

Entwicklung eines autonomiefokussierten hochmobilen Bodenrobotersystems für den Katastrophenschutz

Development of an autonomy-focused highly mobile rescue robot

Marius Schnaubelt, Tobias Ullrich, Moritz Torchalla, Jonas Diegelmann, Matthias Hoffmann, Prof. Dr. rer. nat. Oskar von Stryk, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik, 64289 Darmstadt, Deutschland, {schnaubelt, ullrich, stryk}@sim.tu-darmstadt.de

Kurzfassung

Mobile Rettungsroboter ermöglichen den menschlichen Bedienern die Bearbeitung von Aufgaben aus sicherer Entfernung in risikoreichen Umgebungen. Die aktuell übliche Teleoperation der Robotersysteme verursacht aufgrund der unstrukturierten Umgebung der komplexen und vorab unbekanntem Einsatzszenarien eine hohe kognitive Belastung für den Roboteroperator, was schnell zur Ermüdung führt. Durch intelligente autonome Assistenzfunktionen können die Operatoren entlastet werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Bedienfehlern reduziert und die Effizienz des Robotereinsatzes erhöht werden kann. Diese innovativen Assistenzfunktionen benötigen jedoch ein mechatronisches Design, dessen Anforderungen an Hard- und Software für ein effektives Gesamtsystem eng aufeinander abgestimmt und umgesetzt werden müssen. Die Entwicklung eines hochmobilen autonomiefokussierten Bodenroboters mit modularen Sensornutzlasten ermöglicht dem Operator ein umfassendes Situationsbewusstsein und bietet Unterstützung bei Navigation und Manipulation. Die Evaluation des Gesamtsystems und von Einzelkomponenten analysiert die Erfüllung des Anforderungskatalogs und demonstriert so die Eignung für (semi-)autonome Rettungsrobotereinsätze.

Abstract

Mobile rescue robots enable human operators to perform tasks from a safe distance in hostile environments. Due to the unstructured environment of the mostly complex and a priori unknown mission scenarios, the currently common teleoperation of robotic systems causes a high cognitive load for the robot operator, which quickly leads to fatigue. Intelligent autonomous assistance functions can relieve the operators increasing reliability and efficiency. However, autonomous assistance functions require a mechatronic system design whose hardware and software requirements are considered and implemented in close connection. The development of a highly mobile autonomy-focused ground robot with modular sensor payloads provides comprehensive situational awareness to the operator and assistance in navigation and manipulation. The evaluation of the overall system and individual components analyzes the fulfillment of the requirements catalog and thus demonstrates the suitability for (semi-)autonomous rescue robotics missions.

1 Einleitung

Mobile Bodenroboter können in Katastrophengebieten den menschlichen Bedienern ein verbessertes Situationsbewusstsein basierend auf Sensordaten (z.B. Kameras) aus sicherer Entfernung bereitstellen [1]. Dies ermöglicht den Rettungskräften die sichere Bearbeitung von Aufgaben in menschenfeindlicher Umgebung, zum Beispiel die Erkundung in unstrukturiertem Gelände oder das Steuern des Roboterarms für Manipulationsaufgaben.

Casper u. a. [2] nutzten Rettungsroboter, um nach dem Einsturz der Türme des World Trade Centers durch die Terroranschläge am 11. September 2001 nach menschlichen Überlebenden zu suchen und um die Struktur der Ruinen zu inspizieren. Nach der Nuklearkatastrophe von Fukushima im Jahre 2011 wurden von Nagatani u. a. [3] Bodenroboter eingesetzt, um das Innere der Reaktorgebäude zur Lagebilderstellung zu erkunden.

Die Umgebung der Einsätze ist in der Regel unstrukturiert, im Voraus unbekannt und enthält oft Hindernisse, welche überwunden werden müssen, um das Missionsziel zu erreichen. Durch die unvorhersehbare Natur von Katastrophen ist die vielseitige Einsetzbarkeit von Rettungsrobotern von

hoher Relevanz.

Intelligente autonome Flugroboter [4] können dank schneller Fortbewegung in der Luft und der Fähigkeit, Hindernisse überfliegen zu können, ein großflächiges Lagebild liefern. Jedoch sind die mögliche Sensornutzlast sowie die maximale Einsatzdauer ebenso wie witterungsabhängige Einsatzmöglichkeiten vergleichsweise eingeschränkt. Außerdem sind für die Erkundung von beengten Umgebungen sehr präzise Kollisionsvermeidungsfähigkeiten oder kollisionstolerante Konstruktionen notwendig, was die Effektivität von Flugrobotern in solchen Umgebungen einschränkt [1].

Bodenroboter mit Kettenantrieb werden dank einer relativ einfachen Regelung, höherer Traktion in unwegsamem Gelände im Vergleich zu Rädern und ihrer Transportkapazität für schwere Nutzlasten häufig als Rettungsroboter eingesetzt. Kommerziell erhältliche Systeme wie zum Beispiel die Telerob Telemax-Familie oder der iRobot PackBot sind vor allem auf teleoperierte Erkundung oder Manipulation ausgelegt und haben nur vereinzelt erste Assistenzfunktionen, zum Beispiel Inverskinematik (IK) und Tool-Center-Point-Steuerungen für den Manipulator sowie simultane Lokalisierung und Kartierung (SLAM) in 2D.

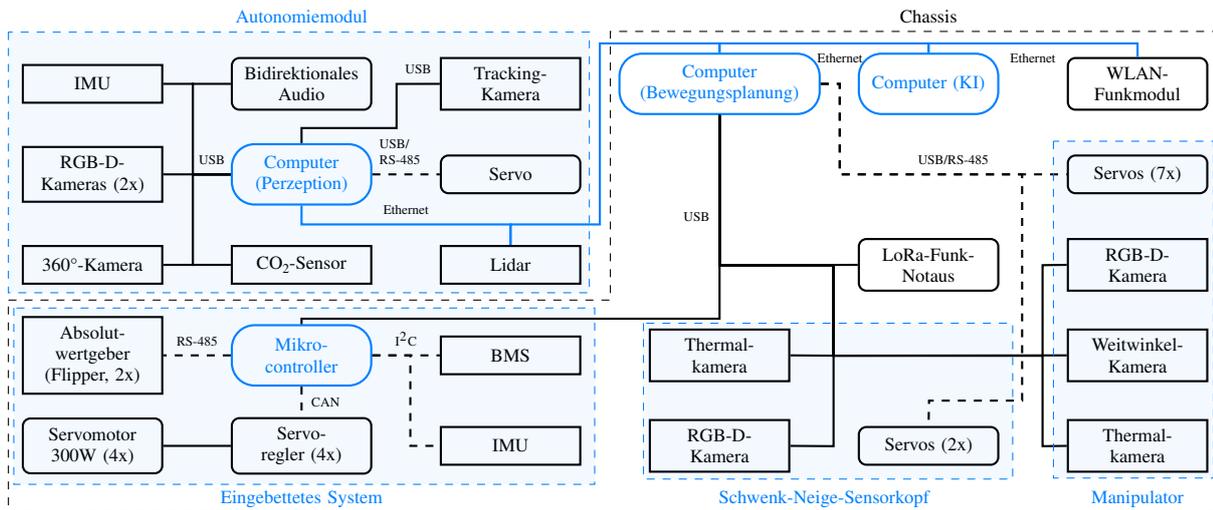


Abbildung 1 Überblick über die Architektur des Bodenrobotersystems mit einem Autonomiemodul als Beispiel für eine modulare Sensor- und Funktionsnutzlast.

Bodenroboter aus der Forschung [3, 5–7] fokussieren sich häufig auf hohe Mobilität und gute Manipulationsfähigkeiten, aber bislang noch weniger auf die Anforderungen autonomer Assistenzfunktionen (siehe Abschnitt 2.1). Schneider u. a. [8] präsentierten ein für Assistenzfunktionen nutzbares Modularisierungskonzept für die Nachrüstung von großen Bodenrobotern mit großen Tragflächen und -lasten. Dieses lässt sich jedoch nicht direkt auf kompakte und hochmobile Bodenroboter übertragen, die nur wenig Fläche für zusätzliche Sensor- und Computing-Module bieten. Die Teleoperation der aktuellen kompakten Bodenrobotersysteme in komplexen Einsatzszenarien erzeugt eine hohe kognitive Belastung für den Roboteroperator [9]. Dadurch ist nicht nur die Wahrscheinlichkeit von Bedienfehlern hoch, es wird zudem eine zuverlässige Datenverbindung mit niedriger Latenz und hoher Bandbreite zwischen Roboter und Bediener benötigt. Rettungsroboter mit integrierten Assistenz- und KI-Funktionen zur Entlastung des Bedieners können hier helfen, die kognitive Last des Bedieners und somit auch die Wahrscheinlichkeit von Bedienfehlern zu reduzieren. Außerdem können die benötigten Anforderungen an die Datenverbindung reduziert werden, was wiederum die Einsatzmöglichkeiten erweitert.

Die Nachrüstung von bisher rein teleoperierten Robotern durch Sensorik und Onboard-Computer liefert suboptimale Ergebnisse, da häufig die Umfeldsensorik abgeschattet wird und zudem die interne Sensorik und Gelenkregelung nicht mit adäquaten Taktraten und Genauigkeiten angesprochen werden kann. Durch einen erhöhten Roboterschwerpunkt und mögliche Selbstkollisionen mit den neuen Aufbauten wird die Mobilität des Roboters zudem eingeschränkt. Für ein hochperformantes intelligentes mechatronisches System müssen die Hard- und Softwarekomponenten des Roboters daher eng aufeinander abgestimmt werden.

Basierend auf mehrjähriger Forschung im Bereich künstlicher Intelligenz und autonomen Fähigkeiten für mobile Rettungsroboter [10, 11] wird die Entwicklung eines ket-

tenbasierten, hochmobilen und modularen Bodenroboters vorgestellt, der dank Erfüllung der Anforderungen an intelligente autonome Assistenzfunktionen optimale Voraussetzungen für Entwicklung und Einsatz leistungsfähiger Algorithmen bietet.

2 Design- und Entwicklungsprozess

Der Fokus des zu entwickelnden Robotersystems liegt auf der autonomen Exploration von unbekanntem Gebiet bei gleichzeitig hoher Mobilität und Manipulationsfähigkeit, auch bei schwacher oder nicht vorhandener Funkverbindung. Hierfür soll das System mit modularen Sensornutzlasten ausgerüstet werden können, welche verschiedene Funktionalitäten bieten.

2.1 Anforderungen für intelligente Assistenzfunktionen

Intelligente Assistenzfunktionen für Navigation und Manipulation benötigen eine akkurate und vollständige Erfassung des Umfelds und des eigenen Roboterzustands. Die Umfeldsensorik sollte möglichst das komplette Gebiet rund um den Roboter abdecken, um eine robuste Lokalisierung und Hindernisvermeidung gewährleisten zu können, die Nahbereiche direkt vor und hinter dem Roboter sind dabei jedoch am wichtigsten. Für die Generierung eines qualitativ hochwertigen Umgebungsmodells ist die Positionierung der externen Sensorik essenziell, um Abschattungen durch die eigene Robotergeometrie zu vermeiden. Hieraus entsteht allerdings ein Zielkonflikt zwischen Umfeldsensorik, Mobilität und Manipulationsfähigkeit des Roboters. Neben der möglichst guten Umfeldsensorik mit ausreichend leistungsfähigem Onboard-Computing zur Verarbeitung der Daten sollte ein Rettungsroboter möglichst klein, leicht und geländegängig sein. Die für eine erhöhte Mobilität – zum Beispiel die Überwindung von Hindernissen – benötigten Flipper (verstellbare Kettenerweiterun-

gen) mit möglichst großer Länge sorgen jedoch für eine Sensorabschattung. Daher sollten die Flipper kompakt ein-fahrbar sein, wenn diese nicht benötigt werden. Für viel-seitige Manipulationsfähigkeiten wird ein Manipulator mit großer Reichweite und hoher Nutzlast benötigt, um zum Beispiel Türen öffnen zu können. Dieser beeinträchtigt wiederum die Umfeldsensorik, weshalb sich der Manipu-lator in eine kompakte Konfiguration fahren lassen sollte, wenn er nicht benötigt wird. Für zeiteffiziente Exploratio-nen sollte sich der Roboter in der Ebene mit mindestens 1 ms^{-1} fortbewegen können, sowie Treppen mit bis zu 45° Steigung überwinden können. Für die Hindernisüberwin-dung sowie für vielseitige Möglichkeiten bei der Manipu-lation sollte sich der Roboter aus eigener Kraft auf die Flip-per stellen können. Da der menschliche Operator im auto-nomen Betrieb keine kleineren Regelungsfehler von Mani-pulator, Flipper und Sensorkopf ausgleichen kann, sind präzise Positionsregelungen der Roboterelkenke notwen-dig, welche über Absolutwertgeber die aktuellen Gelenk-positionen zurückmelden können. Die verfügbaren Funk-tionen der Hardware müssen über geeignete und erweiter-bare Softwareinterfaces für die Algorithmik ansprechbar und überwachbar sein. Beispiele hierfür sind das Anfahren von Arm- und Flippersollpositionen für Manipulation und Hindernisüberwindung oder die Geschwindigkeitsregelung der Roboterbasis mit rückgeführter Odometrie zum Abfah-ren von geplanten Trajektorien bei der autonomen Naviga-tion. Während der Überwindung von unwegsamem Gelände sind hochfrequente, zeitsynchronisierte und genaue Mess-daten von der inertialen Messeinheit (IMU) und dem Lidar notwendig, um auch bei hochdynamischen Bewegungen z.B. dem Kippen des Roboters, eine robuste 3D-SLAM-Posenschätzung berechnen zu können. Für eine effektive Anpassung an vorliegende Situationen sollte sich die Um-feldsensorik schnell in Form von modularen Aufbauten, vergleichbar zu [8], allerdings auf wesentlich kleinerer Flä-che, wechseln lassen. Zudem sollte sich das System durch einfach austauschbare Modulkomponenten einfach warten lassen.

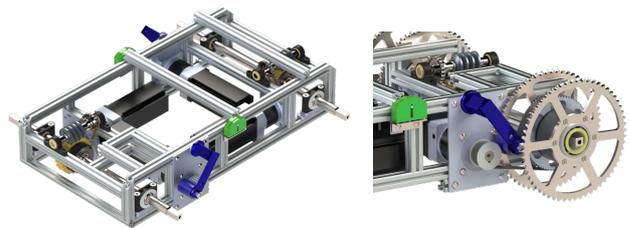
2.2 Prototypentwicklung

Basierend auf den in Abschnitt 2.1 genannten Kriterien und den gesammelten Erfahrungen mit dem zuvor entwickel-ten Bodenrobotersystem ohne Flipper [11] wurde ein auto-nomiefokussiertes und hochmobiles Bodenrobotersystem entwickelt. **Abb. 1** gibt einen Gesamtüberblick über des-sen Architektur, die inklusive des eingebetteten Systems auf einer quelloffenen Middleware, dem Robot Operating System (ROS) [12] (Version Noetic) aufbaut.

2.2.1 Digitaler Zwilling

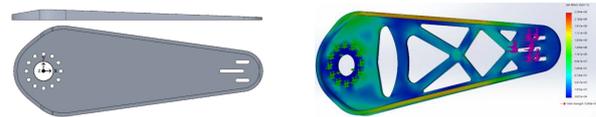
Zur Planung der Umfeldsensorikplatzierung sowie der all-gemeinen Robotergeometrie wurde parallel zum realen Prototyp ein digitaler Zwilling von Roboterbewegungen, Sensorik und Interaktion mit der Umwelt in der physikba-sierten Echtzeitsimulation Gazebo¹ entwickelt.

¹<http://gazebosim.org/>



(a) Der Profilrahmen mit installierten Hauptkomponenten. (b) Der Kettenantrieb für Haupt- und Flipperkette

Abbildung 2 CAD-Renderings der Chassis-Konstruktion.



(a) Vorder- und Seitenansicht der inertialen Flipperstruktur. (b) Die gewichtsoptimierte Flipperstruktur.

Abbildung 3 Die FEM-basierte Topologie-Optimierung der Flipperstruktur.

2.2.2 Chassis

Der Rahmen des Roboters besteht aus mit Dibondplatten verkleideten Aluminiumprofilen und stellt die Befestigungspunkte für die Kernkomponenten wie Motoren, Achslager, Manipulator und externe Sensormodule bereit, siehe **Abb. 2a**. Die unteren Längsprofile des Rahmens sind nicht durchgehend, so dass die rotationssymmetrisch angeordneten Motoren alle in der gleichen Ebene liegen können, was zu einem niedrigeren Schwerpunkt, einer symmetrischeren Gewichtsverteilung und einer besseren Wärmeableitung durch die Aluminium-Bodenplatte bei nur geringen Stabilitätseinbußen führt.

Kettenantrieb Der Roboter wird von zwei bürstenlosen 300 W AC-Servomotoren von LS Mecapion mit einem Nennmoment von $0,95 \text{ Nm}$ bei einer Nenndrehzahl von 3000 min^{-1} angetrieben. Das Spitzendrehmoment der Motoren beträgt $2,85 \text{ Nm}$, die Motorregelung erfolgt unter Nutzung der im Motor integrierten Inkrementalgeber über Elmo Motion Control Whistle 10/60 Motorcontroller, welche mit 48 V versorgt werden. Zur Bereitstellung des notwendigen Drehmoments werden die beiden auf der Flipperwelle gelagerten Rollenkettenräder über ein zwei-stufiges Getriebe mit einem Gesamtübersetzungsverhältnis von $1 : 30$ angetrieben (siehe **Abb. 2b**). Die erste Stufe ist ein PLQE-Planetengetriebe von Neugart mit einem Übersetzungsverhältnis von $1 : 10$. Die nächste Stufe besteht aus einem außerhalb des Roboters liegenden Zahnriemenge-triebe mit einem Übersetzungsverhältnis von $1 : 3$. Die ge-wählte Übersetzung führt zu einer Translationsgeschwin-digkeit der Ketten von knapp über 1 ms^{-1} bei Nenndreh-zahl in der Ebene und ausreichend Drehmoment zum Be-fahren von Treppen mit 45° Steigung. Die starr verbunde-ne Kettenradbaugruppe treibt die Haupt- und Flipperkette an. Zur Gewichtsersparnis sind die Kettenräder mit Aus-sparungen versehen und aus unlegiertem Titan gefertigt.

Flipperbaugruppe Zur Erhöhung der Mobilität erhält die Roboterplattform vier Flipper, von denen die vorderen und hinteren Flipper über eine gemeinsame Welle gekoppelt sind. Die beiden Flipperwellen werden jeweils über ein zweistufiges Getriebe (Planetengetriebe und selbsthemmendes Schneckengetriebe) mit einer Gesamtübersetzung von 1 : 168 durch einen 300 W AC-Servomotor angetrieben (siehe Abschnitt 2.2.2). Das Schneckenrad ist über eine Rutschkupplung mit der kontinuierlich rotierbaren Flipperwelle verbunden, welche die 20 mm starke Flipperwelle aus unlegiertem Titan vor Übermoment schützt. Die Positionsregelung der Flipper wird über kapazitative Absolutwertgeber (CUI AMT21) mit 12 Bit Auflösung ermöglicht, welche über Zahnriemen mit der Flipperwelle gekoppelt sind. Die Hauptstruktur des Flippers besteht aus Aluminium 7075 T6, welcher über eine Vierkantverbindung formschlüssig mit der Flipperwelle verbunden ist. **Abb. 3** zeigt die per Finite-Elemente-Methode (FEM) topologieoptimierte Flipperstruktur zur Gewichtsreduktion. Die Flipperlänge wurde so gewählt, dass sich ein möglichst lange, jedoch einseitig vollständig einklappbare Flipper ergeben, um die Sichteinschränkung der Umfeldsensorik zu minimieren.

Eingebettetes System Der Teensy 4.0 Mikrocontroller, welcher als Basis des eingebetteten Systems genutzt wird, ist über USB-Rosserial² an das ROS-System angeschlossen. Dieser liest die Absolutwertgeber aus und kommandiert die Servoregler der Flipper- und Antriebsmotoren über CAN (Controller Area Network) mit 100 Hz Regelfrequenz. Zusätzlich ist ein Batteriemanagementsystem (BMS) integriert, welches die Akkumulatorzellspannungen überwacht. Eine zusätzliche IMU dient der verbesserten differentiellen Geschwindigkeitsregelung der Roboterbasis. Die Ansteuerung des eingebetteten Systems und die Rückmeldung von Sensor- und Diagnosedaten erfolgt direkt über das ROS-System.

2.2.3 Modulare Sensornutzlasten

Als Basis für die vielfältigen Assistenzfunktionen stehen zwei modulare Sensornutzlasten zur Verfügung, das Autonomiemodul sowie das Navigationsmodul für gestörte Sichtbedingungen. Die modularen Sensornutzlasten werden über Ethernet und 24 V Versorgungsspannung an die Roboterbasis angebunden.

Autonomiemodul Für 3D-SLAM und 3D-Perzeption ist das Autonomiemodul mit einem kontinuierlich rotierenden Velodyne VLP-16 3D-Lidar ausgestattet, der über ein Stirnradgetriebe von einem Robotis Dynamixel XM430-W350 Servo angetrieben wird. Die Übertragung der Daten und Stromversorgung ist mittels eines Schleifrings realisiert. Mit diesem Aufbau wird eine nahezu vollständige Abdeckung aller Richtungen mit hochgenauen und dichten Punktwolken Daten erreicht. Im Nahbereich des Roboters werden die Tiefendaten des Lidars durch zwei nach

vorne und hinten gerichtete Intel Realsense D435 RGB-D-Kameras ergänzt. Oberhalb des Lidars ist eine kompakte, 360°-Kamera (Insta360 Air) montiert, welche für die omnidirektionale Erfassung visueller Informationen verwendet wird. Das 360°-Bild kann dazu benutzt werden, Objekte in allen Richtungen gleichzeitig zu erkennen, ohne dass eine Kamera mechanisch bewegt werden muss. Um die Lage der Plattform zu messen, ist das Fahrzeug mit leistungsfähiger Inertialsensorik (Microstrain 3DM-GX3-45 IMU) ausgestattet. Diese misst die Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten und schätzt die Orientierung des Sensors. Eine Intel Realsense T265 Tracking-Kamera wird zur Verbesserung der Geschwindigkeitsregelung des Roboters genutzt. Zur Onboard-Verarbeitung der Daten wird ein Intel Hexacore NUC verwendet.

Navigationsmodul für gestörte Sichtbedingungen Visuelle Sensoren wie Lidar und Kameras liefern unter Einfluss von Rauch, Feuer, aufgewirbeltem Staub oder Nebel nur ungenügende und unzuverlässige Messwerte. Um weiterhin eine robuste Lokalisierung und Navigation unter diesen Bedingungen gewährleisten zu können, wurde das Modul mit Radar- und Ultraschallsensoren ausgestattet, die von diesen Aerosolen nicht signifikant beeinflusst werden. Die Rohdaten des Texas Instruments (TI) IWR1443BOOST Radarsensors werden über ein TI DCA1000EVM Modul in Echtzeit über Ethernet an einen kleinen Einplatinencomputer gestreamt. Die Radarmessungen werden für das 2D-SLAM-Verfahren durch eine IMU und drei in 45° zueinander angewinkelten Ultraschallsensoren (MaxBotix MB1300 XL-MaxSonar-AE0) ergänzt, welche durch einen Teensy 4.0 Mikrocontroller ausgelesen werden. Für eine höhere Datendichte wird das Radar durchgehend durch einen Robotis Dynamixel XM430-W210 Servo rotiert, Gigabit-Ethernet und Versorgungsspannung werden über einen Schleifring übertragen. Für einen direkten qualitativen Vergleich des für Radarsensoren angepassten SLAM-Verfahrens von [13] sowie für die multimodale Sensordatenfusion ist das Modul mit einem Hokuyo UTM-30LX-EW 2D-Lidar ausgestattet.

2.2.4 Manipulator

Der eingesetzte RM-P60-RNH Manipulator von Robotis hat die Kinematik eines industriellen Vertikalknickarmroboters mit sechs Achsen. Auf dem Robotis RH-P12-RN Endeffektor sind eine Seek Thermal Wärmebildkamera, eine Intel Realsense D435 RGB-D-Kamera sowie eine Logitech C920 Kamera mit Weitwinkelobjektiv montiert. Der Arm lässt sich per MoveIt³ über ROS ansprechen.

2.2.5 Schwenk-Neige-Sensorkopf

Für die ergänzende Umfeldwahrnehmung und die Endeffektorverfolgung ist der aus zwei Robotis Dynamixel XM430-W350 aufgebaute Schwenk-Neige-Sensorkopf mit einer Seek Thermal und einer Intel Realsense D435 RGB-D-Kamera ausgestattet.

²<http://wiki.ros.org/rosserial>

³<https://moveit.ros.org/>



Abbildung 4 Die kolorierten Lidar-Punktwolken [11] bieten ein verbessertes Situationsbewusstsein für den Roboteroperator.

3 Experimentelle Validierung und Ergebnisse

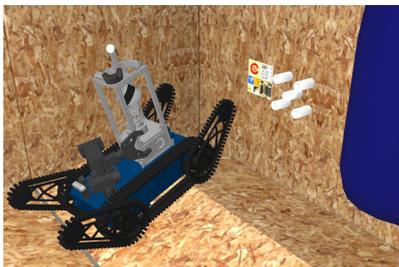


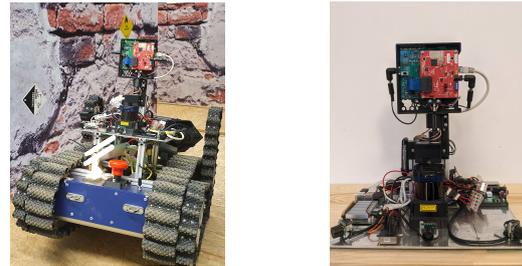
Abbildung 5 Gazebo-Simulation der Roboterplattform.

Digitaler Zwilling Der in **Abb. 5** gezeigte digitale Zwilling kann durch vollständig simulierte Sensorik und Physik mit zum realen Roboter kompatiblen Softwareinterfaces zur Entwicklung und ersten Evaluation von intelligenten Assistenzfunktionen genutzt werden.

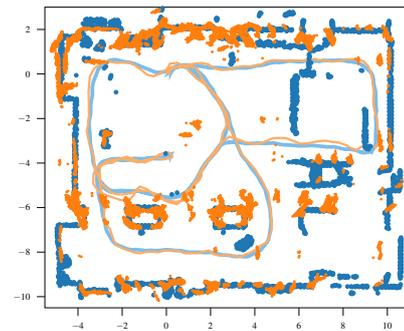
Modulare Sensornutzlasten Das System integriert zahlreiche Sensoren in das Autonomiemodul, welche die Entwicklung und Anwendung umfassender Operatorassistentenfunktionen ermöglichen. **Bild 4b** zeigt die durch den drehenden Lidar erstellte dichte Punktwolke der Umgebung (**Bild 4a**), welche nach Höhe über dem Boden eingefärbt ist und so räumliche Informationen liefert. Durch die Kolorierung der Punktwolke (**Bild 4c**) mit den Bilddaten der 360°-Kamera [11] wird ein verbessertes Situationsbewusstsein für den Roboteroperator ermöglicht.

Dank dem in **Abb. 6** gezeigten Modul ist auch die Lokalisierung und Navigation in Umgebungen mit gestörten Sichtbedingungen möglich. Während die durch das Radar-SLAM erstellte Karte im Vergleich zur mit [13] erstellten Lidarkarte noch weniger dicht ist, liegt der Lokalisierungsfehler der Trajektorie mit einem durchschnittlichen Translationsfehler von $8,6 \pm 5,9$ cm und einem durchschnittlichen Rotationsfehler von $0,27 \pm 0,29^\circ$ schon in der gleichen Größenordnung. Durch den Einsatz eines hochwertigeren Radarmoduls würden sich dichtere Karten erzeugen lassen.

Mobilität Zum Test der Mobilität des Gesamtsystems wurden verschiedene, an [14] angelehnte Tests durchge-



(a) Roboterplattform mit installiertem Modul. **(b)** Nahaufnahme des Moduls.



(c) Die vom Radar (orange) erstellte Karte und Trajektorie im Vergleich mit der des Lidars (blau).

Abbildung 6 Vergleich der vom Navigationsmodul für gestörte Sichtbedingungen mit Radar und Lidar erstellten 2D-Karten und Lokalisierungen.

führt, siehe **Abb. 7**. Die daraus resultierenden Spezifikationen der hochmobilen Plattform sind in Tabelle 1 gelistet. Die spezielle Konstruktionsweise der Roboterkette sorgt für hohe Traktion auf Flächen sowie an Kanten und bietet eine passive Dämpfung. Treppen mit 45° Steigung lassen sich zwar unter Ausnutzung von Leistungsreserven der Servoregler befahren, für eine durchgehende Leistung muss der Kettenantrieb nochmals optimiert werden. Der Roboter kann sich aus eigener Kraft auf beide Flipper stellen, um so Hindernisse überwinden zu können. Somit erfüllt das entwickelte Robotersystem die gestellten Mobilitätsanforderungen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Design und Entwicklung eines kettenbasierten, hochmobilen und modularen Bodenroboters vorgestellt, der die Anforderungen an intelligen-



(a) Treppe mit 35 Grad Steigung. (b) Erhöhte angewinkelte Rampen. (c) Ein Geröllhaufen. (d) 32 cm Stufenhöhe.

Abbildung 7 Tests zur Überprüfung der Mobilität des neuen Bodenrobotersystems.

Tabelle 1 Spezifikationen der Robotikplattform.

Spezifikation	Wert
Kompakte Betriebsgröße	0,71 m Länge, 0,518 m Breite, 0,692 m Höhe
Maximale Betriebsgröße	1,21 m Länge, 0,518 m Breite, 0,692 m Höhe
Gesamtgewicht	57,3 kg
Maximale Steigung	45°
Maximale Stufenhöhe	30 cm
Höchstgeschwindigkeit (Ebene)	1,1 ms ⁻¹
Manipulatorreichweite	0,85 m
Manipulatornutzlast	2,5 kg
Stromquelle	LiPo-Akkumulatoren (24 V & 48 V, 377,4 Wh)
Typ. Laufzeit	1,5 h
Bedienmodi	Semi- & Voll-Autonomie, Teleoperation

te autonome Assistenzfunktionen erfüllt. Die entwickelte mechatronische Plattform bietet dank der autonomiefokussierten Ausrichtung optimale Voraussetzungen für die Entwicklung komplexer Assistenz- und KI-Funktionen zur Bedienerentlastung. Basierend auf künftigen Evaluationen in Rettungsrobotikwettbewerben [14] sollen Hard- und Software fortlaufend iterativ verbessert werden.

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise durch die LOEWE Initiative des Landes Hessen im Rahmen des LOEWE-Zentrums emergenCITY gefördert. Teile dieses Beitrags wurden durch Mittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Teilvorhabens „Autonome Assistenzfunktionen für Bodenroboter“ des Verbundprojekts A-DRZ (Förderkennzeichen 13N14861) gefördert.

Literatur

- [1] J. Delmerico u. a. „The current state and future outlook of rescue robotics“. In: *Journal of Field Robotics* 36.7 (2019), S. 1171–1191.
- [2] J. Casper u. a. „Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the

World Trade Center“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 33.3 (2003), S. 367–385.

- [3] K. Nagatani u. a. „Redesign of rescue mobile robot Quince“. In: *2011 IEEE Int. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics*. 2011, S. 13–18.
- [4] C. Sampedro u. a. „A fully-autonomous aerial robot for search and rescue applications in indoor environments using learning-based techniques“. In: *J Intell Robot Syst* 95.2 (2019), S. 601–627.
- [5] R. Edlinger u. a. „MARC - Modular Autonomous Adaptable Robot Concept“. In: *2019 IEEE Int. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. 2019, S. 1–7.
- [6] T. Takemori u. a. „Development of the multifunctional rescue robot FUHGA2 and evaluation at the world robot summit 2018“. In: *Advanced Robotics* 34.2 (2020), S. 119–131.
- [7] S. Habibian u. a. „Design and implementation of a maxi-sized mobile robot (Karo) for rescue missions“. In: *ROBOMECH Journal* 8.1 (Jan. 2021).
- [8] F. E. Schneider u. a. „Using robots for firefighters and first responders: Scenario specification and exemplary system description“. In: *2017 18th Int. Carpathian Control Conference (ICCC)*. 2017, S. 216–221.
- [9] R. R. Murphy. „Human-robot interaction in rescue robotics“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 34.2 (2004), S. 138–153.
- [10] S. Kohlbrecher u. a. „Hector open source modules for autonomous mapping and navigation with rescue robots“. In: *Robot Soccer World Cup*. Springer. 2013, S. 624–631.
- [11] S. Kohlbrecher u. a. *RoboCup Rescue 2019 Team Description Paper Hector Darmstadt*. Techn. Ber. Technical University of Darmstadt.
- [12] M. Quigley u. a. „ROS: an open-source Robot Operating System“. In: *ICRA workshop on open source software*. 2009.
- [13] K. Daun u. a. „Large Scale 2D Laser SLAM using Truncated Signed Distance Functions“. In: *2019 IEEE Int. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. 2019, S. 222–228.
- [14] J. Pellenz u. a. „Novel rule set for the robocup rescue robot league“. In: *2016 IEEE Int. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. IEEE. 2016, S. 282–283.