



► Mobile Robotik: Verwendung von
Laserentfernungsdaten
für die Roboterlokalisierung

PILZ
THE SPIRIT OF SAFETY

Whitepaper

Status: November 2021

Ausschluss der Haftung

Wir haben unser Whitepaper sehr sorgfältig zusammengestellt. Es enthält Informationen über unser Unternehmen sowie über unsere Produkte. Alle Angaben haben wir nach dem heutigen Stand der Technik und bestem Wissen und Gewissen gemacht. Dennoch können wir für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben, sofern uns nicht der Vorwurf grober Fahrlässigkeit trifft, keine Haftung übernehmen, da sich trotz aller Sorgfalt Fehler nicht vollständig vermeiden lassen. Insbesondere haben die Angaben nicht die rechtliche Qualität von Zusicherungen oder zugesicherten Eigenschaften. Für Hinweise auf Unstimmigkeiten sind wir dankbar.

Urheberrechts- und Eigentumshinweise

Alle Rechte an dieser Veröffentlichung sind der Pilz GmbH & Co. KG vorbehalten. Kopien für den innerbetrieblichen Bedarf des Benutzers dürfen angefertigt werden. Verwendete Produkt-, Waren- und Technologiebezeichnungen sind Warenzeichen der jeweiligen Firmen.

Pilz GmbH & Co. KG
Felix-Wankel-Straße 2
73760 Ostfildern
Deutschland

© 2021 Pilz GmbH & Co. KG, Ostfildern
1. Ausgabe

Auf einen Blick

Autonome Fahrzeuge übernehmen auf kostengünstige, zuverlässige und sichere Weise immer mehr Aufgaben in der Industrie und in vielen Dienstleistungsbereichen. Sensoren wie Laserscanner können als die Augen dieser Fahrzeuge betrachtet werden: Durch sie erhalten diese Fahrzeuge unverzichtbare Informationen über ihre Umgebung. Sicherheits-Laserscanner sorgen für Sicherheit, indem sie Kollisionen mit Personen und Gegenständen verhindern und gleichzeitig die Lokalisierung und Navigation ermöglichen.

Der Sicherheits-Laserscanner liefert Entfernungsdaten über ROS- oder C++-Schnittstellen und ermöglicht Lokalisierung und Navigation mit dem ROS-Paket SLAM Toolbox. Statische Messungen weisen eine hohe Auflösung und Datengenauigkeit auf.

Inhaltsverzeichnis

1. Laserscanner für Lokalisierung und Navigation	4
1.1. Laserscanner: Funktionsweise und Anwendung	5
1.2. FTF und AMR.....	5
1.3. Lokalisierung und Navigation.....	6
1.4. Anwendungsbeispiel (Kartierung mit AMR und Laserscannern).....	7
2. Marktübersicht.....	7
2.1. Relevante Eigenschaften (Auflösung, Frequenz, ...)	7
2.2. Technische Daten	8
2.3. Halbtransparente Objekte	9
3. Genauigkeit der Lokalisierung	9
3.1. Aufbau	9
3.2. Datenerfassung.....	10
3.3. Datenverarbeitung.....	11
3.4. Anwendung der Daten im Feld	12
4. Fazit: Was bietet ein Sicherheits-Laserscanner?	12
5. Abbildungsverzeichnis	13
6. Glossar	14

1. Laserscanner für Lokalisierung und Navigation

Nicht nur im industriellen Umfeld, sondern auch in vielen Dienstleistungsbereichen übernehmen autonome Fahrzeuge immer mehr Aufgaben auf kostengünstige, zuverlässige und sichere Weise. Dies erfordert die Fähigkeit zur Orientierung, d. h. zur Lokalisierung in der eigenen Umgebung, sowie die Fähigkeit zur autonomen Navigation in einer selbst erstellten oder vorgegebenen Karte dieser Umgebung.

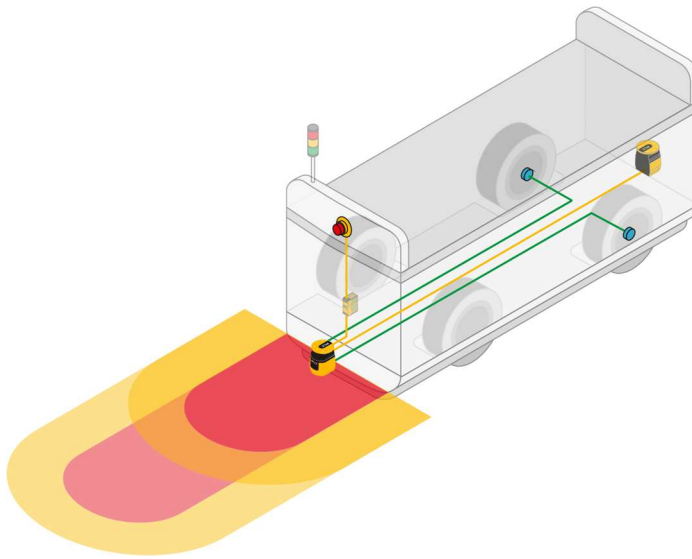


Abbildung 1: FTF mit Sicherheits-Laserscanner für geschwindigkeitsabhängige Zonenumschaltung

Für diese operativen Aufgaben ist der Sicherheits-Laserscanner der am besten geeignete Sensor und verleiht diesen autonomen Fahrzeugen eine starke Sehfähigkeit. Darüber hinaus ist er auch an viele Sonderbedingungen anpassbar und erfüllt gleichzeitig höchste Sicherheitsanforderungen.

Es sind verschiedene Produkte auf dem Markt – was können sie leisten und wie sind sie zu bewerten? In diesem Beitrag wird eine Auswahl von Laserscannern mit ihren Merkmalen und ihrer Leistung näher beleuchtet.

1.1. Laserscanner: Funktionsweise und Anwendung

Das Grundprinzip ist die Lichtlaufzeitmessung eines Laserstrahls. Das fokussierte Nahinfrarotlicht wird in sehr kurzen Impulsen in definierten Zeitschritten über einen rotierenden Spiegel aus dem Scanner gesendet, und die Reflexionen dieser Impulse können in Bezug auf Winkel, Laufzeit und Intensität gemessen werden. Bis auf wenige Ausnahmen (Glas, Reflektoren, ...) wird das Licht von den meisten Materialien teilweise reflektiert. Staub und Nebel in der Luft können die Messungen ebenso behindern wie Schmutz auf der Laserabdeckung. Der Scanner kann nur Objekte erkennen, die sich in der Sichtlinie befinden. Daher muss der Scanner bewegt werden, um hinter Objekte zu schauen.

Scanner können sowohl für Sicherheitsanwendungen (wenn sie entsprechend spezifiziert sind) als auch für die Kartierung und Navigation mobiler Roboter eingesetzt werden. In diesem Beitrag werden die Kartierungs- und Navigationsfunktionen erörtert.

1.2. FTF und AMR

Herkömmliche fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF, Englisch "automated guided vehicles", AGV) können einfache Transportaufgaben übernehmen, benötigen aber aufgrund ihrer begrenzten Navigationsfähigkeiten feste Routen (Linien, Drähte, Reflektoren usw.), denen sie mithilfe

einfacher Sensoren folgen müssen. Mit ihren Sicherheitssensoren können sie vor Hindernissen anhalten, diese jedoch nicht umfahren (Abbildung 2).

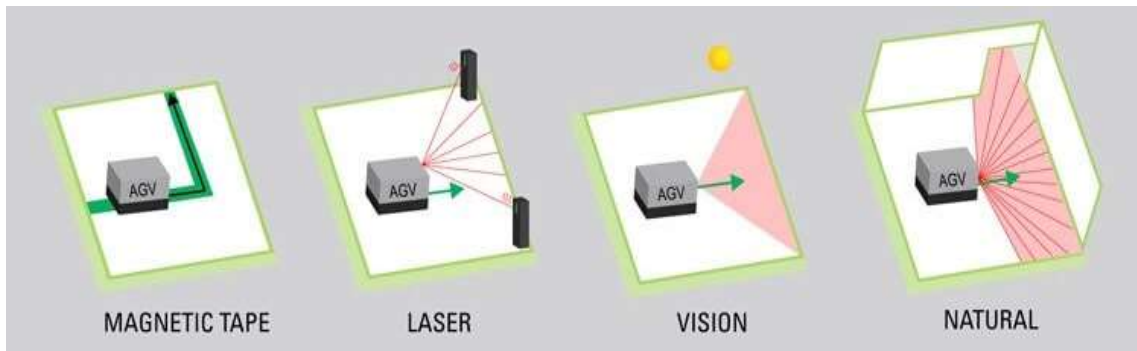


Abbildung 2: Verwendung von Sensoren zur Verfolgung von Routen (Quelle: https://www.atriainnovation.com/wp-content/uploads/2020/06/AGV_Sensores.jpg)

Autonome mobile Roboter (AMR) hingegen verwenden dynamische Karten zur Navigation und berechnen permanent den aktuell besten Weg, auch um temporäre Hindernisse in variablen Umgebungen herum (Abbildung 3). Die Daten, mit denen sie arbeiten, werden von Kameras oder Scannern generiert und von leistungsstarken Computern verarbeitet.

Automated:



Autonomous:



Abbildung 3: FTF/AGV und AMR;

Quelle: <https://s3.amazonaws.com/assets.ottomotors.com/content-images-v2/AMR-vs->

Da sie nicht von einer teuren Infrastruktur abhängig sind, ist der Einsatz von AMR im Vergleich zu den Gesamtkosten von FTF/AGV oft günstiger.

1.3. Lokalisierung und Navigation

Die erste Voraussetzung dafür, dass sich ein AMR autonom bewegen kann, ist die Erstellung einer Karte (es kann aber auch eine vordefinierte Karte verwendet werden) und die Lokalisierung auf dieser Karte. Eine Methode namens Simultaneous Localisation And Mapping (SLAM) ermöglicht dies zeitgleich. Von nun an werden die Informationen der Karte mit den aktuellen Informationen der Sensoren des AMR abgeglichen, um ihn in seiner Umgebung zu lokalisieren. Somit kann ein AMR zu jedem beliebigen Ziel navigieren. Die Informationen über die natürlichen Gegebenheiten der Umgebung werden regelmäßig durch permanent bereitgestellte Scans oder Bilder aktualisiert, die durch die Odometrie des Fahrzeugs unterstützt werden. Da zur Durchführung von Lokalisierungs- und Navigationsaufgaben viele Berechnungen und Statistiken erforderlich sind, ist eine Kombination aus leistungsfähiger Software und leistungsstarken

Computern erforderlich. Es gibt mehrere ROS- und kommerzielle Softwarepakete, die sich hierfür eignen.

1.4. Anwendungsbeispiel (Kartierung mit AMR und Laserscannern)

Um eine Karte eines völlig unbekanntes Gebiets zu erstellen, wird dieses Gebiet mit einem Laserscanner erfasst. Die SLAM Toolbox-Software verarbeitet die rohen Entfernungsdaten des Laserscanners und beginnt mit der Erstellung einer Karte. Sobald der Laserscanner bewegt wird, werden die aufeinanderfolgenden Scans zusammengesetzt und zu einer übereinstimmenden Karte der Umgebung verarbeitet. Weitere Bilder und komplexe Berechnungen ermöglichen in Kombination mit Informationen über die tatsächlichen Bewegungen des Fahrzeugs eine nahezu perfekte Kartierung der Umgebung. Diese Karte bildet zusammen mit den Informationen über die Beschränkungen, die den Fahrzeugen auferlegt werden, die Grundlage für alle nachfolgenden Navigationsaufgaben in der kartierten Umgebung. Dauerhafte Veränderungen der Topografie, die von Scannern oder Kameras erfasst werden, führen zu einer Aktualisierung der Karte.

Neben diesen Lokalisierungsaufgaben bieten Sicherheits-Laserscanner auch verschiedene Funktionen, um Kollisionen zwischen Fahrzeugen und Personen oder Gegenständen zuverlässig zu verhindern, indem sie entweder einen Weg um das Hindernis herum suchen oder das Fahrzeug gegebenenfalls sicher anhalten.

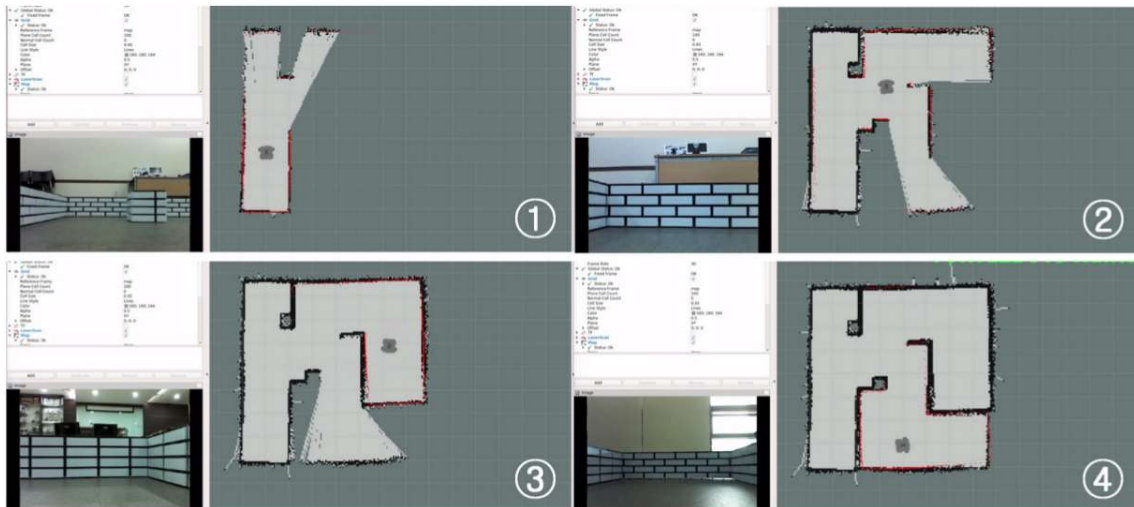


Abbildung 4: Erstellung einer Karte durch systematisches Umfahren

(Quelle: https://manual.robotis.com/assets/images/platform/turtlebot3/slam/slam_running_for_mapping.png)

2. Marktübersicht

2.1. Relevante Eigenschaften (Auflösung, Frequenz, ...)

Auf dem Markt ist eine große Auswahl an Laserscannern erhältlich. Alle diese Scanner unterscheiden sich leicht in einer Reihe von Parametern. Es ist zwar offensichtlich, dass ein niedriger Energieverbrauch vorteilhaft ist, aber es gibt viele andere Parameter – wie die Größe

des Gehäuses, die Winkelauflösung, die Abtastfrequenz, der maximale Abtastwinkel und die maximale Reichweite –, die sich manchmal widersprechen. Ihre Einflüsse sind schwieriger abzuschätzen. Die Form des Laserstrahls kann unterschiedlich sein, ebenso die Wellenlänge der Laserlichtquelle. Beim Einsatz als Sicherheitsscanner müssen Warn- und Schutzräume definiert werden. Einige Scanner liefern in den Rohmessdaten auch zusätzliche Werte wie die gemessene Intensität des reflektierten Laserstrahls. Dies ermöglicht weitere Berechnungen durch die Definition zusätzlicher Beobachtungsoptionen.

Es gibt einen Unterschied zwischen Sicherheitsscannern und LiDAR-Scannern. Zwar verfügen einige LiDAR-Scanner über eine hohe Auflösung und eine große Reichweite, doch sind die meisten von ihnen nicht in der Lage, die hohen Sicherheitsanforderungen beim Betrieb mit Menschen zu erfüllen.

2.2. Technische Daten

Einen Auszug aus den typischen technischen Daten des Sicherheits-Laserscanners finden Sie in der folgenden Tabelle

Tabelle 1: Technische Daten der zu testenden Geräte

Parameter	Typische Werte von Laserscannern
Winkelauflösung	0,1°
Sektorenbreite	1,7 mm/m
Schutzfeld max.	5,5 m
Entfernungsauflösung	1 mm
Gesamtwinkel	275°
Min. Entfernung	50 mm
Max. Entfernung	40 m
Zykluszeit	0,03 s

2.3. Halbtransparente Objekte

Laserscanner haben Schwierigkeiten, halbtransparente Oberflächen richtig zu erkennen. Screenshots zeigen, dass hochwertige Scanner eine Acrylplatte mit einem gestörten Signal an ihrer korrekten Position erkennen, während andere Scanner Schwierigkeiten mit dieser Situation haben (Abbildung 5).

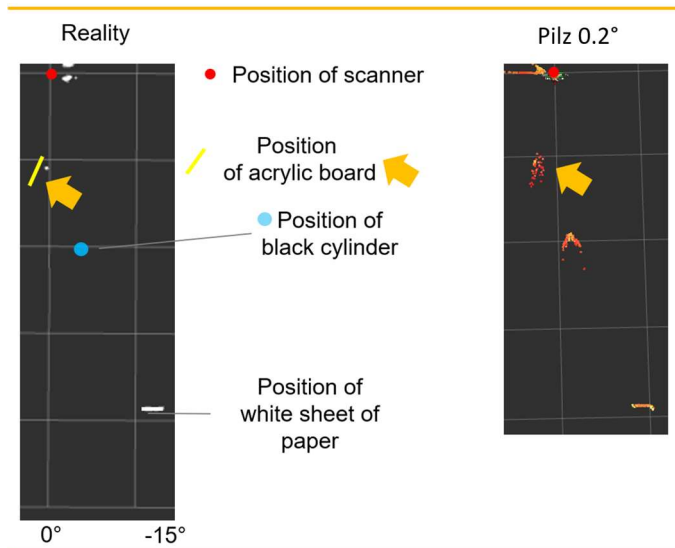


Abbildung 5: Erkennung einer durchsichtigen Acrylplatte und anderer Objekte (Screenshots RViz)

3. Genauigkeit der Lokalisierung

Die statischen Messungen vermitteln einen Eindruck von den leicht unterschiedlichen Eigenschaften der getesteten Scanner. Der Einsatz der Scanner in realen FTF/AGV- oder AMR-Anwendungen erfolgt nicht statisch, sondern unter dynamischen Bedingungen, wie sie ein experimenteller AMR bietet.

3.1. Aufbau

Der AMR wurde mit zusätzlichen Scannern ausgestattet, die ihre Daten an eine ROS-Software liefern, in der alle Scannerdaten zusammen mit den Daten der Odometrie des Fahrzeugs und den Kameradaten gespeichert werden. Das ROS-Softwarepaket "SLAM Toolbox" wird für die Verarbeitung und Speicherung der Daten verwendet.

Der vertikale Abstand zwischen den Scanebenen der getesteten Scanner beträgt weniger als 90 mm, sodass dazwischen praktisch keine relevanten Strukturen in der Umgebung zu sehen oder zu übersehen sind.

Zwei Markierungen befinden sich auf dem Boden in einem voll eingerichteten Labor mit einer etwas rauen Umgebung (Markierung 0 und Markierung 1), während die Markierungen 2 und 3 zwischen saubereren und geraden Wänden liegen. Der AMR wird mit dem Joystick gesteuert und die Markierungen werden über mehr oder weniger identische Wege erreicht.



Abbildung 6: Der AMR transportiert mehrere Scanner mit unterschiedlichen Aufgaben sowie die Kamera zur Erkennung von Markierungen

3.2. Datenerfassung

Die Daten für die Kartenerstellung werden von allen Scannern gleichzeitig erfasst. Im manuellen Modus wird der AMR durch den Laborbereich bewegt, um den Scannern so viel wie möglich von der Umgebung zu zeigen. Die Berechnungen für die Kartenerstellung werden anschließend offline durchgeführt.

Es werden Karten mit einer Auflösung von 5 cm und einer Auflösung von 1 cm erstellt.

Die Daten für die Lokalisierung werden aufgezeichnet, während eine durch vier Markierungen auf dem Boden definierte Strecke in einer bestimmten Reihenfolge und in einer bestimmten Richtung abgefahren wird. Die Steuerung erfolgt über einen Joystick. Die Daten werden in 11 Runden erhoben. Bei Erreichen einer Markierung in der entsprechenden Richtung und Position wird der AMR angehalten, und durch Drücken einer Taste am Joystick wird ein Signal erzeugt. Durch die gleichzeitige Erfassung aller Daten sind somit gleiche Bedingungen für die getesteten Scanner gewährleistet.

Schließlich wird die Position der Markierungen anhand der Scannerdaten und verschiedener geometrischer Transformationen berechnet, wobei die AMCL-Berechnung die Position auf der Grundlage der Scannerdaten bestimmt.

Abbildung 7 zeigt die aus den Laserscannerdaten erstellte Karte.

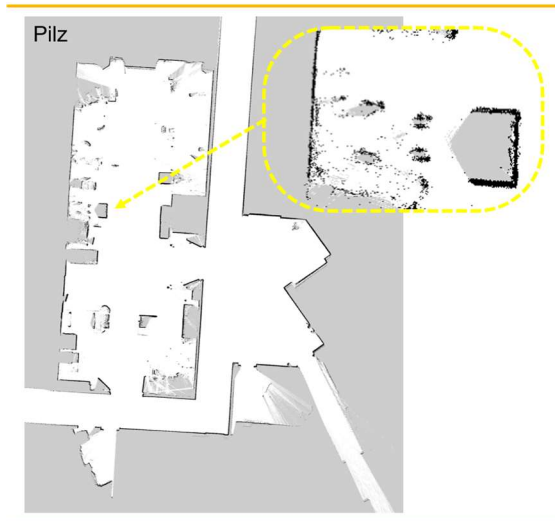


Abbildung 7: Mit einem Sicherheits-Laserscanner erstellte Karte mit einer Auflösung von 1 cm

3.3. Datenverarbeitung

Der Vergleich zwischen den aus den Scannerdaten ermittelten Positionen und den entsprechenden markierungsbasierten Positionen ist in Abbildung 8 dargestellt und zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Scannerdatensätzen.

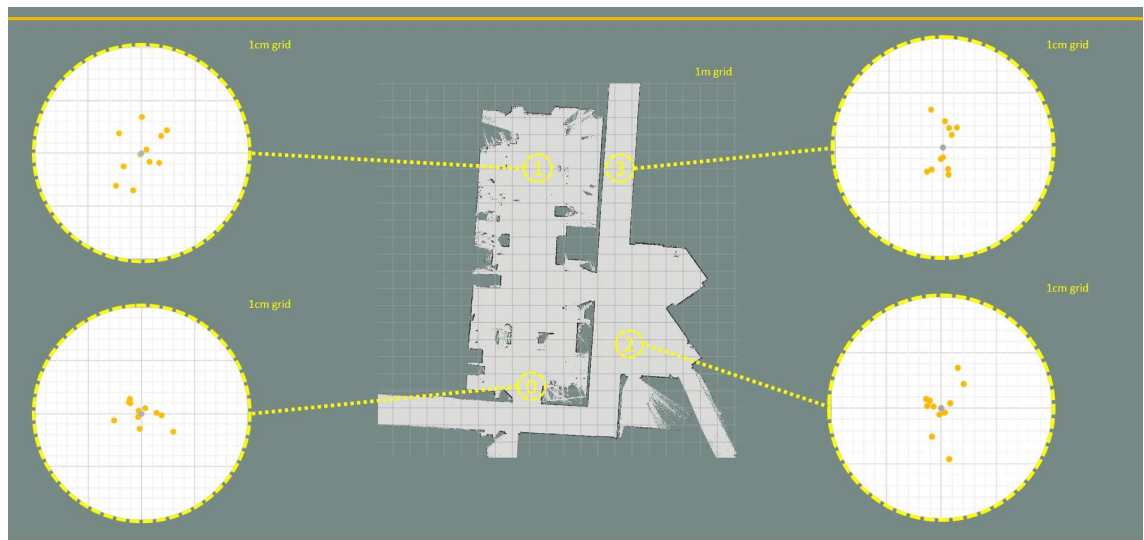


Abbildung 8: Aus Daten eines Sicherheits-Laserscanners generierte Karte (Auflösung 1 cm) mit Visualisierung der Lokalisierungsergebnisse

Die Standardabweichung der Abstände zum jeweiligen Mittelwert liegt bei etwa 2–3 Zentimetern, wie in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Standardabweichung der gemessenen Positionen in Bezug auf die Markierungen

Standard-abweichung	Markierung 0	Markierung 1	Markierung 2	Markierung 3	Gesamt-Ø
1 cm Karte	1,9 cm	2,7 cm	2,5 cm	2,3 cm	2,3 cm

3.4. Anwendung der Daten im Feld

Mit einer Genauigkeit von 2–3 cm ist es möglich, das Fahrzeug in seiner Umgebung zwischen glatten Wänden wie auch in einem eingerichteten Labor zu orten. Dies ist ein üblicher Bereich für Anwendungen mit modernen Laserscannern.

4. Fazit: Was bietet ein Sicherheits-Laserscanner?

In der mobilen Robotik sind Sicherheits-Laserscanner unverzichtbar, um den sicheren Betrieb von autonomen Fahrzeugen zu gewährleisten. Der Einsatz der Scanner ist nicht auf die Sicherheit beschränkt. Die Rohmessdaten stehen auch für die Lokalisierung und Navigation zur Verfügung, und es ist keine umfangreiche zusätzliche Infrastruktur oder ein zusätzliches LiDAR erforderlich.

Die Messdaten der getesteten Scanner nach heutigem Stand der Technik sind hochpräzise und wettbewerbsfähig. Die Erstellung von Karten und die Lokalisierung in verschiedenen Umgebungen werden mit den Daten mit durchweg guten Ergebnissen gelöst.

Für die Tests werden vorkompilierte ROS- und C++-Treiberpakete verwendet, die insbesondere mit einem ROS-Navigationsstapel zusammenarbeiten, der als Open Source verfügbar ist. Weitere Informationen finden Sie hier: <https://www.ros.org/> und <https://www.cplusplus.com/doc/tutorial/>.

Slave-Geräte können in Reihe geschaltet werden, um das Sichtfeld um mobile Fahrzeuge herum vollständig zu erweitern.

5. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: FTF mit Sicherheits-Laserscanner für geschwindigkeitsabhängige Zonenumschaltung	5
Abbildung 2: Verwendung von Sensoren zur Verfolgung von Routen (Quelle: https://www.atriainnovation.com/wp-content/uploads/2020/06/AGV_Sensores.jpg)	6
Abbildung 3: FTF/AGV und AMR; Quelle: https://s3.amazonaws.com/assets.ottomotors.com/content-images-v2/AMR-vs-AGV1.png?mtime=20210201115422 ..	6
Abbildung 4: Erstellung einer Karte durch systematisches Umfahren (Quelle: https://emanual.robotis.com/assets/images/platform/turtlebot3/slam/slam_running_for_mapping.png)	7
Abbildung 5: Erkennung einer durchsichtigen Acrylplatte und anderer Objekte (Screenshots RViz)	9
Abbildung 6: Der AMR transportiert mehrere Scanner mit unterschiedlichen Aufgaben sowie die Kamera zur Erkennung von Markierungen	10
Abbildung 7: Mit einem Sicherheits-Laserscanner erstellte Karte mit einer Auflösung von 1 cm	11
Abbildung 8: Aus Daten eines Sicherheits-Laserscanners generierte Karte (Auflösung 1 cm) mit Visualisierung der Lokalisierungsergebnisse	11

6. Glossar

Autonome mobile Roboter (AMR) sind Roboter, die ihre Umgebung verstehen und sich in ihr bewegen können, ohne direkt von einem Bediener beaufsichtigt zu werden oder einem festgelegten Weg zu folgen.

C++ ist eine universelle Programmiersprache.

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sind Materialhandhabungssysteme oder Lastenträger, die sich autonom in einem Lager, einem Vertriebszentrum oder einer Produktionsanlage bewegen, ohne dass ein Bediener oder Fahrer an Bord ist.

Lichtlaufzeitmessungen ermöglichen die Berechnung von Entfernungen anhand der gemessenen Zeit zwischen dem Aussenden eines Laserpulses und der Rückkehr der Reflexion über die Lichtgeschwindigkeit.

LiDAR ist ein Erkennungssystem, das nach dem Prinzip des Radars arbeitet, aber Licht von einem Laser verwendet, wobei die Lichtlaufzeit von Lichtimpulsen gemessen wird.

Neobotix GmbH ist ein Hersteller von mobilen Robotern aus Heilbronn.

Odometrie ist eine Methode zur Schätzung der Pose (Position und Orientierung) eines mobilen Systems aus den Daten seines Antriebssystems.

Rauschen ist das Gegenteil von Präzision bei Messungen und führt zu einem gestreuten Signal.

Rohdaten sind die unbearbeiteten Daten aus den Messeinrichtungen.

ROS ist eine als Open Source verfügbare Robotik-Middleware-Suite und eine Sammlung von Software-Frameworks für die Entwicklung von Roboter-Software.

Sicherheitsanwendungen sind technische Systeme, die nach den Grundsätzen der funktionalen Sicherheit entwickelt wurden, um unerwünschte Ereignisse zu vermeiden.

Sicherheits-Laserscanner verwenden eine gepulste Laserquelle. Ein integrierter Drehspiegel erzeugt einen zweidimensionalen Scan der umgebenden Objekte, die das Licht reflektieren.

Sicherheitssensoren sind selbstüberwachende Sensoren, die vor einer Gefahr warnen oder sie verhindern.

Simultaneous Localisation And Mapping (SLAM) ist ein zentrales Rechenproblem im Bereich der künstlichen Intelligenz und der mobilen Robotik, das sich mit dem Problem der Lokalisierung und Kartierung befasst, wenn keine Karte des Arbeitsbereichs verfügbar ist.

SLAM Toolbox ist eine von Steve Macenski entwickelte Sammlung von Werkzeugen und Funktionen für 2D SLAM in ROS.

Verzerrung ist eine systematische Abweichung von Messungen, die von nicht verzerrungsfreien Sensoren stammen.

Warnraum und/oder Schutzraum können in der Software eines Laser-Sicherheitsscanners definiert werden. Wird ein Objekt innerhalb eines solchen Raums erkannt, reagiert der Scanner mit einem Ausgangssignal.