

Sicheres Navigieren in dynamischen Umgebungen mit 3D-Kollisionsvermeidung

Stefan Stiene und Joachim Hertzberg

Universität Osnabrück, Inst. f. Informatik, AG Wissensbasierte Systeme,
Albrechtstraße 28, 49069 Osnabrück, Deutschland
{sstiene,hertzberg}@informatik.uni-osnabrueck.de
www.inf.uos.de/kbs/

Abstract Dieses Papier stellt eine neuartige Methode vor, die 3D-Hindernisvermeidung ermöglicht. Die Sensorkonfiguration beruht auf sechs Laserscannern, die die gesamte Roboteroberfläche abdecken. Die Daten der sechs Laserscanner werden zu einem virtuellen, zweidimensionalen, horizontal ausgerichteten 360°-Laserscanner kombiniert. Da der virtuelle Laserscanner die 3D-Umgebung in einem zweidimensionalen Datensatz repräsentiert, ermöglicht er in Kombination mit klassischen Hindernisvermeidungsalgorithmen wie der *Vector Field Histogram* Methode eine 3D-Hindernisvermeidung.

Schlüsselwörter: Kollisionsvermeidung, autonome Navigation, 360°-Laserscanner, USARSim, Player/Stage

1 Problemstellung

Im Kontext des BMBF-Verbundprojekts LiSA (Assistenzroboter in Laboren von Life-Science-Unternehmen [6]) stellt sich das folgende Problem: Eine holonome Roboterplattform soll in einem in Betrieb befindlichen Laborgebäude auf Anforderung Arbeitsstationen anfahren und dort einfache Manipulationsaufgaben verrichten. Dazu ist Vermeidung der Kollision mit Laborpersonal zertifizierbar sicherzustellen. Weiterhin muss integrale, also den gesamten Roboterkörper betreffende Kollisionsvermeidung mit teilweise dynamischen Alltagsobjekten wie überkragenden Arbeitsplatten oder offen stehenden Schubladen in jeder Höhe gewährleistet sein. Pfadplanung und Lokalisierung sollen auf einer Umgebungskarte basieren, die zeitlich vor dem eigentlichen Robotereinsatz erstellt wird und die in größeren Zeitabständen änderbar sein sollte; diese Karte soll zudem als visuelles Element der Mensch-Roboter-Interaktion verfügbar sein.

Der vorliegende Aufsatz skizziert die Lösung dieses Problems. Sie beruht insbesondere auf Verwendung von Laserdaten zur Erfassung der 3D-Umgebungsgeometrie, die teils off-line (Kartierung), teils on-line (integrale Kollisionsvermeidung) eingesetzt wird. Da der reale Roboter erst zur Mitte der Projektlaufzeit fertiggestellt wird, wird die Simulationsumgebung USARSim [1] verwendet, um eine optimale Sensorkonfiguration zu bestimmen. Damit die Kontrollsoftware anschließend unverändert auf den realen Roboter angewendet werden kann, wird die Hardware Abstraktionssoftware Player [4] verwendet.

Häufig wird die Hindernisvermeidung bei autonomen, mobilen Robotern auf zwei Dimensionen beschränkt. Es existieren verschiedene Verfahren, kollisionsfreie zweidimensionale Bewegung in dynamischen Umgebungen zu realisieren [7]. Des Weiteren existieren dreidimensionale Pfadplanungsalgorithmen, die kollisionsfreie Bewegung in dreidimensionalen, jedoch statischen Umgebungen realisieren. Zur dreidimensionalen Hindernisvermeidung in dynamischen Umgebungen werden häufig Sonarsensoren über die Roberoberfläche verteilt [2]. Diese Sensorkonfigurationen besitzen jedoch den Nachteil der Messungenauigkeit und des Übersprechens der Sonarsensoren.

Des Weiteren werden verschiedene Konfigurationen von rotierenden Laserscannern eingesetzt, um Hindernisvermeidung zu realisieren [5]. Gegenüber diesen Konfigurationen hat die hier vorgeschlagene Sensorkonfiguration den Vorteil der permanenten Kollisionsvermeidung. Ferner wird in [5] sowie in [9] das Prinzip, 3D-Daten zu virtuellen Laserscans zu verarbeiten, angewandt, das in dieser Arbeit ebenfalls zum Einsatz kommt.

2 Navigationskarte aus 3D-Umgebungsaufnahmen

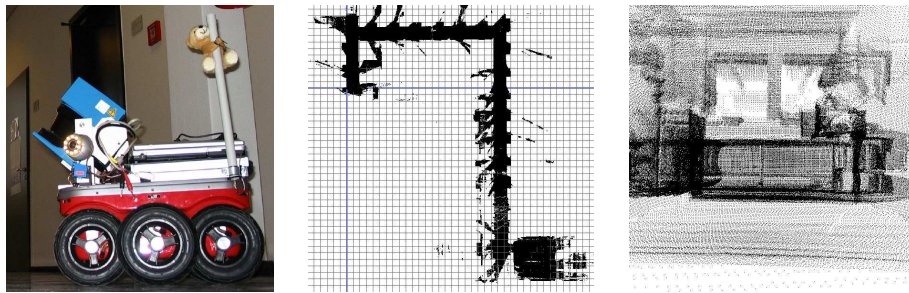


Abbildung 1. Links: Der autonome mobile Roboter Kurt3D. Mitte: Aufsicht auf die dreidimensionale Punktwolke der Laborumgebung, wobei ein Kästchen die Seitenlänge 1m besitzt. Rechts: Perspektivische Sicht eines Ausschnitts der Punktwolke.

Da der LiSA-Roboter seine Umgebung nicht autonom explorieren soll, wird eine Karte der Umgebung benötigt, um eine für die Navigation notwendige Lokalisierung und Pfadplanung zu ermöglichen. Um diese Karte zu erstellen, wird die spätere Arbeitsumgebung mit Hilfe des autonomen Roboters Kurt3D (Abb. 1 links) dreidimensional vermessen. Dieser ist mit einem 3D-Laserscanner ausgerüstet, der es ihm ermöglicht, durch iteratives Scanmatching eine dreidimensionale Punktwolke der Umgebung zu erstellen (Abb. 1 mitte und rechts) [8]. Aus dieser Punktwolke wird halbautomatisch die zugrunde liegende Gebäudegeometrie extrahiert und in eine Karte für die Robotersimulationsumgebung US-ARSim umgewandelt. Aus dieser dreidimensionalen Simulationsumgebung wird die zweidimensionale Navigationskarte erstellt, indem in der Höhe der horizontalen Laserscanner des LiSA-Roboters eine Linienschnittkarte als Schnitt durch die Sim-

ulationsumgebung erstellt wird. In die Navigationskarte wird zusätzlich manuell semantische Information der Umgebung (wie Türdurchfahrten, Arbeitsstationen, ...) durch verschiedene Farben markiert. Die Navigationskarte sowie die Simulation dienen im LiSA-Projekt zusätzlich zur Visualisierung bei der Mensch-Roboter-Interaktion.

3 Sensorkonfiguration des LiSA-Roboters

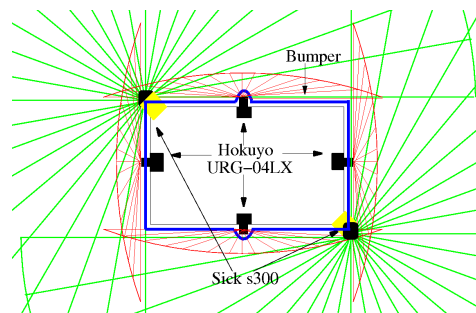


Abbildung 2. Messbereiche der beiden S300-Laserscanner und der vier Hokuyo URG-04LX Laserscanner (Aufsicht)

Der LiSA-Roboter besitzt eine neuartige Sensorkonfiguration mit insgesamt sechs Laserscannern. So werden zwei Sick S300-Laserscanner an gegenüberliegenden Ecken des Roboters 10 cm über dem Boden und horizontal zu diesem ausgerichtet montiert. Neben diesen Laserscannern wird an jeder Seite des Roboters unten mittig ein Hokuyo URG-04LX Laserscanner angebracht. Sie besitzen eine Reichweite von etwa 4m und eine Auflösung von 0.36° . Die Laserscanner sind so ausgerichtet, dass ihre Scanebene mit dem Roboter einen Winkel von 40° einschließen, so dass die vier Scanebenen einen Trichter um den Roboter bilden (siehe Abb. 2 und 3 links). Neben den optischen Sensoren besitzt der Roboter Encodersensoren, die Daten über die Radwinkel und Radumdrehungen liefern, und eine IMU, die die Orientierung des Roboters im Raum bestimmt. Bekanntlich ist die Energieaufnahme ein potentielles Problem für einen Dauerbetrieb mobiler Roboter. Dieses Problem ist hier entschärft durch Verwendung neuer, relativ energieeffizienter Scanner-Modelle. Ein S300-Laserscanner braucht 8W, ein URG-04LX 2,5W - die Leistungsaufnahme der kompletten Scanner-Konfiguration beträgt also 26W. Zum Vergleich: die älteren Scanner LMS 200 haben eine Aufnahme von 20W.

4 Lokalisierung des Roboters

Zur Lokalisierung werden die beiden horizontalen Sick Laserscanner zu einem 360° Laserscanner kombiniert. Durch die Scanbereiche von jeweils 270° wird

dadurch ein Sichtbereich von 360° realisiert, in dem sogar überlappende Einzeldatensätze existieren. Die Daten des Laserscanners sind in Abb. 3 rechts zu sehen. In Kombination mit der Odometrie und der IMU ermöglicht dieser kombinierte Laser eine Bestimmung der aktuellen Pose des Roboters in der Navigationskarte mit dem *Monte-Carlo-Lokalisierungsverfahren* [3]. Der virtuelle, aus den Daten der beiden S300-Laserscanner kombinierte Laserscanner wird im Folgenden *Navigationslaserscanner* genannt.

5 Integrale Kollisionsvermeidung durch 3D-Laserdaten

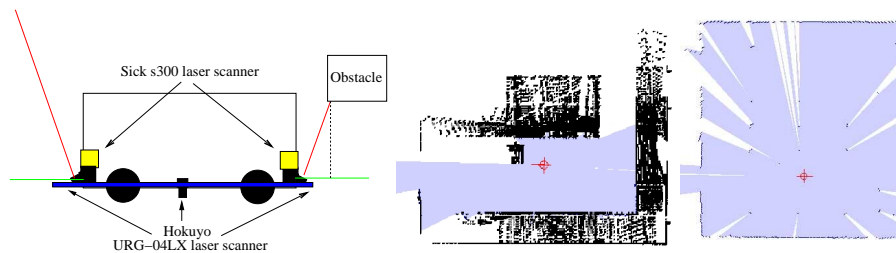


Abbildung 3. Links: Schematische Seitenansicht des LiSA-Roboters. Mitte: Simulierter 360° Laserscanner (blau) unter Berücksichtigung der Hinderniskarte (schwarz). Rechts: Simulierter 360° Laserscanner ohne Hinderniskarte.

Da sich der Navigationslaserscanner aus zwei Sicherheitssensoren der Kategorie 4 bzw. SIL3 zusammensetzt und in etwa 10 cm über dem Boden scant, ist damit eine zertifizierbare Kollisionsvermeidung des Roboters mit Menschen in dessen Umgebung gegeben. Dies ist der Fall, da Beine bzw. liegende Menschen auf jeden Fall in den Daten der Laserscanner auftauchen und der Roboter eine software-unabhängige Notstoppfunktion besitzt.

Den Navigationslaserscanner als einzigen Sensor zur Kollisionsvermeidung zu verwenden, ist jedoch unter dem Sicherheitsaspekt betrachtet zu riskant, da es für einen mobilen Roboter, der in einer dynamischen Umgebung arbeitet, nicht ausreicht, nur Hindernisse in einer Ebene zu erkennen.

Aus diesem Grund werden die vier Hokuyo-Laserscanner des LiSA-Roboters verwendet, um eine 3D-Kollisionsvermeidung zu realisieren, die die gesamte Roboteroberfläche abdeckt. Trifft ein Laserstrahl des aus den vier Hokuyo-Scannern gebildeten Trichters auf ein Hindernis, das im Kollisionsbereich des Roboters liegt (wie z.B. den Stuhl oder die Tischplatte in Abb. 4 rechts), wird dieses in die Ebene des Navigationslaserscanners projiziert (siehe Abb.3 links).

Es ist jedoch nicht ausreichend, dieses projizierte Hindernis in den Navigationslaserscanner zu übernehmen, um eine 3D-Hindernisvermeidung zu realisieren. Steht der Roboter z.B. direkt vor einem Hindernis wie einer Tischplatte, ist die Projektion der Tischplatte immer einen Wert größer Null vom Roboter entfernt, da der eingeschlossene Winkel zwischen Hokuyo-Scanner und

dem Roboter größer Null ist (siehe Abb. 3 links). Ein Lösungsansatz wäre, den Roboter ausweichen zu lassen, sobald ein Hindernis in den Hokuyodaten auftaucht. Dies würde jedoch dazu führen, dass der eingeschlossene Winkel sehr klein zu wählen ist, um in der engen Laborumgebung die gesamte Roboter-oberfläche abzudecken. Dies hätte wiederum zur Folge, dass der Roboter dementsprechend langsam fahren müsste, da Hindernisse erst spät in den Daten auftauchen.

Der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz trägt die projizierten Hindernisse in den Hokuyodaten anhand der aktuellen Roboterpose in eine Karte ein. Diese Karte besitzt durch die Bewegung des Roboters eine immer feinere Repräsentation der Hindernisse in der nahen Roboterumgebung, mit denen der Roboter kollidieren kann.

Mit Hilfe dieser Karte wird nun ein virtueller zweidimensionaler 360° *Kollisionsvermeidungslaserscanner* realisiert, indem der Navigationslaser-scanner mit der Hinderniskarte anhand der aktuellen Roboterpose kombiniert wird (Abb. 3 Mitte). Dies geschieht, indem für jeden Winkel der Abstand zu einem Hindernis in der Karte von der aktuellen Pose bestimmt wird. Der Wert des Kollisionsvermeidungslaserscanners ist jeweils das Minimum dieses Abstandes im Vergleich mit dem Wert des Navigationslaser-scanners für den entsprechenden Winkel.

Somit besitzt der Kollisionsvermeidungslaserscanner die gesamte Information über Hindernisse in allen drei Dimensionen in der Umgebung des Roboters. Der entscheidende Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Hindernisse in drei Dimensionen in einem zweidimensionalen Datensatz repräsentiert werden. Somit können klassische Ansätze zur Kollisionsvermeidung wie der *Dynamic Window Approach*, *Nearness Diagrams* oder die *Vector Field Histogram Methode*, die ursprünglich zur zweidimensionalen Hindernisvermeidung entwickelt wurden, unverändert übernommen werden und ermöglichen in Kombination mit dem Kollisionsvermeidungslaserscanner dreidimensionale Hindernisvermeidung. Das kom-

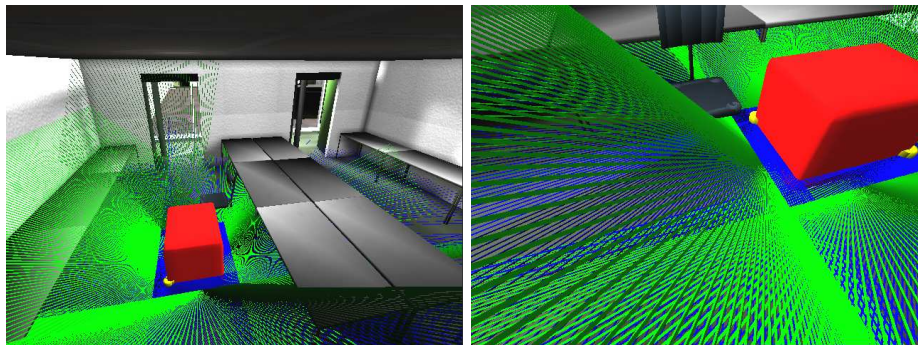


Abbildung 4. Der LiSA-Roboter in der Robotersimulationsumgebung USARSim. Links: Die Strahlen der vier Hokuyo Laserscanner (grün) bilden einen Trichter um den Roboter. Die Sick Laserscanner (blau) sind parallel zum Boden ausgerichtet. Rechts: Der Stuhl wird mit Hilfe der Hokuyo Laserscanner als Hindernis erkannt.

plette Robotersystem wird in der Roboter Simulationsumgebung USARSim [1] in Kombination mit der Roboter Steuerungssoftware Player/Stage [4] getestet. Player/Stage stellt ein Kollisionsvermeidungsmodul zur Verfügung, das nach der Vector Field Histogram Methode arbeitet. Unter Verwendung dieses Moduls in Kombination mit dem Kollisionsvermeidungslaserscanner ist der Roboter in der Lage, alle Hindernisse, mit denen der Roboter potenziell kollidieren könnte, zu erkennen und ihnen auszuweichen. Abb. 5 zeigt den LiSA-Roboter (links) und seine Sensordaten (rechts). Es ist zu sehen, dass der geplante Pfad einen Tisch im Vordergrund kreuzt. Im rechten Bild sind zusätzlich die 3D-Umgebungsdatenpunkte eingetragen, die die vier Hokuyo-Scanner aufgenommen haben und mit dem Hüllquader des Roboters kollidieren könnten. Es ist zu sehen, dass der Kollisionsvermeidungslaserscanner bündig mit den auf den Boden projizierten 3D-Umgebungsdatenpunkten abschließt. Ferner ist zu sehen, dass der virtuelle Scanner nur die Beine der Bänke im Hintergrund als Hindernisse erkennt. Dies ist der Fall, da auf den Daten der Hinderniskarte einen Alterungsprozess laufen gelassen wird, damit temporäre Hindernisse, wie sich bewegende Menschen, einen Pfad nicht dauerhaft blockieren.

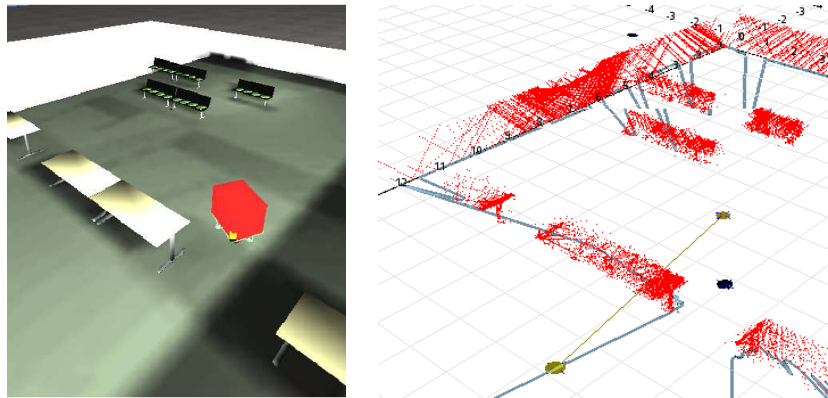


Abbildung 5. Links: Der LiSA-Roboter in der Simulationsumgebung. Rechts: Sensordaten Visualisierung in Player. Die Verbindungslinie der beiden Kreise stellt den geplanten Pfad dar. Der schwarze Kreis markiert die aktuelle Roboterposition.

6 Zusammenfassung und nächste Schritte

In diesem Papier wurde eine neue Methode vorgestellt, die 3D-Hindernisvermeidung in dynamischen Umgebungen ermöglicht. Dazu werden die 3D-Umgebungsinformationen in einem virtuellen zweidimensionalen Laserscanner repräsentiert, so dass klassische Algorithmen zur 2D-Hindernisvermeidung unverändert 3D-Hindernisvermeidung ermöglichen.

Eine Alternative zu der hier vorgestellten Sensorkonfiguration wäre, die Hokuyo-Scanner mit Hilfe eines Servomotors zu montieren, so dass der eingeschlos-

sene Winkel zwischen Roboter und Laserscanner dynamisch an die Fahrtrichtung und Geschwindigkeit angepasst werden kann. Diese Sensorkonfiguration kommt aufgrund des variablen Winkels ohne lokale Hinderniskarte aus.

Ein weiterer Schritt wäre, den ganzen Sichtbereich von 270° der vier Hokuyo-Scanner auszunutzen, da in der vorgestellten Sensorkonfiguration nur die nach oben gerichteten 180° verwendet werden. Die nicht verwendeten 45° auf jeder Seite könnten mit Hilfe einer Spiegelvorrichtung auf den vor dem Roboter liegenden Boden gerichtet werden. Dies würde dazu führen, dass selbst Hindernisse mit einer geringeren Höhe als 10 cm vom LiSA-Roboter erkannt werden.

Der Alterungsprozess der lokalen Hinderniskarte wird in Zukunft durch ein Verfahren ersetzt, das das jeweilige Raster der Karte erst wieder frei gibt, wenn es als frei gemessen wurde. Das Alterungsverfahren schließt nicht aus, dass ein Roboter, der sehr langsam an einen Tisch heranfährt, mit diesem kollidiert. Zusätzlich wird in dem neuen Verfahren bestimmt, ob ein Bereich nur temporär oder dauerhaft versperrt ist. Letzteres würde dazu führen, dass die dauerhaften Hindernisse in die globale Navigationskarte zur Pfadplanung und Lokalisierung eingetragen werden.

Danksagung Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes “Forschung für die Produktion von Morgen” (Förderkennzeichen 02PB2170 bis 02PB2177) gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT), betreut.

References

1. S. Albrecht, J. Hertzberg, K. Lingemann, A. Nüchter, J. Sprickerhof, and S. Stiene. Device Level Simulation of Kurt3D Rescue Robots. In *Proc. of SRMED*, 2006.
2. W. Burgard, A. B. Cremers, D. Fox, D. Hähnel, G. Lakemeyer, D. Schulz, W. Steiner, and S. Thrun. The museum tour-guide robot RHINO. In *Proc. of AMS*, 1998.
3. D. Fox, W. Burgard, F. Dellaert, and S. Thrun. Monte carlo localization: Efficient position estimation for mobile robots. In *Proc. of AAAI*, 1999.
4. B. Gerkey, R. Vaughen, and A. Howard. The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems. In *Proc. of ICAR*, 2003.
5. D. Holz and C. Lörken. Continuous 3d environment sensing for autonomous robot navigation and mapping. In *Proc. of the 9. Fachwissenschaftlicher Informatik-Kongress, Lecture Notes in Informatics (LNI)*, 2007.
6. E. Schulenburg, N. Elkmann, M. Fritzsche, A. Girstl, S. Stiene, and C. Teutsch. Lisa: A robot assistant for life science. In *Proc. of KI*, 2007.
7. R. Siegwart and I.R. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, 2004.
8. H. Surmann, A. Nüchter, and J. Hertzberg. An autonomous mobile robot with a 3d laser range finder for 3d exploration and digitalization of indoor environments. *J. Robotics and Autonomous Systems*, 45:181 – 198, 2003.
9. O. Wulf, K. O. Arras, H. I. Christensen, and B. A. Wagner. 2D Mapping of Cluttered Indoor Environments by Means of 3D Perception. In *Proc. of ICRA*, 2004.