensoren zur Verfügung.

Die Wahl der genauen Platzierungsart fiel auf eine senkrechte Platzierung des Sensor, da durch die seitliche Platzierung zweier Sensoren die erforderliche seitliche Sicht garantiert ist, aber zusätzlich eine gute weite, sowie nahe Sicht, im Gegensatz zu einer waagrechten Positionierung, möglich ist.

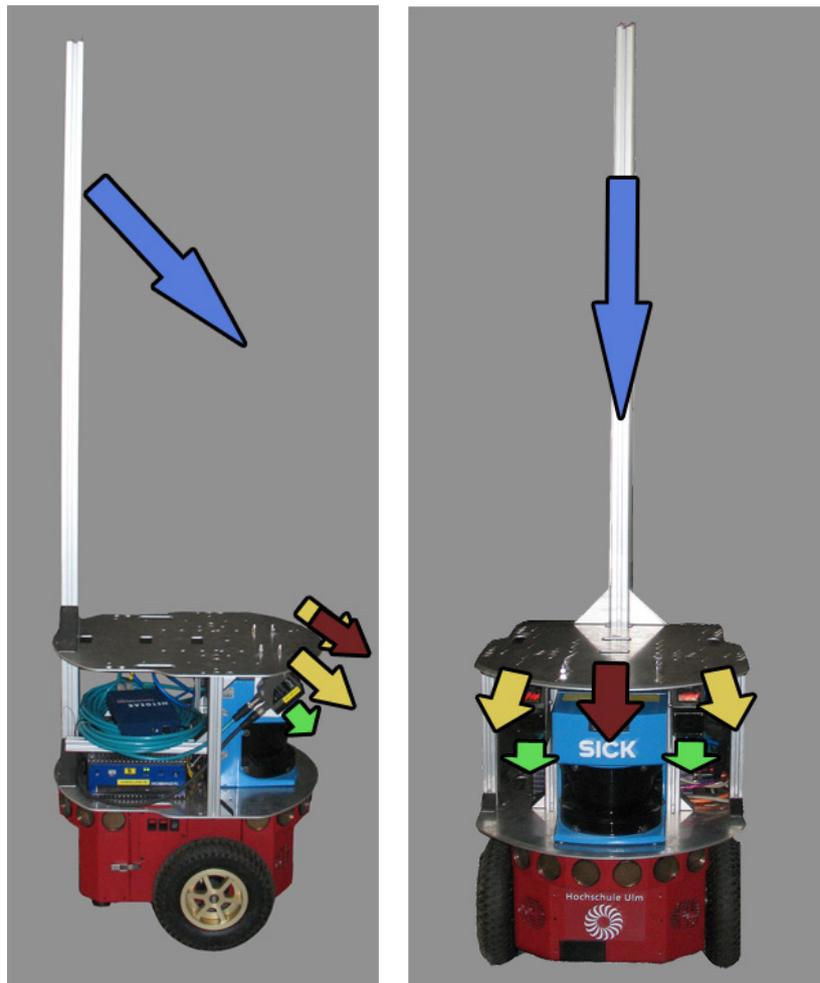
Beim Neigungswinkel fiel der Entschluss auf 45° , genau so, dass die untere Plattform aus dem Sichtbereich fällt und eine Minimierung des toten Winkels der Fall ist. Die weite Sicht ist dabei weiterhin durch die senkrechte Platzierung garantiert.



(a) Links unter der Plattform

(b) Rechts unter der Plattform

Abbildung 4.6: Platzierungsmöglichkeiten 2

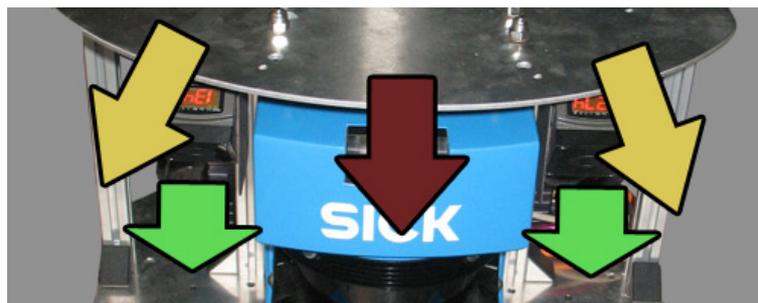


(a) Von rechts (weit)

(b) Von vorne (weit)



(c) Von rechts (nah)



(d) Von vorne (nah)

Abbildung 4.7: Ansicht des Pioneers

4.4 Triggerung

Bei Verwendung von mehreren Sensoren mit überlappenden Sichtfeldern ist es essentiell, dass Aufnahmen nicht zeitgleich geschehen, da sich die Sensoren ansonsten durch die Belichtung gegenseitig stören und dadurch starke Messfehler auftreten. Damit die PMD Sensoren konstante, störungsfreie Aufnahmen erstellen, muss also garantiert werden, dass jeder Sensor ein zeitversetztes, nicht überlappendes Zeitfenster für seine Aufnahme besitzt. Dieses Problem ist durch zeitlich verschobenes Triggern der verschiedenen Sensoren lösbar.

Störungsfehler können dadurch erkannt werden, dass mehrere Aufnahmen einer selben Szene große Abweichungen der Entfernungswerte zeigen. Ein Beispiel dazu, dargestellt in Abbildung 4.8, zeigt zwei Blöcke an Aufnahmen, wovon der linke bzw. rechte Block die Aufnahmen des jeweiligen Sensors wiedergibt. Jede Aufnahme besteht aus den kartesischen Koordinaten der gemessenen Entfernungen und ist mit einer eigenen Farbe markiert. Die Abweichungen der einzelnen Aufnahmen ist sehr gut daran zu erkennen, dass sich die Blöcke fächerartig aufspannen.

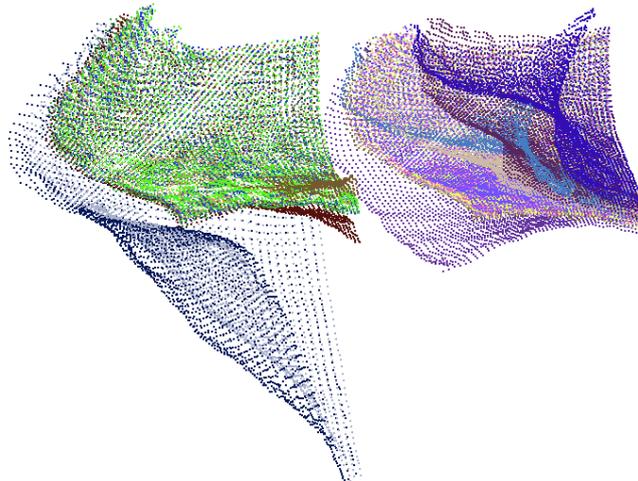


Abbildung 4.8: Störungen ohne Triggerung mit 20 FPS

Um zeitversetztes Triggern zu realisieren gibt es drei Möglichkeiten: Die Verwendung von einem externen Triggersignal, die Abhängigkeit des Triggersignals eines Sensors von einem Signal eines anderen Sensors oder Verwendung eines Software Triggers.

Das erste Verfahren ist z. B. mit einem durch ein Signalgenerator erstelltes Rechtecksignal möglich, welches die halbe Periodendauer auf high liegt und die andere halbe Periodendauer auf low, wobei die Triggerung von zwei Sensoren auf die positive bzw. auf die negative Flanke des Signals geschieht.

Das zweite Verfahren ist beim PMD Sensoren durch die Umleitung des Ready Ausgangssignals auf das Triggereingangssignals eines anderen Sensors realisierbar. Dieses Verfahren hat

im Gegensatz zum vorherigen die Vorteile, dass kein zusätzliches Signal benötigt wird und dass dieses Verfahren beliebig oft wiederholbar ist, das heißt, es kann eine Triggerkette einer theoretisch beliebigen Anzahl an Sensoren erstellt werden, wobei zur Verwendung von mehr als zwei Sensoren beim ersten Verfahren mehrere externe Triggersignale benötigt würden. Auf die Verwendung des Software Triggers wird verzichtet, da diese Funktion des vorliegenden Plugins zu Problemen führt.

Am Naheliegendsten ist also die Verwendung des zweiten Verfahrens.

Neben dem Triggern ist es notwendig zu gewährleisten, dass jeder Sensor genug Zeit für seine Aufnahme hat, da sonst weiterhin Störungen auftreten. Bild 4.9 zeigt Störung des linken Sensors durch den rechten Sensor mit dessen hoher Bildrate ungenügend Zeit für eine Aufnahme des linken Sensors zu Verfügung steht. Zwar erhält dieser durch das Ready Signal des rechten Sensors seinen Befehl zum Aufnehmen, doch bleibt ihm zu wenig Zeit bevor der rechte ein weiteres mal die Szene beleuchtet.

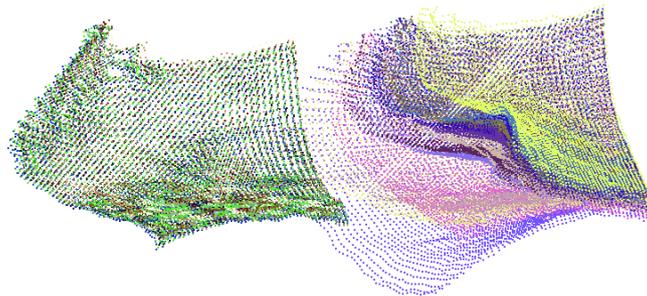


Abbildung 4.9: Störungen bei positiver Triggerung mit 20 FPS

Durch Herabsetzen der Bildrate, also der FPS (Frames per Second), verkleinert sich der Zeitbereich, in dem ein Sensor beschäftigt ist, also die Zeit, in der sich das Ready Signal auf low befindet. In Abbildung 4.10 ist das mit einem Oszilloskop aufgenommene Ready Signal für eine Bildrate von 3 FPS dargestellt. Besitzt das Signal die Hälfte der Periodendauer oder länger einen high Pegel, so ist genug Zeit für eine Aufnahme eines zweiten Sensors gleicher Bauart gegeben.

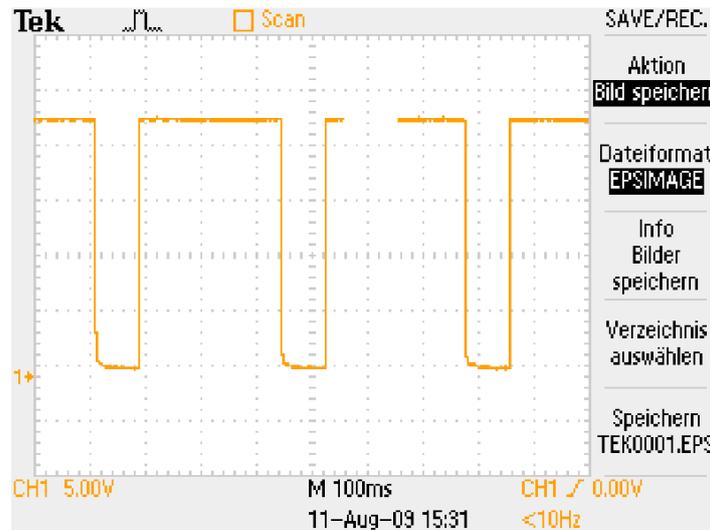
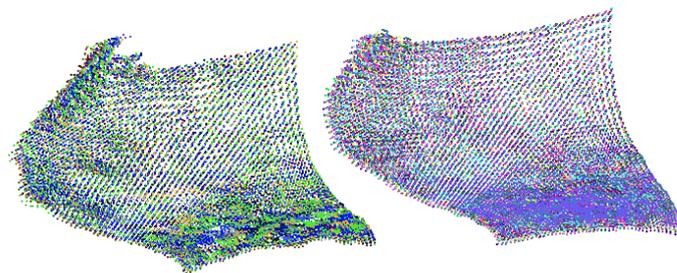


Abbildung 4.10: Ready Signal eines Sensors

Bei Annahme eines linearen Verhaltens zwischen FPS und high Pegel des Readysignals durch zwei Messungen ist eine maximale Bildrate von 12 Hz erreichbar, ohne dass Störungen auftreten. Wegen dennoch gelegentlich auftretenden Störungen wird die Bildrate auf 10 Hz erniedrigt, was zu komplett störungsfreien Messungen, wie in Abbildung 4.11 zu erkennen, führt.

Durch die Bildrate von 10 Hz kann die Maximalgeschwindigkeit genauer bestimmt werden. Wird die ermittelte Sichtweite der Sensoren aus 4.3 mit 90 cm , die Bremsverzögerung mit 500 mm/s^2 und nun zusätzlich die Reaktionszeit mit $1/10\text{ Hz} = 0,1\text{ s}$ angenommen und in Formel 4.1 eingefügt, so erhält man eine Maximalgeschwindigkeit von 900 mm/s .

Abbildung 4.11: Störungsfreie Messungen bei positiver Triggerung mit 10 FPS

4.5 Algorithmus

Der Ablauf ist an die Wahl des Verfahrens in Punkt 4.2 gebunden, es müssen also die Daten vom PMD Sensor mit den Daten des Laserscanners vereint werden und an die Kollisionsvermeidungskomponente CDL geschickt werden.

Um dies zu bewerkstelligen, müssen die Daten des Laserscanners empfangen, sowie die Daten des PMD Sensors gewonnen werden. Zum letzteren Punkt fallen weitere Unterpunkte an, die die Vorverarbeitung der Rohdaten regeln. Der wichtigste Punkt der Rohdatenverarbeitung ist die Erkennung und Behandlung des Bodens, da sich dieser, auf Kollisionserkennung bezogen, von Hindernissen unterscheidet, denn der Boden muss im Gegensatz zu Hindernissen als befahrbar gelten. Dies ist in diesem Fall nötig, da sich der Boden in den in 4.3 erörterte Positionen im Blickfeld der Sensoren befindet.

Weitere Vorverarbeitungsschritte können Filter wie die aus Punkt 3.3 zur Milderung der in 3.1.3 beschriebenen Kamerafehler oder Kalibrierungen, wie z. B. in (KRI06) oder (FM08) erwähnt, enthalten.

In dieser Bachelorarbeit fiel die Wahl auf die Verwendung eines Glättungsfilters zur Vermeidung von Peaks und Schwankungen der Rohdaten durch das in 3.1.3 besprochene Rauschen der Messungen. In Abbildung 4.14 und Tabelle 4.2 ist ersichtlich, dass die Schwankungen und damit auch die fehlerhaften Peaks deutlich geglättet werden, also die maximalen Abweichungen sinken und somit die Anwendung eines Filters sinnvoll ist.

Des Weiteren ist die Anwendung eines Filters für ungenaue Werte hilfreich, vor allem um Reflektionsfehler wie Multiple Ways Reflection und Light Scattering, welche in 3.1.3 diskutiert werden, zu minimieren. In Abbildung 4.12 ist im linken Bild eine graustufenkodierte Entfernungsmessung zu erkennen, in der sich am linken Rand ein Bildschirm befindet. Um den Bildschirm herum sind durch Light Scattering fehlerhaft entstandene Werte zu erkennen, die fälschlicherweise vermuten lassen, dass sich dort ein Objekt auf ähnlicher Entfernung wie der Bildschirm befindet. Mit Hilfe eines Filters lassen sich diese Werte geringer Genauigkeit erkennen, welche im mittleren Bild dargestellt sind. Dort sind Pixel mit hoher Ungenauigkeit hell dargestellt. Wendet man den Filter auf das Entfernungsbild an, indem ungenaue Werte ab Überschreitung einer bestimmten Grenze bzw. Threshold nicht gewertet werden, so erhält man das rechte Bild, in dem die Szene der Umwelt deutlich näher kommt als im unbearbeitetem Bild. Weiteres dazu ist in Punkt 4.5.4 beschrieben.

Die Verwendung dieses Filters führt somit also zu einer sehr guten Qualitätssteigerung der Entfernungsaufnahmen.

Nach der Verarbeitung muss zum Erstellen eines virtuellen Laserscans die Punktemenge der PMD Sensoren in das Koordinatensystem des Laserscanners transformiert werden. Der letzte

Nr.	gemessene Entfernung in cm	Fehler in cm
1	63,4808	1,48
2	61,9393	-0,06
3	63,1640	1,16
4	60,5877	-1,41
5	61,9471	-0,05
6	60,6874	-1,31
7	63,9087	1,91
8	60,9893	-1,01
9	59,6849	-2,32

Tabelle 4.1: Entfernungsmessungen bei theoretischer Entfernung von 62cm

Schritt beinhaltet die Bereitstellung des virtuellen Laserscans an die Kollisionsvermeidungskomponente CDL.

Eine Kalibrierung wird in 4.5.5.2 zur Bodenklassifizierung verwendet.

Alles zusammen ergibt einen Ablauf wie in Abbildung 4.13 beschrieben. Die folgenden Punkte beschreiben den implementierten Algorithmus.

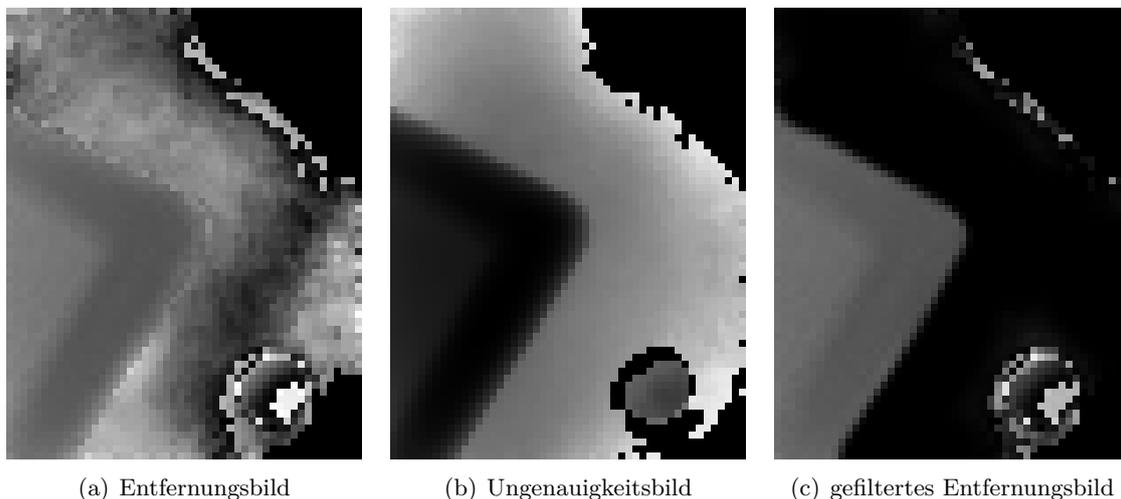


Abbildung 4.12: Ungenauigkeiten bei Entfernungsaufnahme

In den nachfolgenden Punkten wird die Funktionsweise des im Rahmen dieser Bachelorarbeit implementierten Algorithmuses beschrieben.

Entfernungsmessungen in cm				
Nr	Ungefiltert		Gefiltert	
	Wert	Fehler	Wert	Fehler
1	62,67	2,67	60,84	0,84
2	61,17	1,17	60,65	0,65
3	60,09	0,09	61,43	1,43
4	60,87	0,87	61,6	1,6
5	60,43	0,43	60,29	0,29
6	60,87	0,87	60,98	0,98
7	60,39	0,39	60,59	0,59
8	60,41	0,41	59,52	-0,48
9	60,82	0,82	61,45	1,45
10	60,68	0,68	59,54	-0,46
11	59,78	-0,22	59,01	-0,99
12	60,18	0,18	60,44	0,44
13	63,2	3,2	62,42	2,42
14	64,21	4,21	62,04	2,04
15	61,06	1,06	61,24	1,24
16	60,41	0,41	60,3	0,3
17	62,09	2,09	62,09	2,09
18	60,92	0,92	60,13	0,13
19	61,44	1,44	61,8	1,8
20	60,96	0,96	60,19	0,19
21	60,13	0,13	59,83	-0,17
22	61,64	1,64	60,95	0,95
	max. Fehler		max. Fehler	
	4,21		2,42	

Tabelle 4.2: Vergleichstabelle zu mittelwertgefilterten Messungen bei einer Entfernung von 60 cm

Nr.	gemessene Entfernung in cm	Fehler in cm
1	77,1993	4,20
2	66,8387	-6,16
3	68,7298	-4,27
4	70,8902	-2,11
5	76,8871	3,89
6	73,5115	0,51
7	77,6969	4,70
8	72,8788	-0,12
9	74,0028	1,00
10	75,4163	2,42
11	70,7095	-2,29
12	73,9363	0,94
13	77,3283	4,33
14	66,9833	-6,02

Tabelle 4.3: Entfernungsmessungen bei theoretischer Entfernung von 73 cm

4.5.1 Kameraanbindung

Zu Beginn ist es notwendig über IP eine Verbindung zu den Kameras aufzubauen. Dies geschieht über den Aufruf einer API Funktion, welcher zusätzlich der Pfad zu einer Plugindatei übergeben werden muss. Ein solches Plugin beinhaltet kameraspezifische Funktionen. In dieser Bachelorarbeit werden vom Anbieter gegebene Standardplugins verwendet.

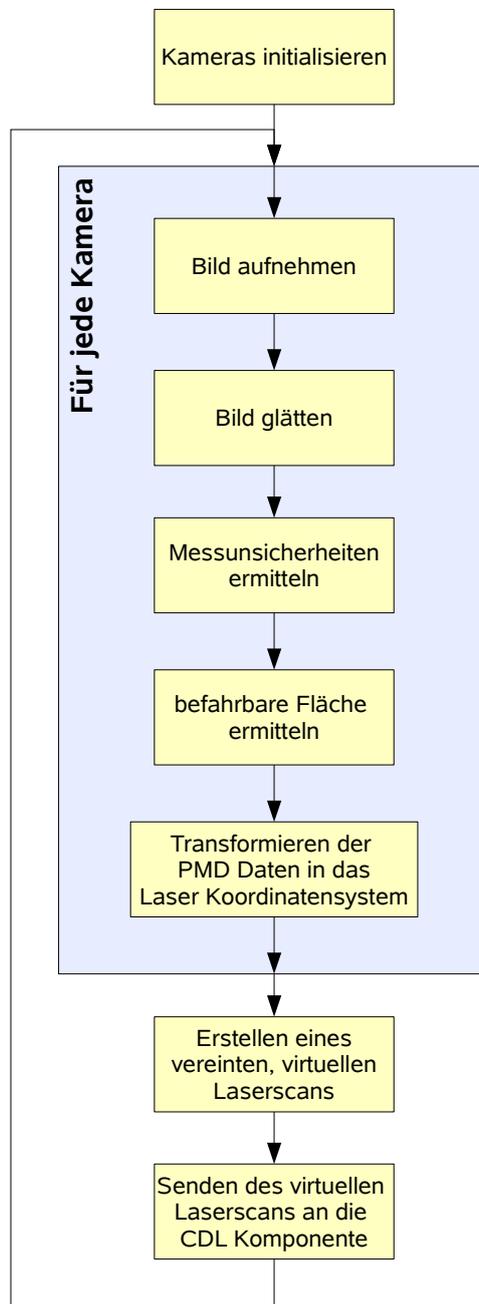


Abbildung 4.13: Ablauf des Algorithmuses

4.5.2 Zugriff auf Bilddaten

Bevor Entfernungsdaten zur Kollisionserkennung verarbeitet werden können, müssen diese zugänglich sein. Dazu wird mit Hilfe der PMD API das zuletzt erstellte Bild per Update Funktion vom Sensor in den Arbeitsspeicher kopiert. Danach ist es möglich aus den neuen Daten Entfernungs-, Amplituden- und Intensitätswerte auszulesen. Die Entfernungswerte werden direkt zur Hinderniserkennung genutzt, die Amplituden- und Intensitätswerte zum Ermitteln der Messunsicherheiten.

Die Qualität der Aufnahmen hängt hierbei von der Integrationszeit der Kamera ab, die über die API geändert werden kann. Eine hohe Integrationszeit liefert auf größeren Entfernungen bessere Ergebnisse, führt aber durch nahe Objekte schneller zu Light Scattering (siehe 3.1.3) als bei Verwendung einer niedrigen Integrationszeit (MWSP06).

Ein Problem der Updatefunktion ist ihr hoher Zeitaufwand. Der Zeitaufwand wird für zwei verschiedene vorhandene Plugins getestet, für Plugin A, einer stabilen Version und Plugin B, einer neueren Betaversion. Beide Plugins sind Linux Binaries, Plugin B beinhaltet allerdings im Gegensatz zu Plugin A für die Bachelorarbeit relevante Funktionen zum Einstellen der aufzunehmenden Bilder pro Sekunde (FPS) und zum Ändern der Triggerung, welche bei Verwendung von mehreren Sensoren entscheidend sind (siehe 4.4).

Die gemessenen Zeitwerte für eine Integrationszeit von $1500 \mu s$ sind in Tabelle 4.4 festgehalten. Es ist deutlich zu erkennen, dass das neuere Plugin B einen deutlich höheren Zeitaufwand verursacht, der über dem doppelten des Plugin A liegt. Mit Plugin A ist bei einem Sensor eine maximale Bildrate von ca. 6,5 Bildern pro Sekunde, mit Plugin B von ca. 2,6 Bildern pro Sekunde möglich. Hierbei ist der Unterschied zwischen FPS in Punkt 4.4, was die echte Aufnahme rate der PMD Kamera und den hier genannten FPS, was die Bildaktualisierungsrate im Arbeitsspeicher bezeichnet, zu beachten. Beide Raten liegen unter der in 4.1 gewünschten Rate von $10 Hz$.

Da der Zeitaufwand der Updatefunktion für eine Integrationszeit von $1500 \mu s$ erst nach merklicher Zeit auf Werte wie in Tabelle 4.4 ansteigt, bei einer drastischen Reduktion der Integrationszeit auf einen Wert im Bereich um $450 \mu s$ der Zeitaufwand der Update Funktion auf einen Bereich unter $100 ms$ sinkt und die Außentemperatur des Sensor fühlbar in hohen Bereichen liegt, wird angenommen, dass der hohe Zeitaufwand der Updatefunktion ein Resultat der Überhitzung darstellt.

Um eine sichere Fahrt zu garantieren muss somit entweder die Fahrtgeschwindigkeit zur Kompensation der niedrigen Bildrate gemindert werden, oder die Integrationszeit reduziert werden, was die Qualität der Messungen negativ beeinflusst.

Bei Verwendung einer Integrationszeit von $1500 \mu s$ und zwei Sensoren beträgt die Reaktionszeit bei Erstellen eines gesamten Bilds ca. $\frac{1}{2,6/2} = 0,77 s$. Die Maximalgeschwindigkeit

Nr.	Plugin A (Zeit in ms)	Plugin B (Zeit in ms)
1	153	383
2	153	388
3	154	383
4	152	381
5	154	383
6	152	385
7	153	385
8	153	384
9	153	382
10	154	382
11	153	386
12	152	385
13	153	385
14	153	383
15	152	385
16	153	386
17	154	381
18	152	382
19	154	380
20	153	384

Tabelle 4.4: Zeitmessungen für die Update Methode

keit bei dieser Reaktionszeit und den in 4.3 ermittelten Parametern beträgt 640 mm/s . Bei Verwendung einer Integrationszeit von $450 \mu\text{s}$ und einer angenommenen Reaktionszeit von $100 \text{ ms} \cdot 2 = 200 \text{ ms}$ ergibt sich eine Maximalgeschwindigkeit von 850 mm/s . (Formel 4.1)

4.5.3 Glättungsfilter

Nach Laden des aktuellen Tiefenbildes ist es sinnvoll etwaige Messfehler zu glätten. Hierzu eignet sich die Anwendung einer der Filter, die in Punkt 3.3 besprochen werden. In dieser Bachelorarbeit fiel die Entscheidung auf die Verwendung der Programmbibliothek OpenCV (Ope09), in der verschiedene Bildverarbeitungsalgorithmen implementiert sind, darunter auch die in 3.3 gezeigten Filter. Der Vorteil der Verwendung dieser Bibliothek besteht in der Robustheit und guten Performance der Algorithmen. Außerdem entfällt der Aufwand der Eigenimplementierung.

Die Anwendung eines Mittelwertfilters wird in Abbildung 4.14 beispielhaft anhand von Messwer-

ten einer ebenen Fläche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch den Filter die Annäherung an eine ebene Fläche verbessert wird.

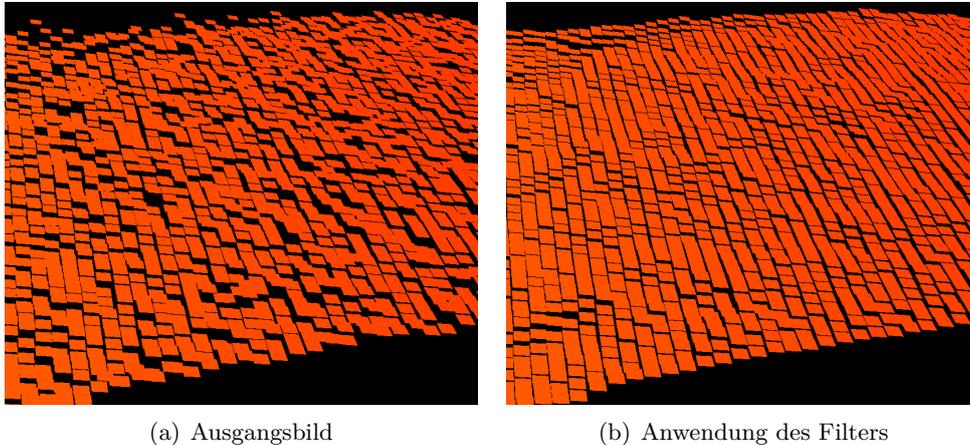


Abbildung 4.14: Anwendung des Mittelwertfilters auf echte Messdaten einer ebenen Bodenfläche

4.5.4 Messunsicherheiten ermitteln und auswerten

Da der PMD Sensor störanfällig ist, vor allem durch reflektierende Oberflächen, ist es wichtig, die Messunsicherheit der Pixel zu bestimmen und Pixel mit hohen Messunsicherheiten zu verwerfen. Ansonsten werden bei Reflexionen, wie Light Scattering oder Multiple Ways Reflexion, genannt in Punkt 3.1.3, Hindernisse fälschlicherweise dort erkannt, wo sich keine befinden und damit wird der Bewegungsfluss bzw. die Wegfindung des Roboters negativ beeinflusst. In Abbildung 4.15 befinden sich sechs verschiedene Aufnahmen eines ebenen Bodens, an denen sehr gut Light Scattering auf weite Entfernung, hier ca. 1,5 m, erkennbar ist. Die Werte gegenüber des rot eingezeichneten Bereichs, welcher sich nah am Sensor befindet, sind von sehr starkem Rauschen betroffen, was durch stark abfallende oder stark ansteigende Entfernungswerte symbolisiert ist. Die Erwartung einer richtigen Messung wäre hingegen eine sehr glatte, mit steigender Entfernung leicht abfallende Fläche.

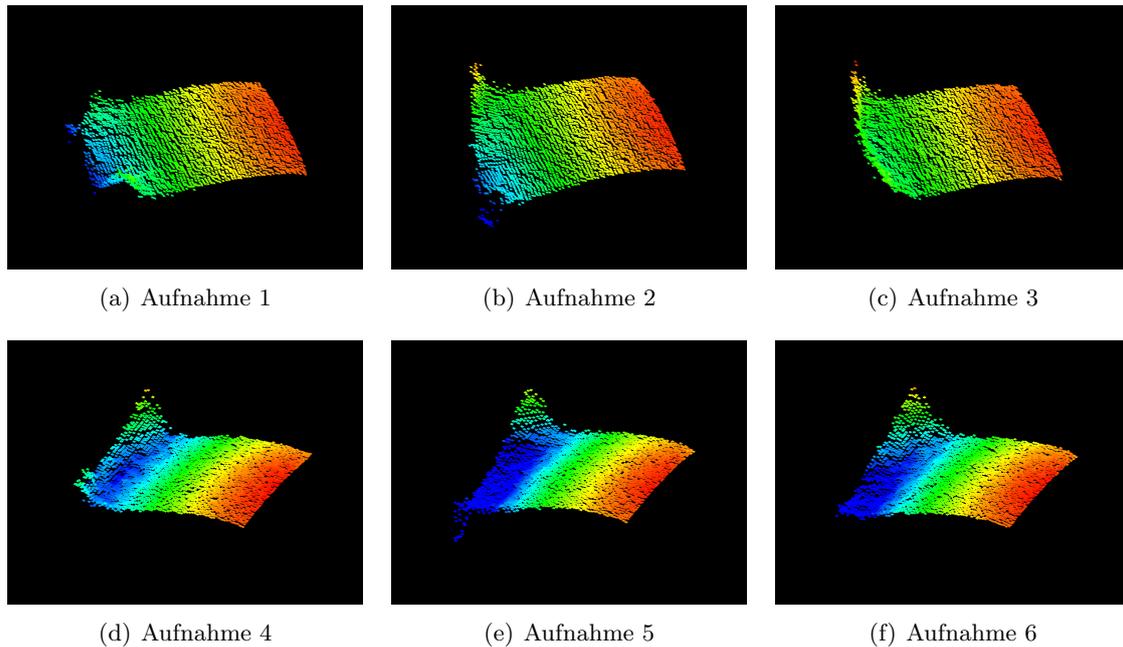


Abbildung 4.15: Fehlmessungen bei Bodenaufnahmen

Für die Milderung von Fehlmessungen ist die in (MWSP06) erwähnte Formel für Messunsicherheiten

$$\Delta L = \frac{L}{\sqrt{8}} \cdot \frac{\sqrt{I}}{2 \cdot A} \quad (4.2)$$

mit

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_{mod}} \quad (4.3)$$

hilfreich, wobei ΔL die Ungenauigkeit bezeichnet. I und A stellen die Intensität und Amplitude, f_{mod} stellt die Modulationsfrequenz, die $20MHz$ beträgt (Punkt 3.1.2) dar. Die Intensitäten und Amplituden können, wie in 4.5.2 erwähnt, mit Hilfe der PMD API ermittelt werden.

Um die Formel anzuwenden, muss eine Mindestgenauigkeit gewählt werden, mit der zwischen ungenau, und genau differenziert wird. Dieser Wert wird auch Threshold genannt. Wenn ΔL über dem Threshold liegt, wird der Wert als ungenau klassifiziert, liegt er darunter als ausreichend genau. Ein niedrigerer Wert verlangt somit eine höhere Genauigkeit der Messungen. Der Threshold ist frei wählbar und muss je nach Priorität der Hinderniserkennung für gute Ergebnisse angepasst werden (mehr dazu findet sich im folgenden Absatz).

Wird dieses Verfahren auf jeden Pixel im gewonnenen Entfernungsbild angewandt und nur ausreichend genau klassifizierte Werte weiterverwendet, so entsteht ein gefiltertes Bild. Beispiele dazu finden sich in Abbildung 4.12, welche in Punkt 4.5 erklärt wird, sowie Abbildung

4.16. Hier befindet sich links ein graustufen kodiertes, unverarbeitetes Entfernungsbild und rechts ein farbkodiertes Entfernungsbild, in dem zusätzlich die mit dem Filter der Formel 4.2 erkannten, unsicheren Werte gelb eingezeichnet sind. Die blauen Pixel bezeichnen hierbei Pixel außerhalb der Maximalentfernung.

Es lassen sich mit Hilfe des Filters durch Reflexionen entstandene Fehler mildern, allerdings gibt es keine perfekte Einstellung für den Threshold, denn es kann mit jeder Wahl des Thresholds zu beidseitigen Falschklassifizierungen kommen. Es können sowohl richtig gemessene Entfernungen als ungenau klassifiziert werden, als auch fehlerhafte Reflexionen als ausreichend genau (siehe 5.1). Es muss also ein für die Aufgabe sinnvoller Kompromisswert gefunden werden.

Bei der in der Bachelorarbeit beschriebenen Konfiguration eignet sich dazu ein empirisch ermittelter Wert zwischen 0,25 und 0,5.

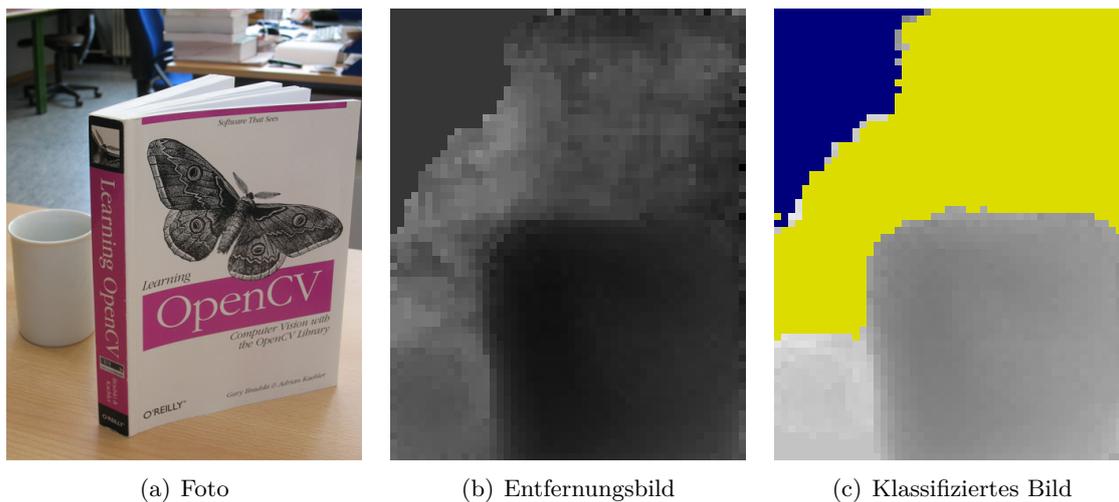


Abbildung 4.16: Ungenauigkeiten bei Entfernungsaufnahme 2

4.5.5 Befahrbare Fläche und Hindernisse ermitteln

Im Gegensatz zum waagrecht angebrachten Laserscanner hat der PMD Sensor, wie schon in 4.5 erwähnt, den Boden im Blickfeld. Dadurch ist es nötig den Boden im Bild zu erkennen und als solchen zu werten, anstatt als Hindernis. Außerdem können dadurch auch negative Hindernisse, wie Treppenabgänge ermittelt werden. Es gibt mehrere Verfahren befahrbare Flächen zu ermitteln.

4.5.5.1 Einfaches Abstandsverfahren

Das einfache Abstandsverfahren nimmt an, der Boden sei parallel zur Auflagefläche des Roboters, welche in Abbildung 4.17 rot eingezeichnet ist. Jeder gemessene Wert, welcher sich nicht innerhalb eines bestimmten Abstands zum Boden befindet stellt eine Abweichung zum Boden dar und wird als Hindernis klassifiziert.

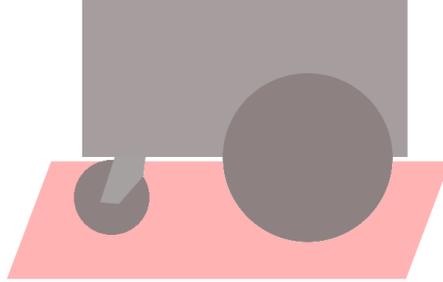


Abbildung 4.17: Auflagefläche eines Roboters rot dargestellt

Damit beschränkt sich das Verfahren auf befahrbare Flächen, die keine Unebenheiten oder Rampen aufweisen, was in einem Anwendungsfall von normalen Innenräumen ausreichend ist. Für jeden Pixel wird überprüft ob er sich innerhalb eines bestimmten Abstands zum theoretischen Boden befindet. Der theoretische Abstand des Bodens von jedem Pixel hängt von der Kamerahöhe und ihrem Neigungswinkel ab, sowie von dem Winkelpaar des Pixels, denn jeder Pixel zeigt einen anderen Punkt der Szene und somit existiert auch für jeden Pixel ein anderer theoretischer Abstand zum Boden.

Die theoretische Entfernung zum Boden d_T beträgt

$$d_T = \frac{h_C}{\cos(90^\circ - \beta_P + \beta_C) \cdot \cos(\alpha_P)} \quad (4.4)$$

wobei h_C die Höhe der Kamera, β_P und β_C die Neigungswinkel des Pixels bzw. der Kamera und α_P den Drehwinkel des Pixels beträgt.

Ist ein gemessener Entfernungswert kleiner als d_T , so wird das Hindernis unmittelbar an seiner Position angenommen. Ist die gemessene Entfernung allerdings größer als d_T , so muss das Hindernis in der Entfernung der Kante eingezeichnet werden, da die Entfernungswerte innerhalb des toten Winkels verdeckt sind und somit der erste erkannte Pixel der tieferen Ebene in einer größeren Entfernung als der Kante liegt. Ein Beispiel dazu befindet sich in Abbildung 4.18, in der durch die Kante in 11 cm Entfernung des Sensors ein Hindernis entsteht. Die Kante selbst bzw. die näheren Messungen befinden sich innerhalb eines Fensters des theoretischen Bodens, gelten also nicht als Hindernisse. Das erste negative Hindernis wird

in einer Entfernung von 20 cm festgestellt. Durch die Fehlinterpretation das Hindernis sei in einer Entfernung von 20 cm kann eine Kollisionsvermeidung nicht fehlerfrei statt finden, da sich das wirkliche Hindernis in 11 cm Entfernung befindet. Eine einfache Näherung des echten Hindernisses ist durch die Verwendung des theoretischen Bodenwerts als virtuelles Hindernis am Pixel bzw. Strahl des negativen Hindernisses möglich. Da die Entfernung des erwarteten befahrbaren Boden überschritten wird, muss sich an dieser Stelle ein Hindernis befinden.

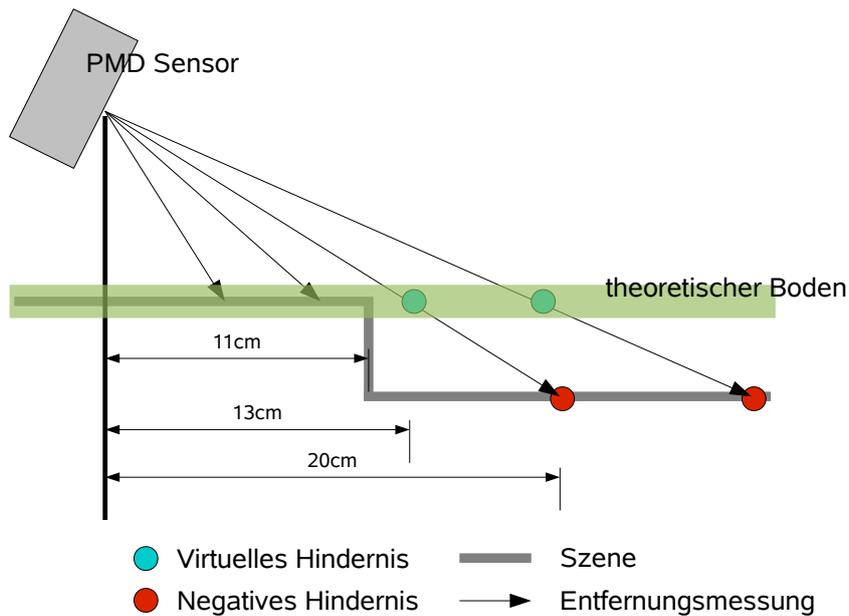


Abbildung 4.18: Negative Hindernisse

Aufgrund der Messungenauigkeiten des PMD Sensors, also die Abweichung von den theoretisch perfekten Messwerten (Vergleich zwischen Abbildung 4.19 und 4.15), und Unebenheiten des Bodens in der echten Welt wird für jeden gemessenen Entfernungswert geprüft, ob er sich innerhalb eines Abstands bzw. eines Fensters zum theoretisch angenommenen Boden befindet. Weil der Fehler der Messung, wie in Tabellen 4.1 und 4.3 beobachtbar, mit steigender Entfernung zunimmt, ist es sinnvoll, das Fenster mit steigender Entfernung zu vergrößern, wozu sich die Berechnung der prozentualen Differenz zwischen theoretischem und gemessenem Wert in Formel 4.5 gut eignet.

$$\Delta d = \frac{|d_T - d_M|}{d_T} \quad (4.5)$$

d_M ist hierbei die gemessene Entfernung.

Die Größe des Fenster wird durch einen Threshold bestimmt, der mit der prozentualen Abweichung Δd verglichen wird. Bei Überschreitung des Thresholds wird der Messpunkt als

Hindernis klassifiziert, so wird z. B. bei einem Threshold von 10% und einem theoretisch Abstand zum Boden von 100 *cm* ein gemessener Wert in Abstand von 91 *cm* bzw. 109 *cm* als Boden, ein gemessener Wert in Abstand von 89 *cm* als Hindernis eingeordnet.

Dieser Threshold muss je nach Messgenauigkeit bzw. Rauschen des Sensors angepasst werden. Ist das Fenster zu groß, werden Hindernisse von geringer Größe fälschlicherweise als Boden klassifiziert, ist es zu klein, werden Messfehler oder unebener Boden als unbefahrbar bewertet. Bei der in der Bachelorarbeit beschriebenen Konfiguration eignet sich dazu ein empirisch ermittelter Wert zwischen 7% und 12%.

Da später zur Umrechnung in das Laserkoordinatensystem die kartesischen Koordinaten der gemessenen Werte errechnet werden, könnte auch mit Hilfe der z -Koordinate jedes Punktes und der z_0 -Ebene, welche als theoretischer Boden angenommen werden kann, überprüft werden, ob sich ein Punkt innerhalb eines bestimmten Bereichs zum Boden befindet.

Allerdings besteht der Vorteil des auf Formel 4.4 basierten Vorgehens darin, dass zur Performancesteigerung Werte, die als Boden klassifiziert werden, nicht mehr in das Laserkoordinatensystem und damit auch nicht in das kartesische Koordinatensystem umgerechnet werden müssen, da die Kollisionsvermeidung schließlich nur Hindernisse benötigt, nicht aber Werte die als befahrbar gelten, da alles was kein Hindernis ist als befahrbar gilt.

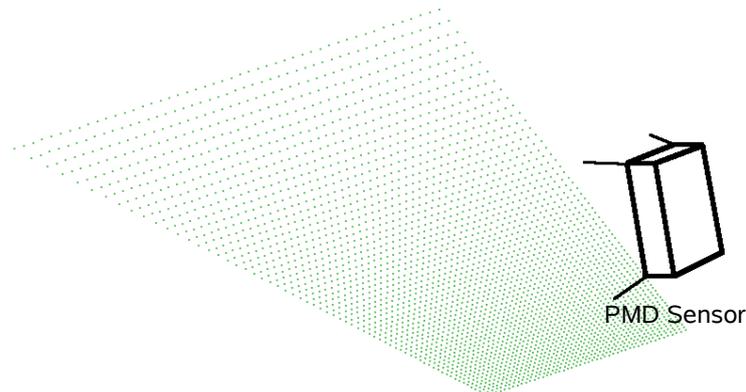


Abbildung 4.19: Theoretisch perfekte Messwerte eines PMD Sensors für eine ebene Fläche

4.5.5.2 Bodenkalibrierungsverfahren

Im Unterschied zum einfachen Abstandsverfahrens in Punkt 4.5.5.1 werden beim Bodenkalibrierungsverfahren keine theoretisch errechneten Punkte als Boden angenommen, sondern

echte Messungen.

Das heißt es werden in einer kurzen Kalibrierungszeit vor dem Betrieb mehrere Bilder aufgenommen, diese Bilder zur Rauschminimierung gemittelt und diese Werte als Abstände zum Boden angenommen. Während der Kalibrierungszeit muss für optimale Ergebnisse ein freies Sichtfeld der Sensoren auf einen ebenen Boden garantiert sein.

Der Sinn dieses Verfahrens ist die Beseitigung der Schwäche des im Punkt 4.5.5.1 besprochenen einfachen Abstandsverfahrens, das durch die systematischen Kamerafehler aus Punkt 3.1.3 selbst eine störungs- und rauschfreie Messung keine perfekte Ebene wiedergeben würde. Dazu müsste ein vorhergehender Kalibrierungsvorgang durchlaufen werden.

Durch das Bodenkaliierungsverfahren hingegen werden die konstanten systematischen Fehler bei der Bodenerkennung erwartet und die durchschnittliche Abweichung zwischen gemessenem und theoretischem Boden ist daher geringer als beim einfachen Abstandsverfahren, was durch den Vergleich der Tabellen 4.5, 4.6 und 4.7 erkannt werden kann. In diesen Tabellen wird für vier willkürlich gewählte Pixel die theoretische Entfernung zum Boden ermittelt (bei kalibrierungslosem Verfahren errechnet, bei Kalibrierung gemessen), dann für diese Pixel acht Messwerte zum Boden genommen und mit dem theoretischen Wert verglichen. Die Integrationszeit beträgt bei den Messungen $450 \mu s$. Der maximale relative Messfehler sinkt mit Verwendung der Bodenkaliierung von 13% auf 5%. Sogar bei Wechsel des Bodens und der damit verbundenen Änderung der Bodenbeschaffenheit, was Einfluss auf die Messwerte nimmt, beträgt der maximale relative Messfehler mit 7% weniger als der ohne Kalibrierung. Damit kann der in 4.5.5.1 beschriebene Threshold erniedrigt werden, z. B. auf einen während der Bachelorarbeit empirisch ermittelten Wert zwischen 3% und 8%.

Nachteile des Verfahrens sind unterschiedliche theoretische Bodenwerte für ebene Böden unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten und der technische, sowie zeitliche Aufwand der Kalibrierung.

Ohne Kalibrierung				
Pixel	a	b	c	d
theo. Entf.	72,1	69,81	65,09	62,89
Messwert 1	65,09	60,57	59,55	57,09
rel. Fehler	0,10	0,13	0,09	0,09
Messwert 2	67,67	63,17	60,91	60,26
rel. Fehler	0,06	0,10	0,06	0,04
Messwert 3	65,32	60,93	59,56	57,63
rel. Fehler	0,09	0,13	0,08	0,08
Messwert 4	65,27	60,73	60,47	58,37
rel. Fehler	0,09	0,13	0,07	0,07
Messwert 5	67,25	63,62	61,77	58,78
rel. Fehler	0,07	0,09	0,05	0,07
Messwert 6	65,71	61,91	59,99	58,7
rel. Fehler	0,09	0,11	0,08	0,07
Messwert 7	66,71	62,19	62,14	59,76
rel. Fehler	0,07	0,11	0,05	0,05
Messwert 8	67,79	64,43	61,6	60,37
rel. Fehler	0,06	0,08	0,05	0,04
Mittel rel. F	0,08	0,11	0,07	0,06
max. rel. F	0,13			

Tabelle 4.5: Messwertfehler ohne Kalibrierung

Mit Bodenklibrierung				
Pixel	a	b	c	d
theo. Entf.	66,17	62,68	61,15	59,80
Messwert 1	67,34	64,84	62,06	59,49
rel. Fehler	0,02	0,03	0,01	0,01
Messwert 2	67,03	63,36	60,39	60,74
rel. Fehler	0,01	0,01	0,01	0,02
Messwert 3	67,47	63,63	61,89	59,73
rel. Fehler	0,02	0,02	0,01	0,00
Messwert 4	69,35	63,92	61,81	60,02
rel. Fehler	0,05	0,02	0,01	0,00
Messwert 5	68,8	64,44	61,87	60,94
rel. Fehler	0,04	0,03	0,01	0,02
Messwert 6	68,07	61,82	62,64	61,16
rel. Fehler	0,03	0,01	0,02	0,02
Messwert 7	68,82	64,25	63,45	60,61
rel. Fehler	0,04	0,03	0,04	0,01
Messwert 8	68,62	63,39	63,12	60,89
rel. Fehler	0,04	0,01	0,03	0,02
Mittel rel. F	0,03	0,02	0,02	0,01
max. rel. F	0,05			

Tabelle 4.6: Messwertfehler mit Kalibrierung

Mit Bodenkalisierung nach Bodenwechsel				
Pixel	a	b	c	d
theo. Entf.	66,85	62,91	61,03	60,68
Messwert 1	68,03	67,01	61,99	60,94
rel. Fehler	0,02	0,07	0,02	0,00
Messwert 2	67,96	66,06	60,88	59,97
rel. Fehler	0,02	0,05	0,00	0,01
Messwert 3	67,96	66,17	61,52	60,66
rel. Fehler	0,02	0,05	0,01	0,00
Messwert 4	68,40	67,11	61,68	61,16
rel. Fehler	0,02	0,07	0,01	0,01
Messwert 5	68,00	66,24	61,7	60,54
rel. Fehler	0,02	0,05	0,01	0,00
Messwert 6	68,49	66,97	61,61	60,93
rel. Fehler	0,02	0,06	0,01	0,00
Messwert 7	68,64	66,06	61,51	60,7
rel. Fehler	0,03	0,05	0,01	0,00
Messwert 8	68,3	66,41	61,75	60,33
rel. Fehler	0,02	0,06	0,01	0,01
Mittel rel. F	0,02	0,06	0,01	0,00
max. rel. F	0,07			

Tabelle 4.7: Messwertfehler mit Kalibrierung nach Wechsel der Bodenbeschaffenheit

4.5.5.3 Nutzen des Ransac Algorithmuses

Eine weiteres mögliches Verfahren basiert auf dem Ransac Algorithmus. Dabei wendet man den in 3.2 besprochenen Ransac Algorithmus auf die Messwerte im kartesischen Koordinatensystem an, um Flächen zu erhalten und zu bewerten, welche davon dem Boden entsprechen. Die Punkte dieser Flächen werden daraufhin, wie auch bei den obigen Verfahren, nicht als Hindernisse bewertet. Da die Punkte im kartesischen Koordinatensystem vorliegen müssen, ist die Anwendung des Verfahrens an einer geeigneten Stelle bei der Umrechnung ins Laserkoordinatensystem (siehe 4.5.6) empfehlenswert, da zur Umrechnung kartesische Koordinaten genutzt werden und so kein Mehraufwand entsteht. Eine geeignete Stelle findet sich z. B. nach Formel 4.11, da dort dreidimensionale kartesische Koordinaten vorliegen. In dieser Bachelorarbeit wird auf die Ransac Implementierung der Softwarebibliothek MRPT (Mobile Robot Programming Toolkit) zugegriffen (MRP09), wodurch die Robustheit des Algorithmuses garantiert ist und der Eigenaufwand minimiert wird.

Die einfachste Anwendung dieses Verfahrens sucht eine einzige Fläche in der Punktwolke und nimmt diese ohne weitere Prüfungen als Boden an. Die restlichen Punkte werden als Hindernisse gewertet. Bei einer wie in 4.3 ermittelten Platzierung kann angenommen werden, dass in den meisten Fällen der Großteil der Messungen dem Boden entsprechen, somit also mit dem Ransac Algorithmus die richtige Fläche gefunden wird. Bei der Mehrheit der Fehlklassifikationen des Bodens kann davon ausgegangen werden, dass nähere Messwerte anderer Flächen als Hindernisse erkannt werden und dadurch zwar früher, aber dennoch ausgewichen wird, oder dass der Laserscanner das Hindernis erkennt und dadurch ausgewichen wird, was z. B. bei einer Wand der Fall ist.

In Abbildung 4.20 ist ein Beispiel mit echten Messwerten dargestellt, in dem das untere Bild das Resultat des Algorithmuses auf die Punktwolke im oberen Bild darstellt. Die beiden Bilder stellen die Szene, in der sich ein umgedrehter Becher auf dem Boden befindet, von seitlich oben und von der Seite dar. Es ist erkennbar, dass der Ransac Algorithmus erfolgreich die Bodenfläche ermittelt hat.

Ein fataler Fehlerfall ist dadurch möglich, dass sich direkt vor dem Roboter eine unbefahrbare ebene Fläche befindet, die zwar vom PMD Sensor erkannt wird, aber nicht vom Laserscanner. Diese Fläche wird dann falscherweise als befahrbar klassifiziert. Zur korrekten Klassifikation kann z. B. mit Hilfe der Parameter der Fläche, in diesem Fall vor allem Steigung und z-Abstand zum Roboter in dessen Nähe, ermittelt werden, ob die gefundene Fläche dem Boden entsprechen kann.

Ein anderer Fehler wird durch negative Hindernisse wie Treppenabgänge verursacht, da keine nahen virtuellen Hindernisse wie in 4.5.5.1 und Abbildung 4.18 erstellt werden.

Nr.	Iterationen	Threshold	Anzahl Punkte	Bearbeitungszeit
1	100	0,01	100%	24 s
2	100	0,01	100%	22 s
3	100	0,01	100%	25 s
4	100	0,01	100%	24 s
5	100	0,01	100%	23 s
6	100	0,01	100%	27 s
7	10	0,01	25%	623 ms
8	10	0,01	25%	744 ms
9	10	0,01	25%	601 ms
10	10	0,01	25%	625 ms
11	10	0,01	25%	884 ms
12	10	0,01	25%	570 ms
13	8	0,01	16,66%	310 ms
14	8	0,01	16,66%	321 ms
15	8	0,01	16,66%	298 ms
16	8	0,01	16,66%	350 ms
17	8	0,01	16,66%	320 ms
18	8	0,01	16,66%	307 ms

Tabelle 4.8: Zeitmessungen für verschiedene Parametereinstellungen des Ransac Algorithmus

In einer exemplarischen Implementierung wird dieses einfache Verfahren zu Testzwecken auf dem Zielsystem umgesetzt und anhand eines Thresholds von $e = 0,1$ (siehe 3.2) getestet. Die Wahl der Thresholds fiel auf 10%, da sich das Rauschen innerhalb diesen Bereichs befindet. Die Testszene beinhaltet einen Styroporwürfel auf dem Boden, wie in Abbildung 5.1(a). Die zeitlichen Ergebnisse des Tests, die in Tabelle 4.8 festgehalten sind, zeigen, dass selbst durch starke Reduktion der Iterationen und Anzahl der Punkte, auf die der Algorithmus angewandt wird, kein wie in 4.1 gewünschter zeitlicher Rahmen erreicht wird, sondern ein Vielfaches davon beträgt. Da selbst bei 8 Iterationen und Verwendung von 16,66% der Punkte gelegentlich nicht die gewünschte Bodenfläche mit dem Ransac Algorithmus gefunden wird, bedeutet eine weitere Reduktion des Aufwands zur Rechenzeitreduktion eine weitere Erhöhung der Wahrscheinlichkeit der Falschklassifikation der Bodenfläche, was nicht tragbar ist.



(a) Ausgangsbild



(b) Anwendung von Ransac

Abbildung 4.20: Vergleichsbilder zu Ransac

4.5.6 Bestimmung der PMD Daten im Laser Koordinaten System

Damit die CDL Komponente die Hindernisse an der richtigen Position einordnen kann, müssen aus der Position des PMD Sensors und den vom PMD Sensor gemessenen Entfernungen die Hindernisse in das Polarkoordinatensystem des Laserscanners umgerechnet werden, da in 4.2 der Ansatz gewählt wird, die PMD Daten als virtuellen Laserscan zu nutzen. Dabei wird das in Abbildung 4.21 beschriebene Vorgehen verfolgt: Aus den PMD Daten werden dreidimensionale kartesische Koordinaten der Punkte errechnet, danach ins zweidimensionale kartesische Koordinatensystem des Laserscanners umgewandelt. Daraufhin können die Polarkoordinaten im Raum des Laserscanners berechnet werden, was einem virtuellem Laserscan gleichkommt. Schließlich können die Daten des PMD Sensors somit mit den Daten des Laserscanners fusioniert werden, da sich beide Punktemengen im gleichen Koordinatensystem befinden. Der fusionierte virtuelle Laserscan wird an die CDL Komponente weitergereicht.

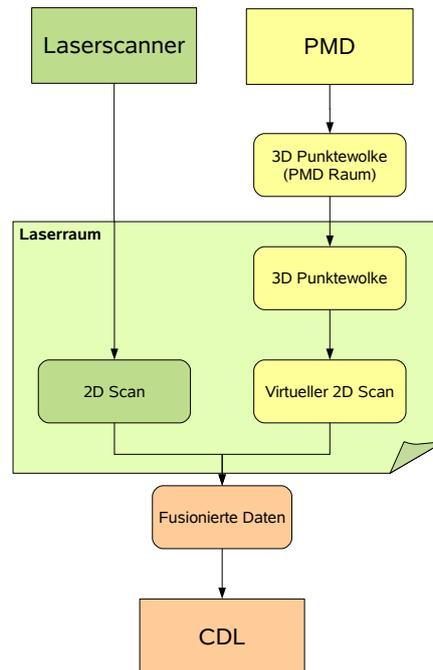


Abbildung 4.21: Fusion der Laser und PMD Daten

Zur Umrechnung müssen die Parameter in Tabelle 4.9 bekannt sein.

Die Drehung der Kamera um den dritten Winkel, welcher um die y-Achse verläuft, wird bis auf 90° Intervalle vernachlässigt, da eine Montage zwischen diesen Intervallen unwahrscheinlich ist und für den Anwendungsfall dadurch keine Vorteile gewonnen werden. Die Beachtung der Drehung um diese Intervalle wird bei der Berechnung der Neigungs- und Drehwinkel der Pixel vorgenommen, bei der auch eine eventuelle Spiegelung des Bildes zum Ausgleich der gespiegelten Aufnahmen des PMD Sensors berücksichtigt wird.

Des Weiteren entfällt die Notwendigkeit den z-Offset der Kamera zum Laserscanner zu wissen, da das Laserkoordinatensystem, sowie das CDL Koordinatensystem zweidimensional ist, das heißt es geschieht eine Projektion der 3D Punkte auf eine 2D Ebene.

Name	Bezeichnung
h_C	Höhe (z-Koordinate) der PMD Kamera
β_P	Neigungswinkel des Pixels
α_P	Drehwinkel des Pixels
β_C	Neigungswinkel der Kamera
α_{CL}	Drehwinkeloffset der PMD Kamera zum Laserscanner
x_{CL}	x-Offset der PMD Kamera zum Laserscanner
y_{CL}	y-Offset der PMD Kamera zum Laserscanner
d_M	gemessene Entfernung des Punktes mit der PMD Kamera

Tabelle 4.9: Bezeichnung der Variablen 1

Der Parameter d_M wird vom PMD Sensor geliefert, β_P und α_P können errechnet werden. Für die restlichen Parameter aus Tabelle 4.9 existieren zwei Möglichkeiten zur Ermittlung: Ein Kalibrierungsvorgang durch Korrelation eines Laserscans und eines PMD Bildes, wie in (YSP⁺09) oder durch manuelle Messung. Eine Kalibrierung benötigt einen bestimmten Aufbau einer Szene und einen Korrelationsalgorithmus, läuft dann aber im Gegensatz zur manuellen Messung automatisch ab. Da die Anzahl der zu messenden Parameter gering ist, der Aufwand des manuellen Messungsvorgangs bei der Geometrie des Roboters gering ausfällt, und eine Änderung der Sensorplatzierung und die damit verbundenen Neumessungen sehr selten anfallen, ist die Wahl der manuellen Messung naheliegender als die der Kalibrierung. Durch diese Wahl müssen alle oben genannten Parameter, bis auf d_M , β_P und α_P , gemessen und explizit angegeben werden.

Die folgenden Rechnungen beziehen sich auf den gelben rechten Teilbaum der Abbildung 4.21 und basieren auf der Trigonometrie bzw. auf den Matrizenrechnungen für Translation, sowie Rotation.

Name	Bezeichnung
x_0	x-Koordinate des Punktes im kartesischen PMD Koordinatensystem
y_0	y-Koordinate des Punktes im kartesischen PMD Koordinatensystem
z_0	z-Koordinate des Punktes im kartesischen PMD Koordinatensystem
x_1	x-Koordinate des Punktes im PMD System unter Beachtung des Neigungswinkels β_C
y_1	y-Koordinate des Punktes im PMD System unter Beachtung des Neigungswinkels β_C
z_1	z-Koordinate des Punktes im PMD System unter Beachtung des Neigungswinkels β_C
x_L	x-Koordinate des Punktes im kartesischen Laserkoordinatensystem
y_L	y-Koordinate des Punktes im kartesischen Laserkoordinatensystem
z_L	z-Koordinate des Punktes im kartesischen Laserkoordinatensystem
r_L	r-Koordinate des Punktes im Laserpolarkoordinatensystem
ϕ_L	phi-Koordinate des Punktes im Laserpolarkoordinatensystem

Tabelle 4.10: Bezeichnung der Variablen 2

Zur Berechnung der dreidimensionalen kartesischen Koordinaten eines Punktes können mit Hilfe der Pixelwinkel und dem gemessenen Abstand folgende Formeln angewandt werden:

$$x_0 = d_M \cdot \cos(\beta_P) \cdot \sin(\alpha_P) \quad (4.6)$$

$$y_0 = d_M \cdot \cos(\alpha_P) \cdot \cos(\beta_P) \quad (4.7)$$

$$z_0 = d_M \cdot \cos(\alpha_P) \cdot \sin(\beta_P) \quad (4.8)$$

Unter Beachtung des Neigungswinkels β_C können die Punkte mit Hilfe einer Rotation um die x-Achse in einem Koordinatensystem dargestellt werden, dessen xy-Ebene parallel zu Auflagefläche (Abbildung 4.17) ist. Dieses Koordinatensystem ist in Abbildung 4.22 beschrieben.

$$x_1 = x_0 \quad (4.9)$$

$$y_1 = y_0 \cdot \cos(\beta_C) - z_0 \cdot \sin(\beta_C) \quad (4.10)$$

$$z_1 = y_0 \cdot \sin(\beta_C) + z_0 \cdot \cos(\beta_C) \quad (4.11)$$

Nun erfolgt mit Hilfe einer Rotation um die z-Achse und Translation um den Abstandsvektor zwischen PMD Sensor und Laser die Umrechnung in das kartesische Laserkoordinatensystem:

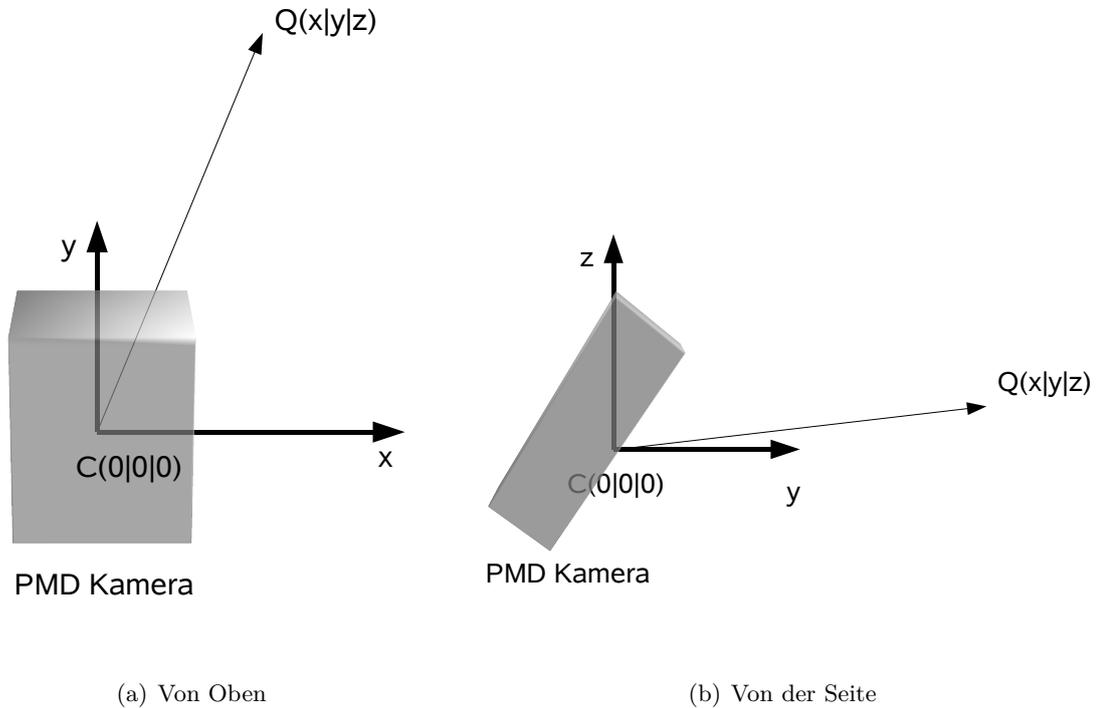


Abbildung 4.22: Koordinatensystem des PMD Sensors

$$x_L = x_1 \cdot \cos(\alpha_{CL}) + y_1 \cdot -\sin(\alpha_{CL}) + x_{CL} \quad (4.12)$$

$$y_L = x_1 \cdot \sin(\alpha_{CL}) + y_1 \cdot \cos(\alpha_{CL}) + y_{CL} \quad (4.13)$$

Da das kartesische Laserkoordinatensystem zweidimensional ist, werden die Punkte auf die z-Ebene projiziert. Somit entfällt der z-Wert.

Als letztes wird vom kartesischen in das Polarkoordinatensystem des Laserscanners umgerechnet:

$$r_L = \sqrt{x_L^2 + y_L^2} \quad (4.14)$$

$$\phi_L = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_L}{x_L}\right) & \text{für } x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y_L}{x_L}\right) + \pi & \text{für } x < 0, y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y_L}{x_L}\right) - \pi & \text{für } x < 0, y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0, y < 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

4.5.7 Fusion und Senden der Daten

Bei der Fusion wird der aktuelle Laserscan der Laser Server Komponente gewonnen und mit den PMD Daten fusioniert.

Dabei ist es sinnvoll die Datenmenge der PMD Sensoren zu minimieren, welche wie in 3.1.2 ermittelt bis zu $3072 \cdot \text{Anzahl PMD Sensoren}$ Punkten betragen kann. Da aus den Werten ein virtueller Laserscan erstellt wird (siehe 4.2), ist es naheliegend, bei der Zuordnung der PMD Messungen durch die Winkelkoordinate ϕ_L zum jeweiligen Laserstrahl bzw. zur jeweiligen Bin den minimalen Entfernungswert r_L pro Bin zu ermitteln und nur diese PMD Messungen im virtuellen Laserscanner einzufügen. Dadurch reduziert sich die maximale Anzahl an Punkten vom PMD Sensor auf 360, da der Laserscanner, wie in 2.7 geschildert, 360 Werte misst und dadurch 360 Bins besitzt.

Zur Erläuterung ist in Abbildung 4.23 ein theoretisches Beispiel dargestellt. Die blauen PMD Messungen werden zur nächstgelegenen Bin zugeordnet und für jede Bin wird die PMD Messung in den virtuellen Laserscan eingefügt, die den kürzesten Entfernungswert besitzt. Ist eine Lasermessung vorhanden, wird diese zusätzlich in den virtuellen Laserscan eingefügt. Es sind also maximal zwei Messungen pro Bin möglich, was im virtuellen Laserscan eine maximale Gesamtanzahl an Messungen von $360 \cdot 2 = 720$ ergibt. Die Anzahl der PMD Sensoren spielt dabei keine Rolle, allerdings müssen die PMD Messungen im Koordinatensystem des Laserscanners vorliegen um das Verfahren anzuwenden.

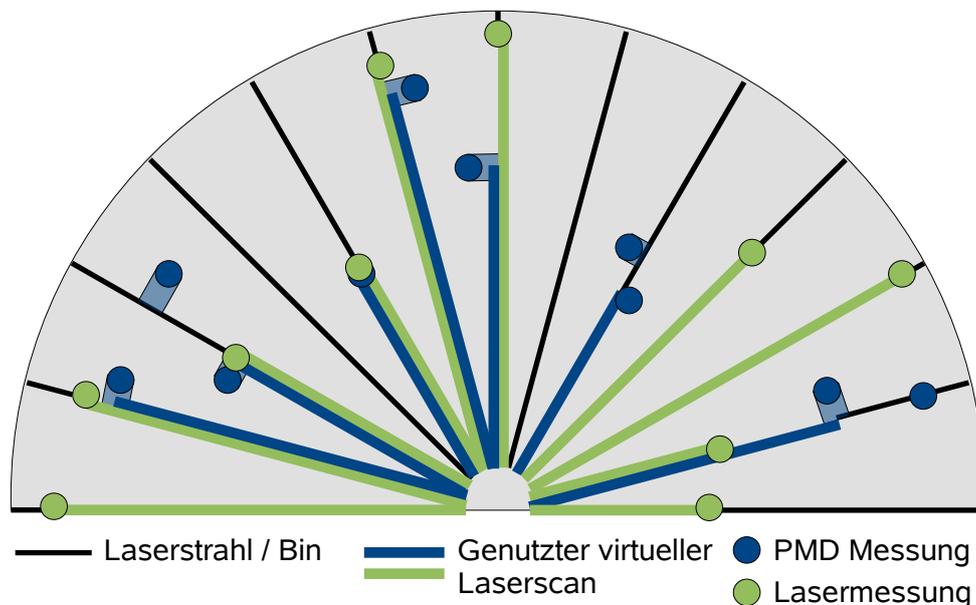


Abbildung 4.23: Theoretisches Beispiel des Mergingverfahrens

Da die Kollisionsvermeidung erinnerungslos ist, also nur mit aktuellen Werten arbeitet und zuerst den näheren Hindernissen ausweichen muss, entsteht durch den Verlust der weiter entfernten Messungen kein großer Nachteil. Daher ist diese Art der Reduktion an Messwerten zur Performancegewinnung berechtigt.

Nach der Erstellung des gesamten virtuellen Laserscans der Daten aller PMD Sensoren und des Laserscanners ist die Verarbeitung abgeschlossen und die Daten werden der CDL Komponente zugänglich gemacht.

Mit der Bereitstellung der Daten wird, wie in 4.13 dargestellt, ein neuer Zyklus des Gesamtalgorithmuses begonnen.

Kapitel 5

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit werden anhand mehrerer Tests mit verschiedenen Konfigurationen evaluiert. Alle Tests werden mit den in 4.3 ermittelten Montageplätzen für zwei Sensoren, dem Glättungsfilter (siehe 4.5.3) und dem Filter für unsichere Messwerte (siehe 4.5.4) durchgeführt. Die Tests umfassen mehrere Szenen mit alltäglichen Gegenständen zur Beurteilung der allgemeinen Hinderniserkennung, sowie eine Szene mit einer Ecke zur Bewertung der Reflexionsfehler (siehe 3.1.3), eine Szene mit einer Rampe zur Ermittlung der Ergebnisse bei Neigung der befahrbaren Fläche und eine Szene mit einem Treppenabgang zur Bewertung negativer Hindernisse.

Fotos dieser Szenen sind in den Abbildungen 5.1 und 5.2 dargestellt.

Tests der Hinderniserkennung von höheren Objekten werden nicht durchgeführt, da sich die Hinderniserkennung durch ihren Montageplatz auf niedrige Hindernisse spezialisiert (siehe 4.3).

Von der Evaluierung der Hinderniserkennung durch den Laserscanner, dessen Messungen übernommen werden (siehe 4.2), wird abgesehen, da dies außerhalb des Fokuses der Bachelorarbeit liegt. Dabei ist zu beachten, dass vor allem die Maximalentfernung der Hinderniserkennung beim kompletten Verfahren durch den Laserscanner drastisch erhöht wird.



(a) Würfel



(b) Klebeband



(c) Mäppchen



(d) Becher



(e) Rampe



(f) Reflexionen

Abbildung 5.1: Fotos der Testszenen (Teil 1)



(a) Treppenabgang



(b) Keksdose



(c) Plastikflasche

Abbildung 5.2: Fotos der Testszenen (Teil 2)

5.1 Hinderniserkennung

Je mehr Hindernisse bei minimalen Reflexionsfehler korrekt erkannt werden, desto besser funktioniert die Kollisionserkennung.

Zum Testen der Hinderniserkennung werden verschiedene, empirisch ermittelte, Konfigurationen der Bodenkalibrierung mit einer Mittlung von 15 Bildern, sowie der Ransac Algorithmus anhand den Szenen mit Styroporwürfel, Klebeband, Mäppchen und Becher aus Abbildung 5.1 verwendet. Zusätzlich dazu werden die Reflexionsfehler anhand der in Foto 5.1(f) dargestellten Szene ermittelt, ebenso wie das Verhalten der Hinderniserkennung bei einer Rampe und einem Treppenabgang. Erwähnenswert ist hierbei, dass der Becher halbtransparent ist und somit schlechtere Messungen erwartet werden. Die Gegenstände in den Fotos 5.1 (a) bis (d) befinden sich in einem Abstand von 25 cm zum Roboter und besitzen die in die Tabelle 5.1 eingetragenen Maße.

Gegenstand	Maße
Styroporwürfel	$s = 15 \text{ cm}$
Klebeband	$h = 50 \text{ mm}, d_{\text{ausßen}} = 102 \text{ mm}, d_{\text{innen}} = 76 \text{ mm}$
Becher	$h = 80 \text{ mm}, d_{\text{ausßen}} = 78 \text{ mm}, d_{\text{innen}} = 75 \text{ mm}$
Mäppchen	$d = 61 \text{ mm}, l = 20 \text{ cm}$

Tabelle 5.1: Maße der Testgegenstände

Auf das Testen des einfachen Abstandsverfahrens wird verzichtet, da in 4.5.5.2 gezeigt wird, dass das Bodenkalibrierungsverfahren eine Verbesserung dieses Verfahrens darstellt und somit die Priorität auf der Bodenkalibrierung liegt.

Es ist zu erwarten, dass keine ideale Konfiguration existiert, bei der alle fehlerhaften Reflexionen als solche und alle Hindernisse als solche erkannt werden, da die Reflexionsfehler nur durch das Filtern unsicherer Werte eliminiert werden, aber dieser Filter auch unsichere Messungen von Hindernissen verwirft. Wird der Threshold für diesen Filter erhöht, so werden zwar Hindernisse besser erkannt, aber auch Reflexionsfehler eher als Hindernisse klassifiziert. Des Weiteren ist zu erwarten, dass Messungen flacher und transparenter Gegenstände schwer von den Messungen des Bodens zu unterscheiden sind. Durch das Rauschen gehen die Messungen flacher Gegenstände leicht in den Messungen des Bodens verloren und durch Transparenz tritt Infrarotlicht bei der Belichtung durch den Gegenstand hindurch, das heißt der Anteil des reflektierten Lichts, welches zur Messung notwendig ist, ist geringer und somit ist eine korrekte Messung unwahrscheinlicher.

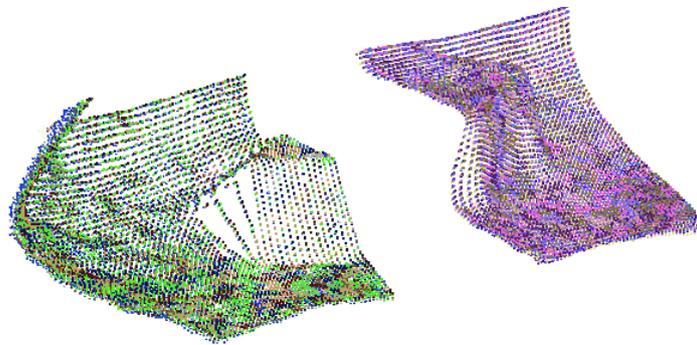
Da das Verfahren der Bodenkalibrierung, sowie das des einfachen Abstandverfahrens auf Abweichungen von Referenzwerten beruht, ist die fälschliche Erkennung einer befahrbaren Rampe als Hindernis wahrscheinlich.

5.1.1 Parametersatz A

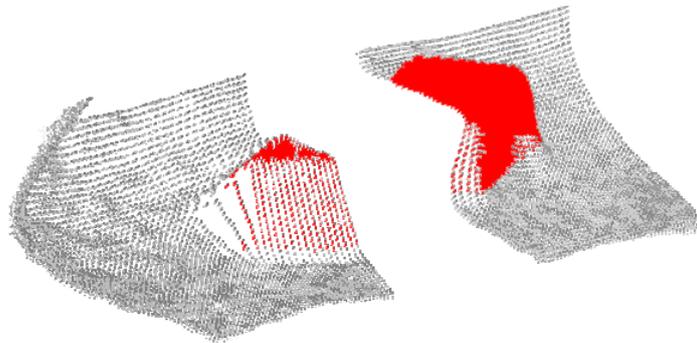
Die erste Testreihe wird bei Bodenkalibrierung mit einer Integrationszeit von $450 \mu\text{s}$, einem Threshold der Bodenklassifizierung von 7% und einem Threshold der Ungenauigkeit von 0,4 durchgeführt.

In Abbildung 5.3 befinden sich im ersten Bild die geglätteten Rohdaten der Messwerte mehrerer Messungen in einem kartesischen Koordinatensystem, bei der jede Messung in einer eigenen Farbe dargestellt ist. Im zweiten Bild befindet sich zu diesen Messwerten die Klassifizierung, bei der als Hindernis erkannte Messwerte rot eingezeichnet sind und alle anderen zum Vergleich grau. In den Bildern sind links sowie rechts die Messungen des jeweiligen Sensors

dargestellt, wobei zu beachten ist, dass der Abstand zwischen den beiden Blickfeldern nicht der Wirklichkeit entspricht, denn dort überschneiden sich diese. Zur Übersicht ist jedoch ein künstlicher Abstand eingefügt.



(a) Rohdaten

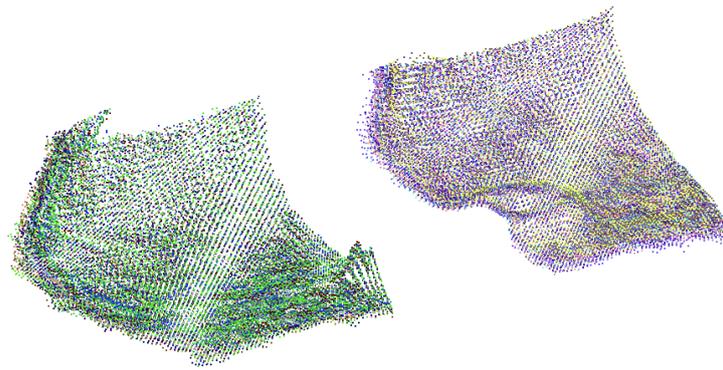


(b) Klassifizierung

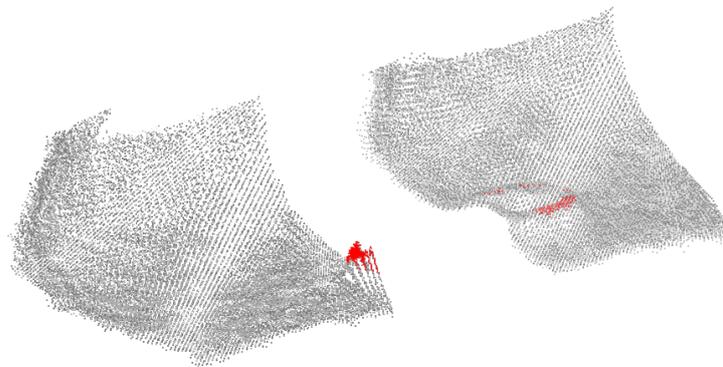
Abbildung 5.3: Kollisionserkennung A für Styroporwürfel

Die aufgenommene Szene entspricht der in Abbildung 5.1(a).

Es ist zu erkennen, dass der Würfel bis auf wenige Messwerte richtig erkannt wird. Die Abhebung der Messwerte in den hinteren Bereichen der Bodenfläche entstehen durch Reflexionen und werden mit dem Filter für ungenaue Messwerte als solche klassifiziert und nicht für die Kollisionserkennung verwendet.



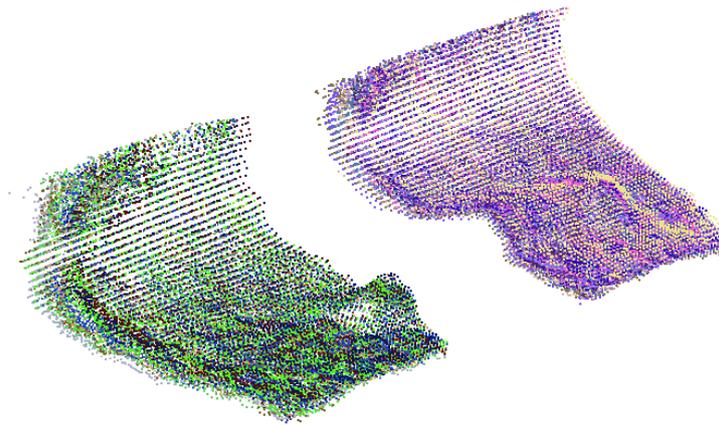
(a) Rohdaten



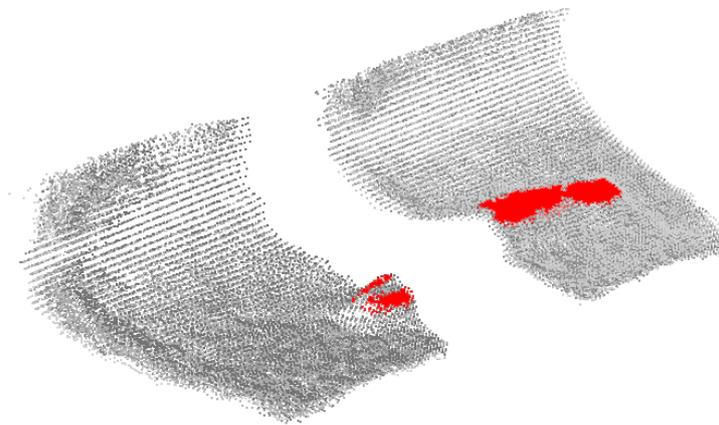
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.4: Kollisionserkennung A für Klebeband

In Abbildung 5.4 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(b) dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Hinderniserkennung deutlich schlechter ausfällt, vor allem beim rechten Sensor, da dort nur teilweise die höchsten Messungen des Klebebands als Hindernisse erkannt werden. Dies liegt hauptsächlich an dem hohen Threshold der Bodenklassifizierung von 7%, welcher eine relativ starke Abweichung zum idealen Boden zulässt. Die Hinderniserkennung des Klebebands ist dennoch ausreichend, da der Großteil der Fläche korrekt erkannt wird.



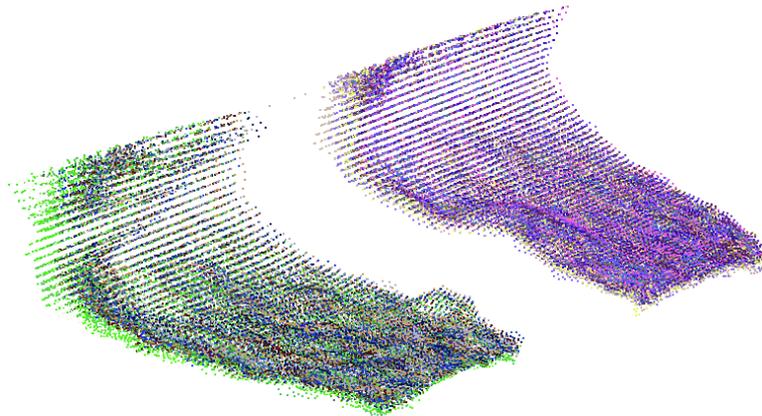
(a) Rohdaten



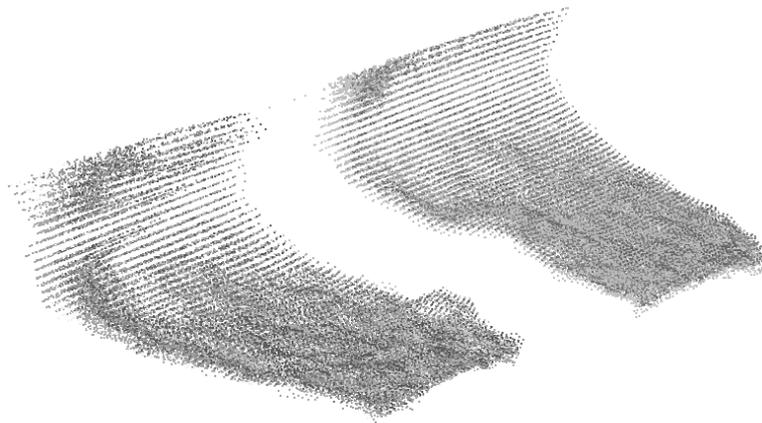
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.5: Kollisionserkennung A für Mäppchen

In Abbildung 5.5 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(c) dargestellt. Die Kollisionserkennung des Mäppchens fällt trotz vieler unerkannter Hindernispunkte erfolgreich aus, da sich über die gesamte obere Fläche des Mäppchens eine als Hindernis klassifizierte Punktwolke befindet. Die Schwächen der Erkennung mancher hoher Punkte (z. B. beim linken Sensor) entstehen dadurch, dass das Mäppchen schwarz ist und somit relativ wenig Licht zum Messen zurückgeworfen wird.



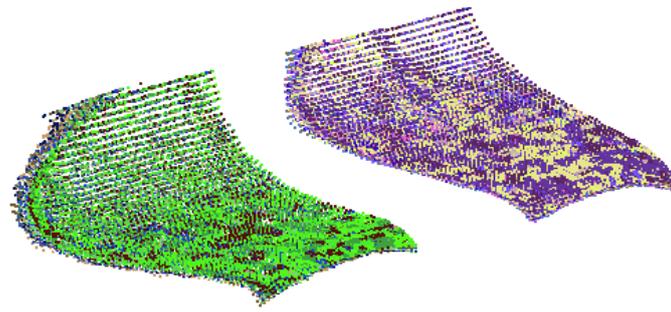
(a) Rohdaten



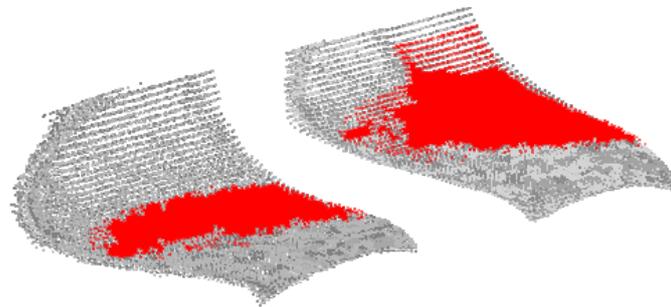
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.6: Kollisionserkennung A für Becher

In Abbildung 5.6 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(d) dargestellt. Beim Becher schlägt die Kollisionserkennung bei diesem Parametersatz fehl. Wie erwartet führt die Transparenz des Bechers nur zu sehr ungenauen Messungen, wie im Vergleich der Punktwolke zur Fotografie festzustellen ist. Da sich die Messwerte des Bechers somit innerhalb des Thresholds zur Bodenklassifizierung befinden, wird dieser fälschlicherweise als befahrbar klassifiziert.



(a) Rohdaten



(b) Klassifizierung

Abbildung 5.7: Kollisionserkennung A für Rampe

In Abbildung 5.7 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(e) dargestellt. Den Erwartungen zufolge wird eine befahrbare Fläche mit relativer Neigung zum Roboter bei Anwendung der Bodenkalibrierung fälschlicherweise als Hindernis erkannt. Das Testergebnis ist somit negativ.

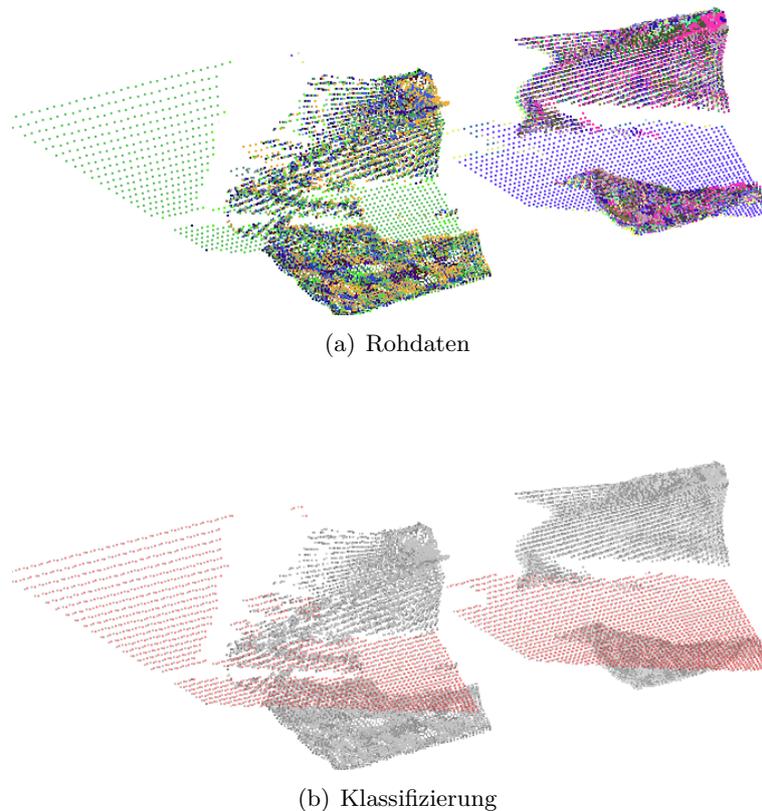


Abbildung 5.8: Kollisionserkennung für Treppenabgang

In Abbildung 5.8 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.2(a) dargestellt. Zur Veranschaulichung werden die aus negativen Hindernissen entstehenden virtuellen Hindernisse (siehe 4.5.5.1) statt den negativen Hindernissen in den Diagrammen eingezeichnet. Die hinteren positiven Werte sind durch Light Scattering an der ersten Stufe der Treppe, die sich noch im Blickfeld befindet, zu erklären. Diese werden allerdings korrekterweise als ungenaue Werte gefiltert. Die ungenauen negativen Werte hingegen werden aus Sicherheitsgründen als Hindernisse gewertet. Das Resultat ist eine korrekte Erkennung des Treppenabgangs als Hindernis.

Zu beachten ist hierbei, dass die Kollisionserkennung des negativen Hindernisses in den hinteren Bereichen wegen des Light Scatterings fehlschlägt und dies theoretisch auch in den vorderen Bereichen möglich ist. Tritt dieser Fall ein, so wird das negative Hindernis nicht erkannt und führt zu einem fatalen Fehlerfall. Während eines ausführlichen Tests ist dies jedoch nicht geschehen.

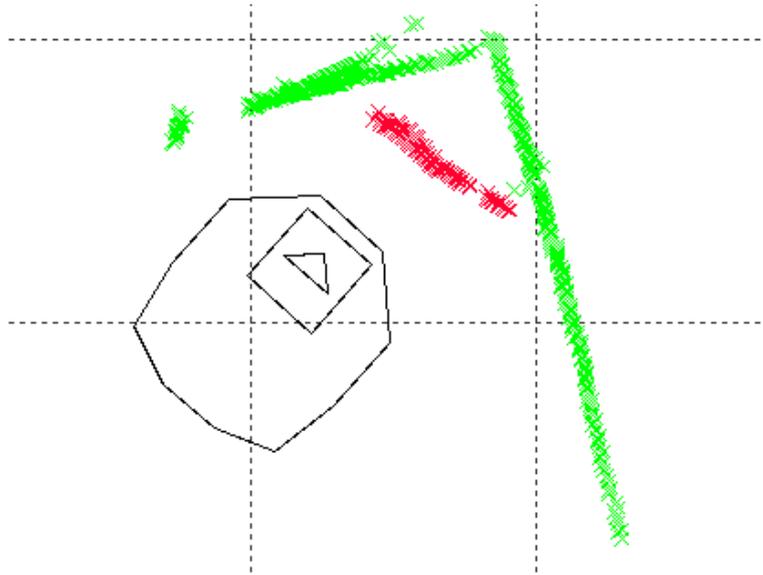


Abbildung 5.9: Multiple Ways Reflection A

In Abbildung 5.9 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(f) dargestellt. Im Gegensatz zu den vorherigen Bildern sind in dieser zweidimensionalen Darstellung zum Vergleich auch die Messwerte des Laserscanners eingezeichnet. Die schwarzen durchgezogenen Linien zeigen den Roboter an, die grünen Punkte korrekte Messungen und die roten Punkte Fehlmessungen durch Reflexionen. Die Ecke, die durch die linienförmigen Ansammlungen von Messpunkten erkennbar ist, ist vom Roboter ca. 40 cm entfernt, das falsche Hindernis ca. 20 cm. Es treten starke Reflexionsfehler auf.

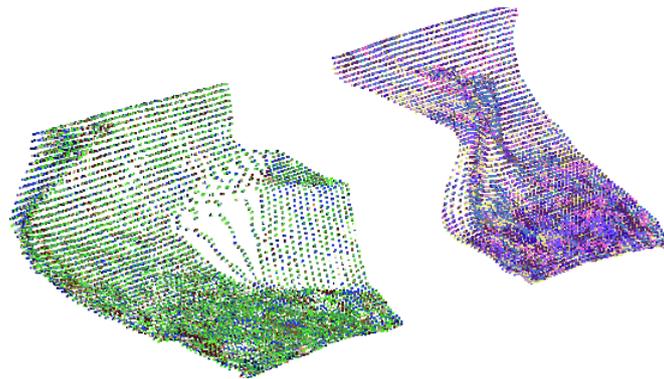
Dieser Parametersatz ist ein Kompromiss aus Kühlung des Sensors, Erkennung der Hindernisse und Minimierung der Fehler durch Reflexionen. Kleinere oder halbtransparente Hindernisse werden schlecht oder gar nicht wahrgenommen, die Fehler durch Reflexionen nehmen negativen Einfluss auf das Fahrverhalten des Roboters. Die Stärke des negativen Einflusses hängt von der Umgebung ab.

5.1.2 Parametersatz B

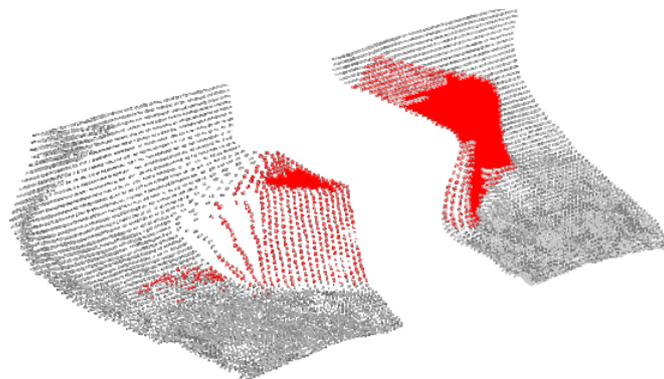
Die zweite Testreihe wird mit Bodenkalibrierung bei einer Integrationszeit von 1500 μs , einem Threshold der Bodenklassifizierung von 3% und einem Threshold der Ungenauigkeit von 0,4 durchgeführt, um eine besser Hinderniserkennung als in zu erzielen. Es wird eine erhöhte Fehlklassifikation bei Reflexionen erwartet, da der Threshold der Bodenklassifizierung niedriger als in ist.

Die aufgenommene Szene 5.10 entspricht der in Abbildung 5.1(a).

Der Würfel selbst wird korrekt erkannt, allerdings entstehen durch den Würfel Light Scatte-



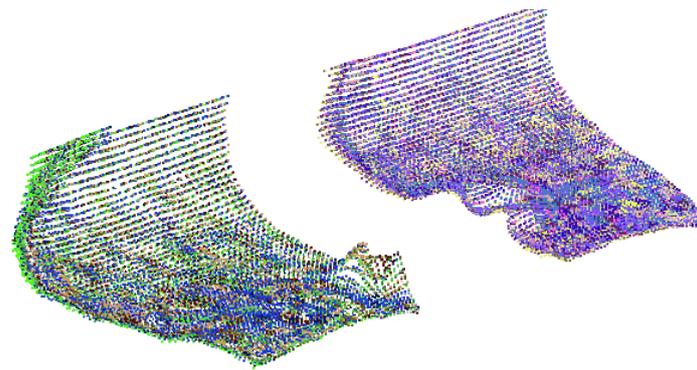
(a) Rohdaten



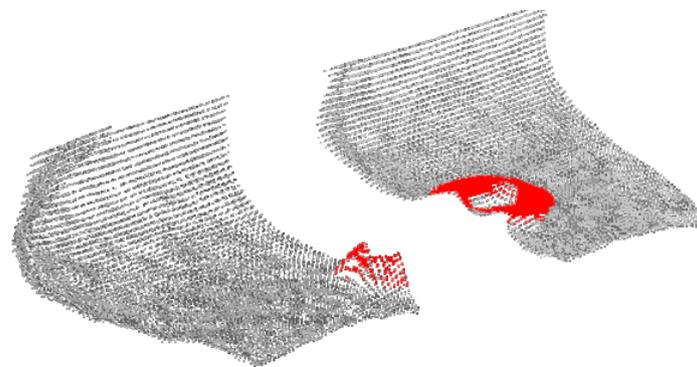
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.10: Kollisionserkennung B für Styroporwürfel

ring Reflexionsfehler und durch den niedrigen Threshold der Bodenklassifizierung werden die resultierenden fehlerhaften Messungen als Hindernisse erkannt. Dies ist beim Bild des linken Sensors links vom Würfel zu erkennen. Als Ergebnis umfährt die Kollisionsvermeidung ein größeres Hindernis, als es in der echten Welt darstellt. Die Kollisionserkennung selbst ist trotz Fehler korrekt.



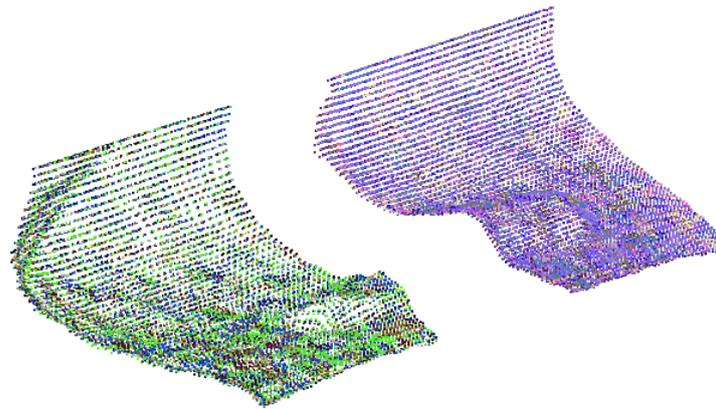
(a) Rohdaten



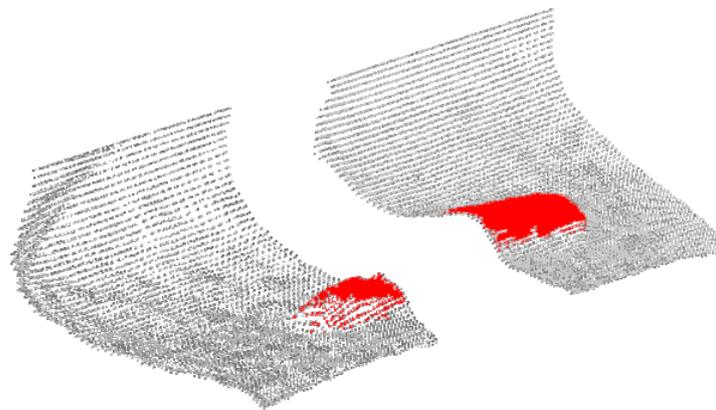
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.11: Kollisionserkennung B für Klebeband

In Abbildung 5.11 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(b) dargestellt. Beim Klebeband fällt die Kollisionserkennung deutlich besser als in 5.1.2 aus, denn eine deutlich größere und verbundenerere Fläche des Klebebands als Hindernis markiert ist. Die Hinderniserkennung ist positiv.



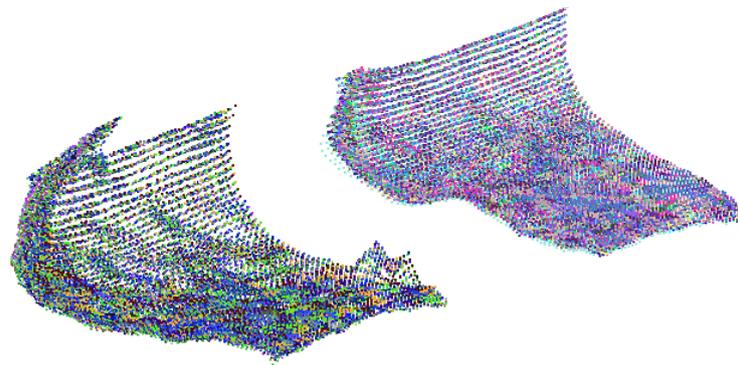
(a) Rohdaten



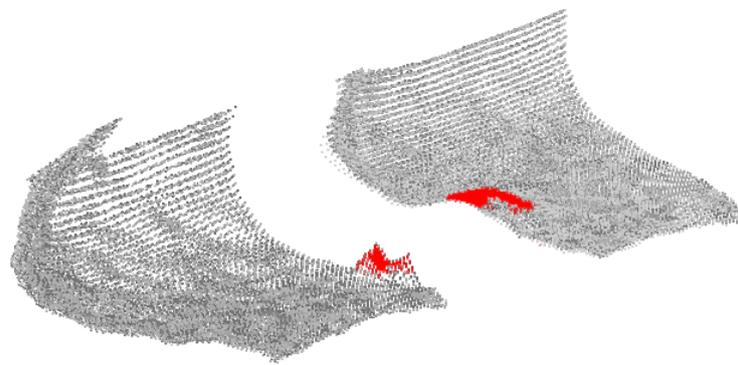
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.12: Kollisionserkennung B für Mäppchen

In Abbildung 5.12 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(c) dargestellt. Wie das Klebeband ist auch das Mäppchen deutlich besser klassifiziert. Nicht nur die obere Fläche des Mäppchens sondern auch die Seiten des Mäppchens werden korrekt erkannt. Das Ergebnis ist eine positive Hinderniserkennung.



(a) Rohdaten



(b) Klassifizierung

Abbildung 5.13: Kollisionserkennung B für Becher

In Abbildung 5.13 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(d) dargestellt. Beim Becher zeigt sich der Vorteil der Erniedrigung des Thresholds der Bodenklassifizierung, denn im Gegensatz zu dem Test in 5.1.2 wird eine ausreichend große Fläche des Bechers erkannt. Die Erkennung ist erfolgreich.

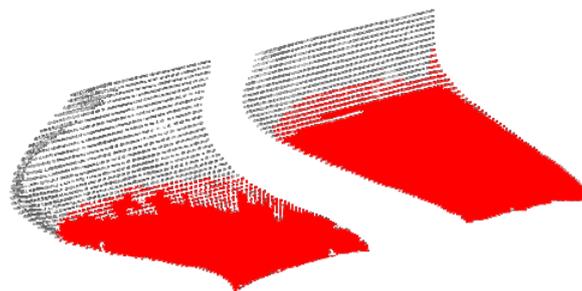


Abbildung 5.14: Kollisionserkennung B für Rampe

In Abbildung 5.14 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(e) dargestellt.

Wie zu erwarten fallen durch das Herabsetzen des Thresholds der Bodenklassifizierung Messwerte von befahrbaren Flächen, die zum Roboter relativ geneigt sind, früher in die Klassifizierung als Hindernisse. Fast alle Messwerte, die nicht als ungenau zählen, werden beim Test als Hindernis klassifiziert. Der Test fällt wie erwartet negativ aus.

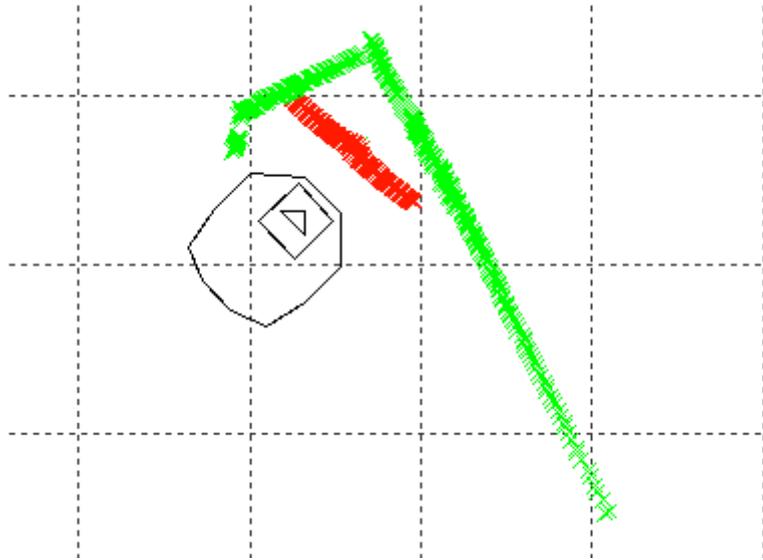


Abbildung 5.15: Multiple Ways Reflection B

In Abbildung 5.15 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(f) dargestellt. Hier tritt die erwartete Erhöhung der Fehler durch Fehlklassifizierung ein, die durch das Herabsetzen des Thresholds der Bodenklassifizierung entsteht. Dies ist durch eine dichtere Ansammlung von falsch klassifizierten roten Punkten erkennbar. Das Resultat ist eine sehr starke Störung durch Reflexionen.

Im Testfall der Treppenszene verhält sich das Ergebnis bis auf vernachlässigbar kleine Unterschiede wie der Test in 5.1.2. Die Ursache dafür sind die zu den anderen Hindernissen vergleichbar großen Ausmaße der Treppe, wobei die Verschiedenheiten der Parametersätze auf das Ergebnis nur geringfügig Einfluss nehmen. Daher wird auf eine erneute Diskussion der Ergebnisse verzichtet und auf den Test in 5.1.2 referenziert.

Der große negative Einfluss der Reflexionen bei diesem Parameterset führt dazu, dass der Roboter in der Nähe von Wänden oft durch Entstehen falscher Hindernisse irritiert wird und keinen idealen Weg fährt. Durch die Vergrößerung der Hindernisse durch Reflexionsfehler,

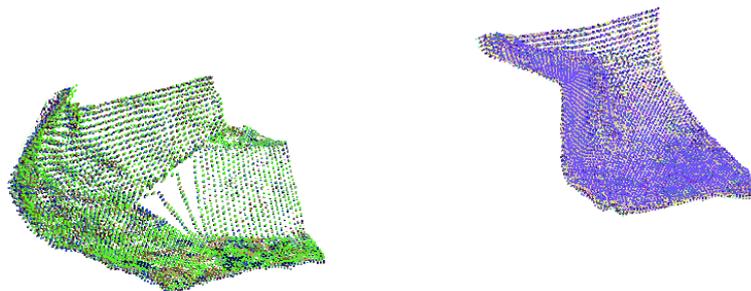
welche beim Test anhand des Styroporwürfels zu sehen ist, werden vom Roboter außerdem enge, noch passierbare Durchgänge als zu eng wahrgenommen und umfahren.

Die Verwendung dieses Parametersatzes eignet sich somit nur in Umgebungen mit breiten Durchgängen bzw. großen Freiflächen und wenig reflektierenden Objekten. Der Vorteil dieses Verfahrens ist eine bessere Erkennung von ungenau wahrnehmbaren und kleinen Hindernissen.

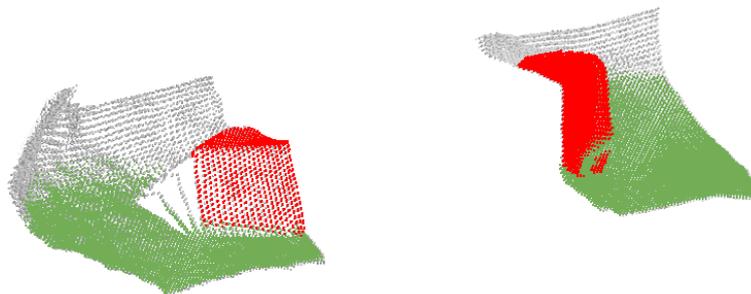
5.1.3 Parametersatz C

Testreihe C zeigt die Ergebnisse bei Verwendung des Ransac Algorithmuses zur Bodenerkennung mit einer Integrationszeit von $1500 \mu s$, einem Ransac Threshold von 1% und einem Threshold der Ungenauigkeit von 0,25 bei 50 Iterationen (siehe 4.5.5.3).

Zusätzlich zu den vorherigen Bildern wird das mit Hilfe des Ransac Algorithmus gefundene beste Consensus Set grün dargestellt.



(a) Rohdaten



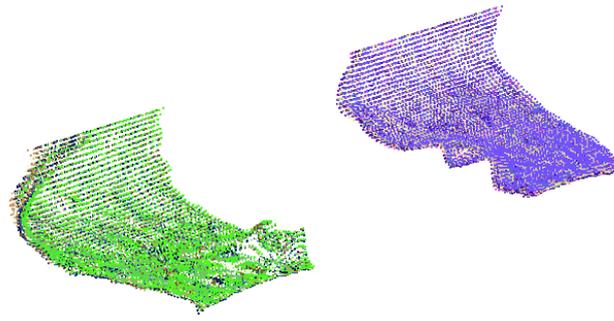
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.16: Kollisionserkennung C für Styroporwürfel

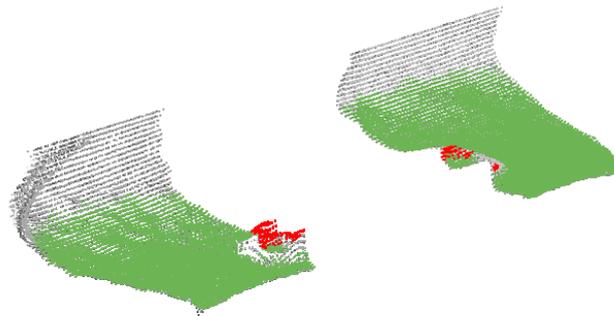
Die aufgenommene Szene 5.16 entspricht der in Abbildung 5.1(a).

Der Würfel wird korrekt als Hindernis erkannt. Durch Reflexion wird fälschlicherweise zusätzlich eine kleine Anzahl an Punkten in Nähe des Würfels beim rechten Sensor als Hindernis klassifiziert. Da diese Punktemenge allerdings sehr nahe am Würfel liegt, ist dieser Fehler

vernachlässigbar.



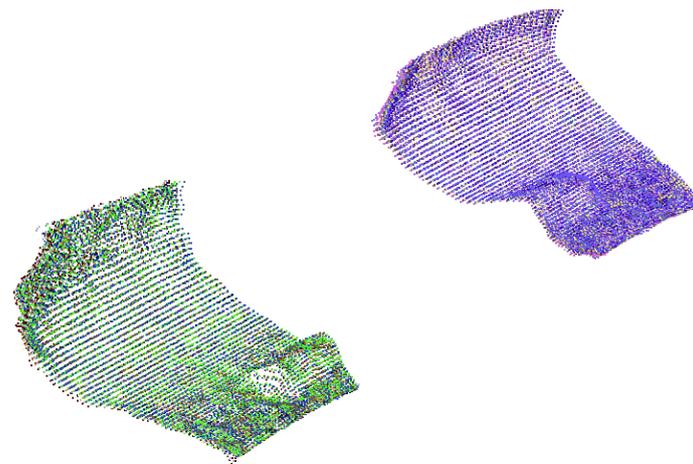
(a) Rohdaten



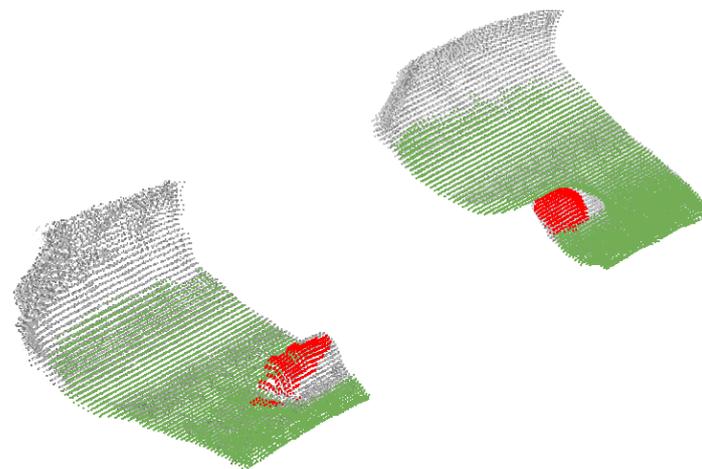
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.17: Kollisionserkennung C für Klebeband

In Abbildung 5.17 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(b) dargestellt. Die Kollisionserkennung beim Klebeband ist trotz wenig als Hindernisse erkannten Punkte ausreichend, da die erkannten Punkte den Großteil der oberen Fläche des Klebebandes decken. Gut zu erkennen ist hierbei, dass die restlichen Punkte des Klebebandes als unsichere Werte gefiltert werden, denn alle grauen Pixel stellen nach Färbung der Hindernisse und des Consensus Sets unsichere Werte dar.



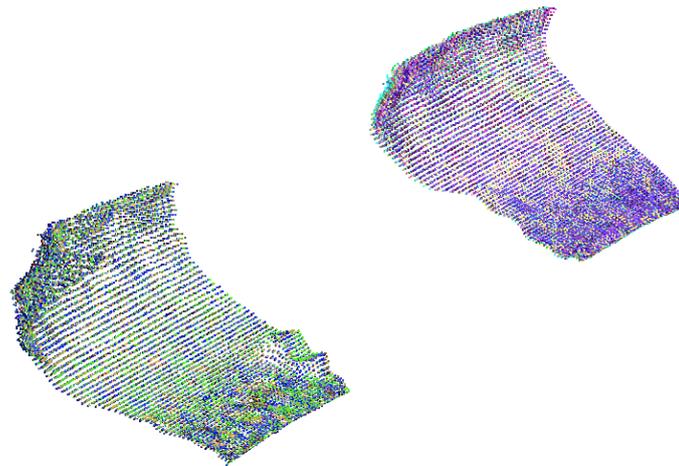
(a) Rohdaten



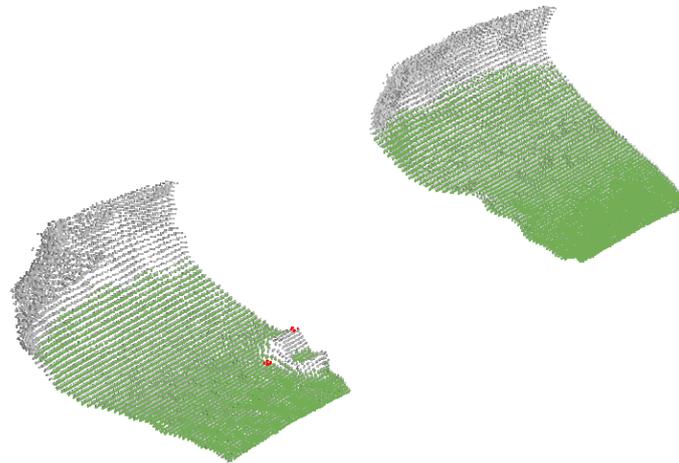
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.18: Kollisionserkennung C für Mäppchen

In Abbildung 5.18 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(c) dargestellt. ähnlich wie beim Klebeband wird der Großteil der oberen Fläche des Mäppchens korrekt erkannt und der Rest des Mäppchens als ungenau klassifiziert. Desweiteren wird wie beim Würfel eine kleine Punktemenge des Bodens in Nähe des Objekts fälschlicherweise als Hindernis erkannt, doch auch hier ist dies durch die unmittelbare Nähe zum Objekt selbst ein vernachlässigbarer Fehler. Die Kollisionserkennung beim Mäppchen ist somit erfolgreich.



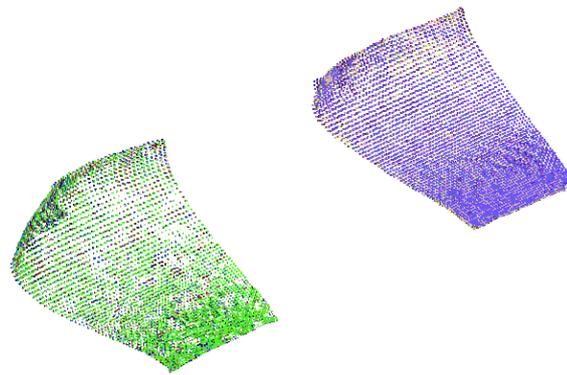
(a) Rohdaten



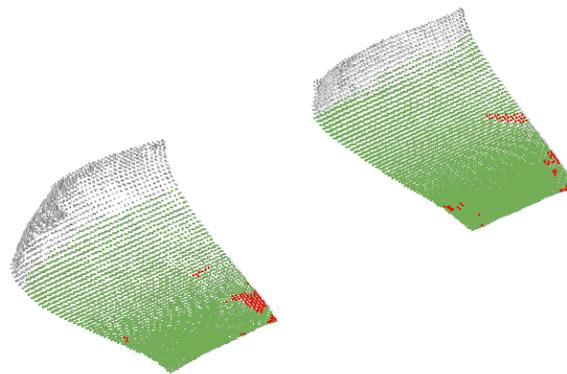
(b) Klassifizierung

Abbildung 5.19: Kollisionserkennung C für Becher

In Abbildung 5.19 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(d) dargestellt. Beim linken Sensor werden wenige Punkte des Bechers als Hindernis klassifiziert, der Rest wird durch Ungenauigkeit gefiltert. Beim rechten Sensor fallen die Punkte des Bechers in das Consensus Set des Ransac Algorithmus und werden somit irrtümlich als befahrbar klassifiziert. Die Kollisionserkennung für den Becher ist somit unzureichend.



(a) Rohdaten



(b) Klassifizierung

Abbildung 5.20: Kollisionserkennung C für Rampe

In Abbildung 5.20 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(e) dargestellt. Wie erwartet erkennt der Ransac Algorithmus den Großteil der relativ zum Roboter geneigten Fläche als befahrbar. Allerdings fallen bei diesem Parametersatz durch den niedrigen Threshold des Ransac Algorithmuses einige Punkte in die Hindernisklassifizierung. Die Erkennung der befahrbaren Fläche als solche ist somit unzureichend.

Aufgrund des Verzichts der Erstellung virtueller Hindernisse aus negativen Hindernissen (siehe 4.5.5.1) bei der exemplarischen Implementierung des Ransac Algorithmuses wird der Test negativer Hindernisse nicht ausgeführt, da er keine Ergebnisse einer korrekten Funktionsweise wiedergeben kann. Der Test wird daher als Fehlschlag gewertet.

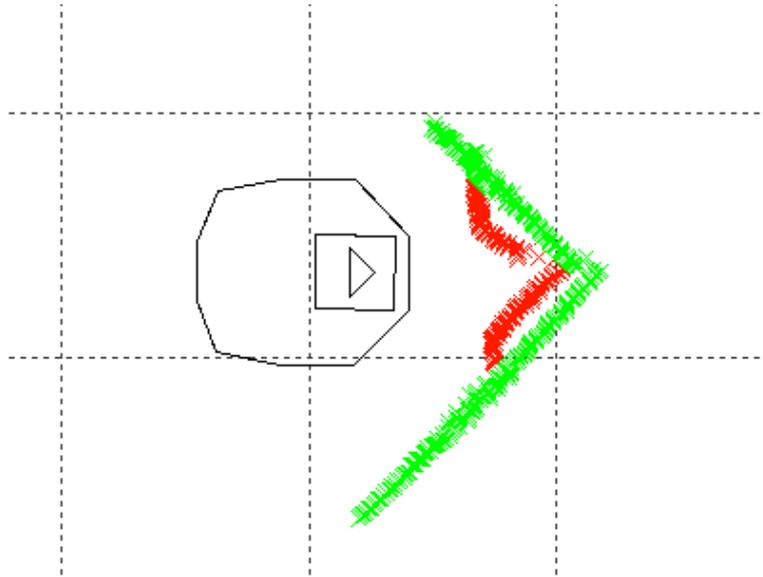


Abbildung 5.21: Multiple Ways Reflection C

In Abbildung 5.21 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.1(f) dargestellt.

Durch die Anwendung des Ransac Algorithmuses und des niedrigen Thresholds des Filters ungenauer Werte fällt das Ergebnis bei diesem Test deutlich besser aus als in 5.1.2 und 5.1.2, denn die falschen Hindernisse befinden sich nur ca. 7 cm von der Wand entfernt.

Der Parametersatz zeigt eine gute Hinderniserkennung und durch den Ransac Algorithmus eine deutliche Milderung der Fehlklassifikationen bei Reflexionen und geneigten Flächen. Der Nachteil liegt in der undeterminierbaren, hohen Ausführzeit des Ransac Algorithmuses, die bei diesem Test im Bereich von 600 ms bis mehreren Sekunden liegt.

Die Verwendung des Parametersatzes eignet sich somit nur bei niedriger Fahrtgeschwindigkeit zur Kompensation der langen Rechenzeit, ist aber robuster gegen Neigungen und Reflexionen.

5.2 Spezialfälle

In der Wahrnehmung mittels Licht spielen transparente und spiegelnde Gegenstände eine große Rolle, da sie häufig zu Fehlmessungen führen, da das Licht zum Messen durch die Oberfläche hindurch dringt bzw. daran gespiegelt wird. Das Testen dieser Spezialfälle ist daher zur Ermittlung der Einschränkungen notwendig.

5.2.1 Spiegelnde Oberflächen

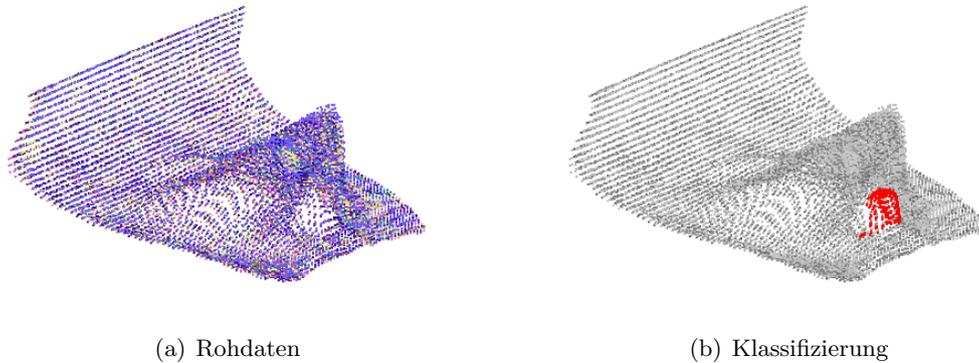


Abbildung 5.22: Kollisionserkennung für Keksdose

In Abbildung 5.22 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.2(b) dargestellt. Bei Vergleich ist zu Erkennen, dass die Messungen des PMD Sensors an der Stelle der Keksdose nicht der Wirklichkeit entsprechen. Das Ergebnis zeigt die Klassifizierung eines Teils der Punktwolke als Hindernis, welcher sich an der Stelle der Dose befindet, aber nicht die richtigen Maße besitzt. Da die Messungen der Keksdose keinesfalls die Form dieser widerspiegeln, muss davon ausgegangen werden, dass eine korrekte Kollisionserkennung unmöglich ist. Der Test schlägt damit fehl.

5.2.2 Transparente Gegenstände

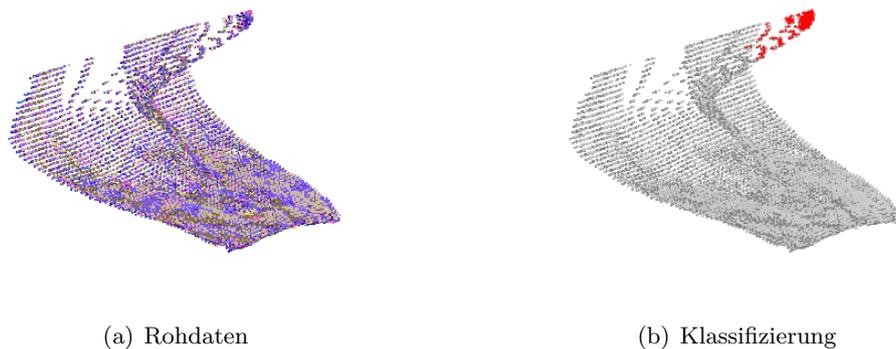


Abbildung 5.23: Kollisionserkennung für Plastikflasche

In Abbildung 5.23 sind die Messungen der Szene von Abbildung 5.2(c) dargestellt. Die Punktwolke lässt annehmen, dass Messungen an der Stelle der Flasche teils vom Boden hinter der transparenten Flasche stammen. Die Spitze, die durch die Kollisionserkennung korrekt erkannt wird, stellt den Deckel der Flasche dar. Da bis auf diese Teilmengen keine

andere Messung die Form der Flasche richtig wiedergibt, wird geschlossen, dass eine korrekte Hinderniserkennung unmöglich ist. Somit schlägt der Test fehl.

5.3 Einschränkungen

Neben den in 5.1 ermittelten Einschränkungen müssen die Einschränkungen des Sichtfelds und der Maximalweite geklärt werden.

5.3.1 Maximalweite der Kollisionserkennung

Der Test für die Maximalweite wird anhand des Parametersets B ausgeführt, da dieses die besten Ergebnisse für Kollisionserkennung erzielt und die Fehleranfälligkeit durch Reflexionen bei diesem Test irrelevant sind. Der Test wird anhand eines großen Objekts, dem Styroporwürfen und eines kleinen Objekts, dem Klebeband durchgeführt. Zur Veranschaulichung werden die Testergebnisse bei 50 *cm* und 80 *cm* Entfernung dargelegt.

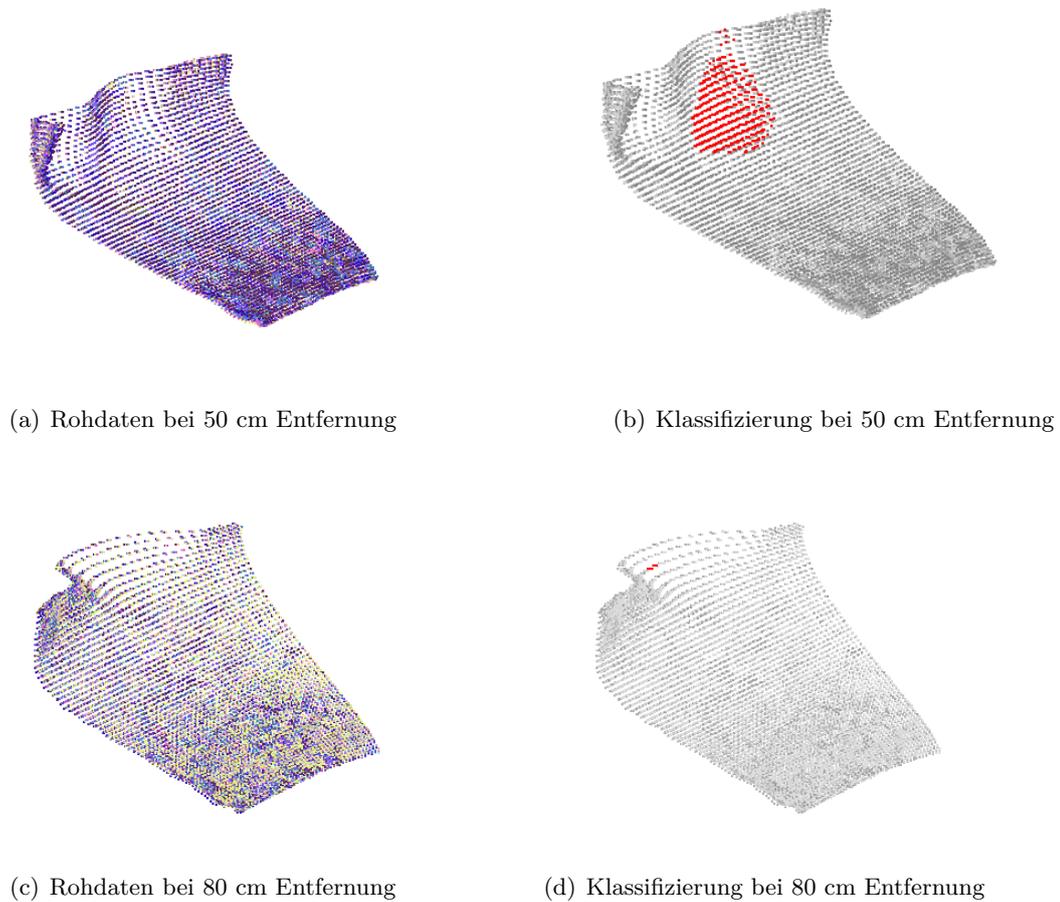
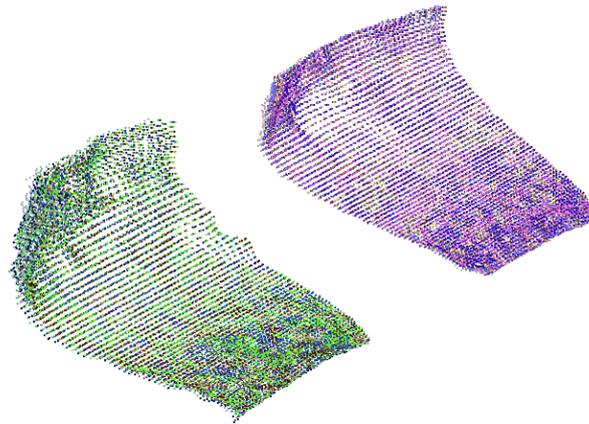


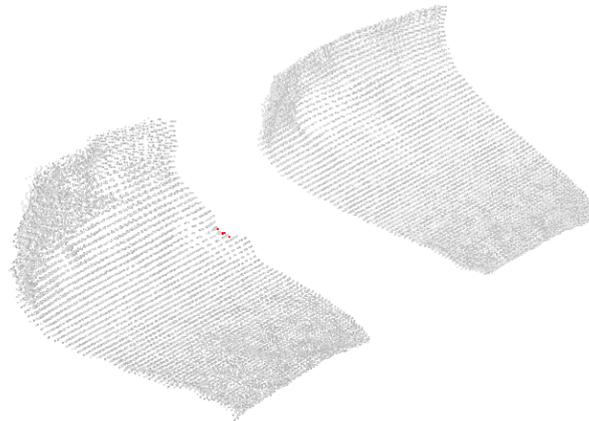
Abbildung 5.24: Entfernungstest für Würfel

In Abbildung 5.24 ist erkennbar, dass die Kollisionserkennung des Würfels bei 50 *cm* erfolgreich ist, da die grobe Form an der richtigen Stelle im Klassifizierungsbild erhalten ist. Obwohl sich die Entfernungsmessungen des Würfels nicht stark von den Entfernungsmessungen des Bodens abheben, kann zwischen Boden und Würfel unterschieden werden, weil der Filter für ungenaue Werte die ungenauen Reflexionswerte des Bodens filtert. Auf 80 *cm* Entfernung hingegen sind die Messungen des Würfels zu ungenau, um sie vom Boden zu unterscheiden, daher fällt das Resultat der Kollisionserkennung ungenügend aus.

Die Kollisionserkennung funktioniert also bei einem Styroporwürfel der Seitenlänge von 15 *cm* auf einer Entfernung von bis zu 50 *cm* erfolgreich.



(a) Rohdaten bei 50 cm Entfernung



(b) Klassifizierung bei 50 cm Entfernung

Abbildung 5.25: Entfernungstest für Klebeband bei 50 cm Entfernung

In Abbildung 5.24 ist die Szene eines Klebebands in 50 *cm* Entfernung zum Roboter dargestellt. Nur bei der Messung des linken Sensors kann eine kleine Teilmenge der Punkte des Klebebands als Hindernis klassifiziert werden, die aber die Maße des Klebebands nicht ausreichend genau abbildet. Daher ist die Kollisionserkennung für das Klebeband auf 50 *cm* Entfernung erfolglos. Der Test in größerer Entfernung entfällt somit.

Die Maximalweite der Kollisionserkennung hängt von der Oberflächenbeschaffenheit und der Größe des Objektes ab. Dies ist in den Entfernungstests, den Tests der Spezialfälle (siehe 5.2) und den normalen Tests (siehe 5.1) ersichtlich. Es können also nur grobe Maximalentfernungen angegeben werden. Die ermittelte Maximalentfernung für kleine Objekte unter 8 *cm* Höhe liegt bei ungefähr 25 *cm* (siehe 5.1), die für große Objekte mit einer Höhe um die 15 *cm* liegt bei ca. 50 *cm*.

5.3.2 Sichtfeld

Zur Ermittlung des Sichtfeldes werden vier Objekte in den Ecken des Sichtfelds der Sensoren so platziert, dass sie im Amplitudenbild der Sensoren, wie in Abbildung 5.26, sichtbar sind. Ein Klebeband wird in der Mitte des Roboters zum Test des toten Winkels zwischen den beiden Sensoren platziert. Durch ungenaue Montage unterscheiden sich die Neigungswinkel der Sensoren um ca. 2° , was der Grund für die vermeintliche Verschiebung des Klebebands ist. Eine Photographie der Szene befindet sich in Abbildung 5.27 und zeigt den groben Sichtbereich der Sensoren.

Die vorderen Würfel befinden sich in einem Abstand von 10 *cm* zum Roboter und einem Winkel von ca. 15° zum jeweiligen Sensor, die hinteren Würfel in einem Abstand von 80 *cm* mit gleichem Winkel. Das Klebeband befindet sich in der Mitte in einem Abstand von 12 *cm*. Zu beachten ist hierbei der Unterschied zwischen der Erkennung im Amplitudenbild und der Hinderniserkennung, welche auf Entfernungswerten beruht. Die Maximalweite der Hinderniserkennung liegt mit 80 *cm* näher als die maximal wahrnehmbare Entfernung.

Es ergibt sich also ein Sichtbereich in Form eines Trapezes von ca. 12 *cm* bis ca. 80 *cm* vor dem Roboter mit der Länge der kurzen Seite (vordere Kante) von ca. 40 *cm* und der langen Seite (hintere Kante) von ca. 60 *cm*. Wie schon in 4.3 erörtert, hält das Sichtfeld die dort genannten Anforderungen ein, d. h. die seitliche Sicht wird eingehalten, denn die nahen Würfel befinden sich außerhalb der Fahrbahn, die nahe Sicht ist mit einem toten Winkel von 12 *cm* Nähe ausreichend und die ferne Sicht ist größer als die der Maximalweite der Hinderniserkennung.

Auf eine theoretisch genaue Errechnung des Blickfelds wird verzichtet, weil bei der Fahrt mit dem Roboter nicht hervorgesehen werden kann, in welchen genauen Winkeln und Entfernungen die Hindernisse zum Sensor liegen und da die nötigen Ausmessungen der Sensorpositionen mit Ungenauigkeiten verbunden sind, d. h. eine genaue Errechnung ist in Wirklichkeit nicht möglich.

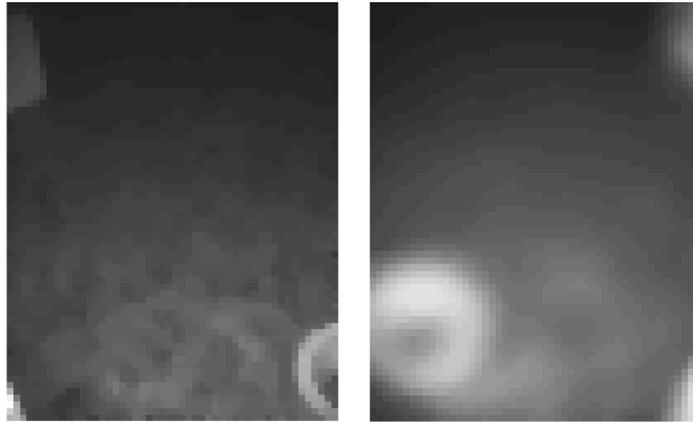


Abbildung 5.26: Amplitudenbilder der beiden Sensoren

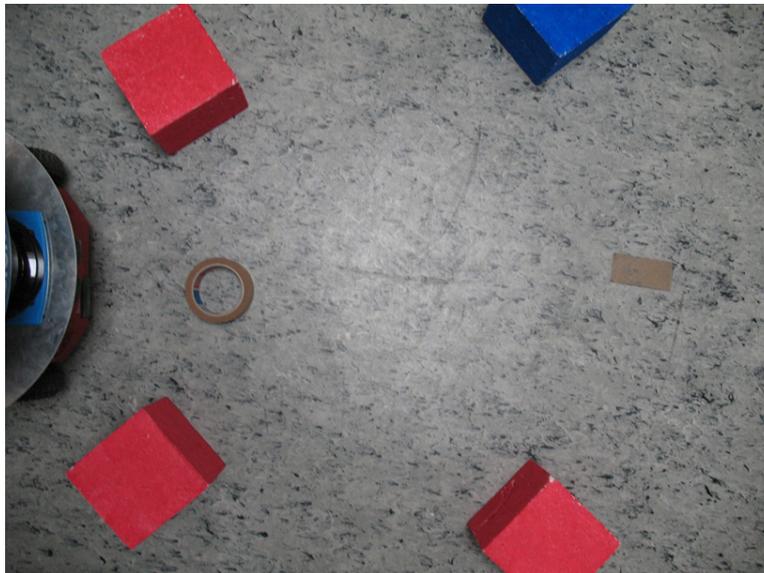


Abbildung 5.27: Fotografie der Szene

5.3.3 Maximale Fahrtgeschwindigkeiten

Letztendlich können die theoretischen Maximalgeschwindigkeiten mit Hilfe der Formel 4.1 ermittelt werden. Durch die Ergebnisse kann der in 4.5.2 ermittelte Parameter für die Entfernung, ab der ein Hindernis erkannt wird, auf 25 *cm* bei Erkennung kleiner Objekte (ca. 5 *cm* Höhe) und 50 *cm* bei Erkennung großer Objekte (ca. 15 *cm* Höhe) angepasst werden.

Somit ergeben sich mit den restlichen Parametern aus 4.5.2 für die in Kapitel 5 genutzten Beispielwerte die Maximalgeschwindigkeiten in Tabelle 5.2.

Integrationszeit	kleine Objekte	große Objekte
450 μs	410 mm/s	610 mm/s
1500 μs	250 mm/s	420 mm/s

Tabelle 5.2: Maximalgeschwindigkeiten für Beispielwerte

Für den Ransac Algorithmus kann keine genaue Maximalgeschwindigkeit angegeben werden, da die Rechenzeit dieses Algorithmuses undeterminierbar ist und von der jeweiligen Szene abhängt.

5.3.4 Fazit

Die Einschränkung der Größe des Sichtfelds entsteht durch die in 4.3 ermittelte Montage. Das Sichtfeld erfüllt wie in 4.3 und 5.3.2 erörtert allerdings die Anforderungen. Die Maximalweite der Hinderniserkennung hängt vom Algorithmus, dem PMD Sensor und den Eigenschaften des Hindernisses ab, generell werden Gegenstände mit einer ungefähren Höhe von 5cm aber 25 *cm* Nähe erkannt (siehe 5.1). Die Probleme bei Erkennung von halbtransparenten und transparenten Objekten, sowie spiegelnden Oberflächen ergeben sich durch das Messverfahren des PMD Sensors (siehe 3.1.1), wie auch die fehlerhaften Messungen durch Reflexionen (siehe 3.1.3). Die Einschränkung, dass geneigte befahrbare Flächen beim einfachen Abstandsverfahren und Bodenkalibrierungsverfahren (siehe 4.5.5.1 und 4.5.5.2) wie in 5.1 als Hindernisse erkannt werden, entsteht durch den Algorithmus, dessen Anforderung diese Erkennung nicht beinhaltet. Die in 5.1 genannte Einschränkung des Ransac Algorithmus, dass negative Objekte nicht in richtiger Entfernung erkannt werden, hängt von dessen einfacher, exemplarischer Implementierung ab. Für einen betriebsfähigen Zustand (siehe 4.1) müssen die in ermittelten Geschwindigkeiten eingehalten werden.

Diese Einschränkungen müssen bei der Anwendung des Verfahrens für eine korrekte Hinderniserkennung beachtet werden.

5.4 Testfahrt

Bei einer Fahrt mit kleinen und großen Hindernissen im Testbereich der Hochschule Ulm unter Verwendung eines Parametersatzes mit einer Integrationszeit von 450 μs , einem Threshold der Bodenklassifizierung von 7% und einem Threshold für ungenaue Werte von 0,4 bei einer Geschwindigkeit von 400 mm/s fällt die Testfahrt größtenteils positiv aus. Hindernisse wie Styroporwürfel, Bücher, Schuhe, eine Dose von 6 *cm* Höhe und ein Maßband werden korrekt erkannt und umfahren. Ein generelles Problem tritt bei kleinen Objekten auf, die nach Bremsvorgang in die toten Winkel der Seiten fallen und vom Roboter seitlich angefahren werden.

5.5 Gesamtfazit

Abgesehen von den Einschränkungen ist durch den Nachweis der Kollisionserkennung in 5.1 eine korrekte Kollisionserkennung möglich. Die in 4.1 genannten Anforderungen werden eingehalten:

- Das Einhalten der Anforderungen an Abdeckung des nötigen Sichtbereich ist in 5.1, die Ermittlung der Montageplätze und Anzahl nötiger Sensoren in 4.3 besprochen.
- Die Entwicklung der Software wird in 4.5 ausführlich besprochen, die Kollisionserkennung in 4.5.5 und die Einordnung in die SmartSoft Architektur in 4.2.
- Die Sichtbereiche eines einzelnen Sensors, sowie die möglichen Platzierungsplätze werden in 4.3 beachtet. Allerdings kommt es bei kleinen Hindernissen unter 5 *cm* Höhe, die sich nach Abbremsen in einem toten Winkel der Sensoren aufhalten, zu Kollisionen (siehe 5.4).
- Ein betriebsfähiger Zustand kann nur durch Geschwindigkeitsanpassung (siehe 5.3.4) erreicht werden.
- Die Nutzung von maximal zwei Sensoren wird wie in 4.3 besprochen, eingehalten.
- Es wird, wie in Punkt 4.2, keine Änderung an der CDL Komponente vorgenommen.

Durch die korrekte Kollisionserkennung und der Verwendung der CDL Komponente ist das Ziel dieser Bachelorarbeit, eine Kollisionsvermeidung mit dem PMD Sensor zu realisieren, erfüllt. Zu beachten ist, dass es keinen perfekten Parametersatz gibt, sondern dieser, wie in 5.1 zu sehen ist, je nach Prioritätenverteilung zu wählen ist.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Aktueller Stand

Anhand der Ergebnisse in Kapitel 5 wird gezeigt, dass das Ziel der Kollisionsvermeidung generell erfüllt ist. Der grundlegende Algorithmus basiert auf der Fusion der PMD Daten mit den Daten des Laserscanners. Dazu werden die Punkte der Messungen des PMD Sensors wegen der Sicht auf den Boden als Hindernisse oder Boden klassifiziert. Um die Daten zu fusionieren, werden schließlich die PMD Daten in das Koordinatensystem des Laserscanners transformiert. Damit ist die Grundlage gegeben.

Das Verfahren zur Boden- und Hindernisklassifizierung ist hierbei ausschlaggebend für die Ergebnisse. In dieser Bachelorarbeit werden dazu drei verschiedene Verfahren implementiert und evaluiert, die auf Entfernungsdaten basieren: Das einfache Abstandsverfahren, das mit Hilfe theoretischer Entfernung des Bodens die Daten klassifiziert, das Bodenkalibrierungsverfahren, bei welchem die Klassifizierung auf durch Kalibrierung ermittelte echte Messungen beruht und die Verwendung des Ransac Algorithmuses, mit dem versucht wird die Bodenfläche zu ermitteln und die abweichenden Messwerte als Hindernisse zu klassifizieren.

Zur Verbesserung der Ergebnisse werden Glättungsfilter und der Filter für ungenaue Messungen angewandt. Der Glättungsfilter hilft hierbei fehlerhafte Peaks zu mildern und der Filter für ungenaue Werte verwirft ungenaue Messungen, die z. B. durch Reflexionsfehler entstehen.

Im Gegensatz zur einfachen Verwendung des Laserscanners können mit dem in der Bachelorarbeit vorgestelltem Verfahren zusätzlich Hindernisse unter der Sichtfläche des Laserscanners wahrgenommen und ausgewichen werden. Darunter fallen z. B. Treppenabgänge, Spielzeuge und Kartons.

Nicht erfüllte Hoffnungen sind Erkennung der Hindernisse auf mehrere Meter Entfernung, weniger verrauschte Messwerte und die Verwendung des Ransac Algorithmuses mit geringem Rechenaufwandt.

Durch eine bessere Erkennung auf die Entfernung und geringerem Rauschen könnte z. B. ein Sensor am Galgen platziert werden (siehe 4.3 und damit sowohl hohe Hindernisse wie Tische als auch Hindernisse am Boden wahrnehmen. Ein geringeres Rauschen könnte zusätzlich eine Erkennung von niedrigen Hindernissen mit einer Höhe von unter 4 cm ermöglichen. Eine niedrigere Rechenzeit des Ransac Algorithmuses könnte eine höhere Fahrtgeschwindigkeit bei dessen Anwendung ermöglichen.

6.2 Verbesserungsmöglichkeiten

Der aktuelle Stand bietet eine gute Grundlage zur Hinderniserkennung, ist aber noch für viele Verbesserungen offen.

- Die Verwendung eines qualitativ hochwertigeren Sensors kann das Rauschen minimieren und eine höhere Maximalentfernung der Hinderniserkennung ermöglichen. Dadurch könnte ein einzelner Sensor z. B. am Galgen platziert werden, eine ähnliche Qualität der Hinderniserkennung am Boden wie die aktuelle Konfiguration besitzen und zusätzlich hohe Hindernisse erkennen.
- Eine Optimierung bei der Verwendung des Ransac Algorithmuses könnte die Rechenzeit evtl. soweit minimieren, dass eine gewünschte Fahrtgeschwindigkeit erreicht wird.
- Durch Kalibrierung können die systematischen Kamerafehler (siehe 3.1.3) eliminiert und damit die Qualität der Messungen gesteigert werden. (MDHW08)
- Die Verwendung der Amplitudenwerte zusätzlich zu den Entfernungswerten zur Kollisionserkennung könnte eine Qualitätssteigerung erreichen. Wie in den Ergebnissen des Sichtfelds beschrieben (siehe 5.3.2) sind Hindernisse im Amplitudenbild in größeren Entfernungen als die Kollisionserkennung basierend auf Entfernungswerten zu erkennen.
- Zur Verbesserung der Boden- und damit auch Hindernisklassifizierung könnte ein Verfahren basierend auf den Normalenvektoren zwischen Nachbarpunkten eingesetzt werden (KWB09). Damit ist die Prüfung der Befahrbarkeit eines unebenen Bodens möglich, da Hindernisse anhand der Steigungen bzw. Unterschieden der Winkel der Normalen erkannt werden. Bei hohen Unterschieden zwischen den Winkeln zweier Normalen kann angenommen werden, dass sich an dieser Stelle eine unbefahrbare Kante und somit ein Hindernis befindet.
- Zur Lösung des in 5.4 genannten seitlichen Kollisionsproblems könnten die Sensoren links bzw. rechts näher an den Kanten des Roboters platziert werden oder ihre Drehwinkel zur Seite hin vergrößert werden. Dadurch werden die seitlichen toten Winkel verkleinert und die Wahrscheinlichkeit, dass Hindernisse seitlich angefahren werden, sinkt.

Abbildungsverzeichnis

2.1	FOTOAUFNAHME EINES 2D LASERSCANNERS DER FIRMA SICK	3
2.2	VISUALISIERUNG EINES LASERSCANS	4
2.3	FOTO EINES 3D LASERSCANNERS (NL01)	6
3.1	FOTOAUFNAHME DES PMD SENSORS PMD[VISION] O3	10
3.2	FLÄCHENERMITTLUNG MIT HILFE DES RANSAC ALGORITHMUS	13
3.3	AUSGANGSBILD FÜR FILTER	15
3.4	FUNKTIONSWEISE DES MITTELWERTFILTERS	15
3.5	ANWENDUNG DES MITTELWERTFILTERS	16
3.6	ANWENDUNG DES GAUSS-FILTERS	16
3.7	FUNKTIONSWEISE DES MEDIANFILTERS	17
3.8	ANWENDUNG DES MEDIANFILTERS	17
4.1	LASER ZU CDL ARCHITEKTUR	22
4.2	MÖGLICHE SMARTSOFT ARCHITEKTUREN	23
4.3	MASSE DES PMD SENSORS PMD[VISION] O3	24
4.4	VERSUCHSAUFBAU PLATZIERUNG	25
4.5	PLATZIERUNGSMÖGLICHKEITEN 1	27
4.6	PLATZIERUNGSMÖGLICHKEITEN 2	28
4.7	ANSICHT DES PIONEERS	29
4.8	STÖRUNGEN OHNE TRIGGERUNG MIT 20 FPS	30
4.9	STÖRUNGEN BEI POSITIVER TRIGGERUNG MIT 20 FPS	31
4.10	READY SIGNAL EINES SENSORS	32
4.11	STÖRUNGSFREIE MESSUNGEN BEI POSITIVER TRIGGERUNG MIT 10 FPS . .	32
4.12	UNGENAUIGKEITEN BEI ENTFERNUNGS-AUFNAHME	34
4.13	ABLAUF DES ALGORITHMUSES	37
4.14	ANWENDUNG DES MITTELWERTFILTERS AUF ECHTE MESSDATEN EINER EBE- NEN BODENFLÄCHE	40
4.15	FEHLMESSUNGEN BEI BODENAUFNAHMEN	41
4.16	UNGENAUIGKEITEN BEI ENTFERNUNGS-AUFNAHME 2	42

4.17	AUFLAGEFLÄCHE EINES ROBOTERS ROT DARGESTELLT	43
4.18	NEGATIVE HINDERNISSE	44
4.19	THEORETISCH PERFEKTE MESSWERTE EINES PMD SENSORS FÜR EINE EBENE FLÄCHE	45
4.20	VERGLEICHSBILDER ZU RANSAC	52
4.21	FUSION DER LASER UND PMD DATEN	53
4.22	KOORDINATENSYSTEM DES PMD SENSORS	56
4.23	THEORETISCHES BEISPIEL DES MERGINGVERFAHRENS	57
5.1	FOTOS DER TESTSZENEN (TEIL 1)	60
5.2	FOTOS DER TESTSZENEN (TEIL 2)	61
5.3	KOLLISIONSERKENNUNG A FÜR STYROPORWÜRFEL	63
5.4	KOLLISIONSERKENNUNG A FÜR KLEBEBAND	64
5.5	KOLLISIONSERKENNUNG A FÜR MÄPPCHEN	65
5.6	KOLLISIONSERKENNUNG A FÜR BECHER	66
5.7	KOLLISIONSERKENNUNG A FÜR RAMPE	67
5.8	KOLLISIONSERKENNUNG FÜR TREPPENABGANG	68
5.9	MULTIPLE WAYS REFLECTION A	69
5.10	KOLLISIONSERKENNUNG B FÜR STYROPORWÜRFEL	70
5.11	KOLLISIONSERKENNUNG B FÜR KLEBEBAND	71
5.12	KOLLISIONSERKENNUNG B FÜR MÄPPCHEN	72
5.13	KOLLISIONSERKENNUNG B FÜR BECHER	73
5.14	KOLLISIONSERKENNUNG B FÜR RAMPE	73
5.15	MULTIPLE WAYS REFLECTION B	74
5.16	KOLLISIONSERKENNUNG C FÜR STYROPORWÜRFEL	75
5.17	KOLLISIONSERKENNUNG C FÜR KLEBEBAND	76
5.18	KOLLISIONSERKENNUNG C FÜR MÄPPCHEN	77
5.19	KOLLISIONSERKENNUNG C FÜR BECHER	78
5.20	KOLLISIONSERKENNUNG C FÜR RAMPE	79
5.21	MULTIPLE WAYS REFLECTION C	80
5.22	KOLLISIONSERKENNUNG FÜR KEKSDOSE	81
5.23	KOLLISIONSERKENNUNG FÜR PLASTIKFLASCHE	81
5.24	ENTFERNUNGSTEST FÜR WÜRFEL	83
5.25	ENTFERNUNGSTEST FÜR KLEBEBAND BEI 50 CM ENTFERNUNG	84
5.26	AMPLITUDENBILDER DER BEIDEN SENSOREN	86
5.27	FOTOGRAFIE DER SZENE	86

Tabellenverzeichnis

3.1	BEISPIELTABELLE FÜR NÖTIGE ANZAHL AN ITERATIONEN BEI EBENEN UND GERADEN	14
4.1	ENTFERNUNGSMESSUNGEN BEI THEORETISCHER ENTFERNUNG VON 62cm .	34
4.2	VERGLEICHSTABELLE ZU MITTELWERTGEFILTERTEN MESSUNGEN BEI EINER ENTFERNUNG VON 60 cm	35
4.3	ENTFERNUNGSMESSUNGEN BEI THEORETISCHER ENTFERNUNG VON 73 cm .	36
4.4	ZEITMESSUNGEN FÜR DIE UPDATE METHODE	39
4.5	MESSWERTFEHLER OHNE KALIBRIERUNG	47
4.6	MESSWERTFEHLER MIT KALIBRIERUNG	48
4.7	MESSWERTFEHLER MIT KALIBRIERUNG NACH WECHSEL DER BODENBESCHAFFENHEIT	49
4.8	ZEITMESSUNGEN FÜR VERSCHIEDENE PARAMETEREINSTELLUNGEN DES RANSAC ALGORITHMUSES	51
4.9	BEZEICHNUNG DER VARIABLEN 1	54
4.10	BEZEICHNUNG DER VARIABLEN 2	55
5.1	MASSE DER TESTGEGENSTÄNDE	62
5.2	MAXIMALGESCHWINDIGKEITEN FÜR BEISPIELWERTE	87

Literaturverzeichnis

- BK08** *Kapitel Image Processing.* In: BRADSKI, Gary ; KAEHLER, Adrian: *Learning OpenCV.* O'Reilly Media, 2008, S. 109–113
- Bru07** *Kapitel Communication Patterns as Key Towards Component Interoperability.* In: BRUGALI, Davide: *Software Engineering for Experimental Robotics.* Bd. 30. Springer, 2007, S. 181–210
- DT05** DIEBEL, James ; THRUN, Sebastian: An Application of Markov Random Fields to Range Sensing. In: *In Proceedings of Advanced Neural Information Processing Systems,* 2005, S. 291–298
- Esc06** ESCHENBURG, Jonas: *Optisches Kameratracking anhand natürlicher Merkmale,* Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2006
- FM08** FUCHS, Stefan ; MAY, Stefan: Calibration and Registration for Precise Surface Reconstruction with TOF Cameras. In: *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications 2008* Bd. 5, 2008, S. 274–284
- HFS07** HUHLE, Benjamin ; FLECK, Sven ; SCHILLING, Andreas: Integrating 3D Time-of-Flight Camera Data and High Resolution Images for 3DTV Applications. In: *3DTV CON - The True Vision,* 2007
- KRI06** KAHLMANN, T. ; REMONDINO, F. ; INGENSAND, H.: Calibration for increased accuracy of the range imaging camera swissranger. In: *Proceedings of the ISPRS* Bd. XXXVI, 2006, S. 136–141
- KWB09** KLASING, Klaas ; WOLLHERR, Dirk ; BUSS, Martin: Realtime Segmentation of Range Data Using Continuous Nearest Neighbors. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA),* 2009
- LK06** LINDNER, Marvin ; KOLB, Andreas: Lateral and Depth Calibration of PMD-Distance Sensors. In: *International Symposium on Visual Computing (ISVC06)* Bd. 2, 2006, S. 524–533

- MDHW08** MAY, Stefan ; DROESCHEL, David ; HOLZ, Dirk ; WIESEN, Christoph: *3D Pose Estimation and Mapping with Time-of-Flight Cameras*. 2008
- MRP09** *MRPT*. <http://babel.isa.uma.es/mrpt/>. Version: August 2009
- MWSP06** MAY, S. ; WERNER, B. ; SURMANN, H. ; PERVOLZ, K.: 3D Time-of-Flight Cameras for Mobile Robotics. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, S. 790–795
- NL01** NÜCHTER, A. ; LINGEMANN, K.: Ein 3D-Laserscanner für autonome mobile Roboter. In: *Informatiktage 2001. Fachwissenschaftlicher Informatik-Kongreß : 9. und 10. November 2001 im Neuen Kloster Bad Schussenried*, 2001, S. 89–92
- Ope09** *OpenCV*. <http://opencv.willowgarage.com/wiki/>. Version: August 2009
- PBP07** POPPINGA, Jann ; BIRK, Andreas ; PATHAK, Kaustubh: Hough based Terrain Classification for Realtime Detection of Drivable Ground. In: *Journal of Field Robotics* Bd. 25, 2007, S. 67–88
- PMD08** PMDTECHNOLOGIES (Hrsg.): *PMD[vision]O3*. PMDTechnologies, 2008
- Sch98** SCHLEGEL, C.: Fast Local Obstacle Avoidance under Kinematic and Dynamic Constraints for a Mobile Robot. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998
- SHPB08** SCHÄFER, H. ; HACH, A. ; PROETZSCH, M. ; BERNS, K.: 3D Obstacle Detection and Avoidance in Vegetated Off-road Terrain. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2008, S. 923–928
- SLNH01** SURMANN, Hartmut ; LINGEMANN, Kai ; NÜCHTER, Andreas ; HERTZBERG, Joachim: Aufbau eines 3D-Laserscanners für autonome mobile Roboter. In: *GMD Report*, 2001
- SN04a** *Kapitel Perception*. In: SIEGWART, Roland ; NOURBAKHSH, Illah R.: *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT, 2004, S. 105–108
- SN04b** *Kapitel Planning and Navigation*. In: SIEGWART, Roland ; NOURBAKHSH, Illah R.: *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT, 2004, S. 284–285
- WBBH05** WÖLFELSCHNEIDER, Harald ; BLUG, Andreas ; BAULIG, Claudia ; HÖFLER, Heinrich: Schnelle Entfernungsmessung für Laserscanner. In: *Technisches Messen*, 2005, S. 455–467
- WGS04** WEINGARTEN, J. W. ; GRUENER, G. ; SIEGWART, R.: A State-of-the-Art 3D Sensor for Robot Navigation. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)* Bd. 3, 2004, S. 2155–2160

- YSP⁺09** YUAN, Fang ; SWADZBA, Agnes ; PHILIPPSEN, Roland ; ENGIN, Orhan ; HANHEIDE, Marc ; WACHSMUTH, Sven: Laser-based Navigation enhanced with 3D Time-of-Flight Data. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '09*, 2009, S. 2844–2850