



Wolfram Burgard und Cyrill Stachniss

„Gestatten, Obelix!“

160 Zentimeter groß, 100 Kilogramm schwer, vollgepackt mit modernster Sensorik: So navigiert sich ein autonomer Roboter selbst durch eine belebte Fußgängerzone. Doch Freiburger Informatiker denken sogar noch weiter.

Viele Dinge, die uns Menschen einfach erscheinen, sind für autonome Roboter komplex und schwierig: zum Beispiel zu Fuß von einem Stadtteil in einen anderen zu gelangen. Welche Probleme können dabei auftreten? Wer nicht ortskundig ist, muss auf die Hilfe anderer Personen zurückgreifen, also möglicherweise einen Passanten fragen oder einen Stadtplan bemühen. Man könnte aber auch ein Navigationssystem einsetzen, wie es in den meisten Smartphones bereits integriert ist. Für die Planung des optimalen Weges von einer Position A zu einer Zielposition B gibt es bereits hocheffiziente Algorithmen. Allerdings geht man bei diesen Verfahren oft davon aus, dass entlang des Weges keine schwierigen Wahrnehmungsprobleme auftreten und alle relevanten Dinge erkannt werden. Mobile Roboter mit ihren derzeit verfügbaren Sensoren und Wahrnehmungsalgorithmen stehen hier vor enormen Herausforderungen.

Im Alltag zeigt sich immer wieder: Wir müssen unterwegs anderen Menschen ausweichen, Straßen überqueren oder Bürgersteige finden. Gleichzeitig wollen wir weder mit dem nächsten Baum kollidieren noch irgendwelche Treppen

hinunterstürzen. Darüber hinaus sollten wir zu jedem Zeitpunkt eine genaue Vorstellung davon haben, wo wir uns gerade befinden. Roboter können sich nicht blind auf das GPS verlassen, weil dessen Ungenauigkeit durchaus den Unterschied zwischen einem Gehweg und einer stark befahrenen Straße daneben ausmachen kann. Dies sind nur einige der Probleme, die zu lösen sind, bevor ein mobiler Roboter in die weite Welt hinausgeschickt werden und dort autonom navigieren kann.

Die autonome Navigation von mobilen Robotern ist seit vielen Jahren ein wichtiges Thema in der Robotik, und in den vergangenen Jahren hat es entscheidende Fortschritte in diesem Bereich gegeben. Allerdings konzentrieren sich die meisten Ansätze auf die Navigation innerhalb von Gebäuden, auf Straßen oder das Durchqueren in unstrukturiertem Außengelände wie einem Wüstengebiet. Es gibt bislang nur wenige Systeme, die sich in stark bevölkerte städtische Umgebungen wie zum Beispiel Fußgängerzonen wagen und dort robust operieren können. Diese Umgebungen sind insbesondere wegen ihres hochkomplexen dreidimensionalen Aufbaus sowie der

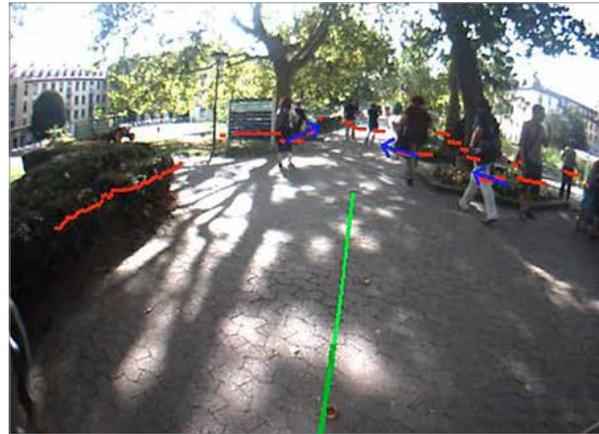
vielen sich bewegenden Objekte äußerst anspruchsvoll.

Im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Projektes namens EUROPA (European Robotic Pedestrian Assistant) haben wir die Frage untersucht, ob es möglich ist, einen Roboter zu entwickeln, der in der Lage ist, in

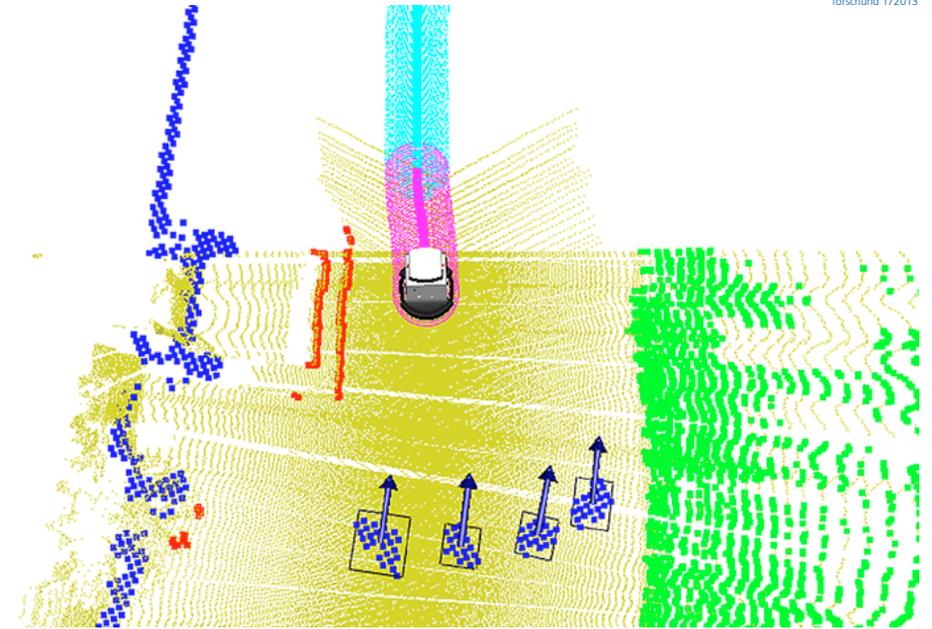
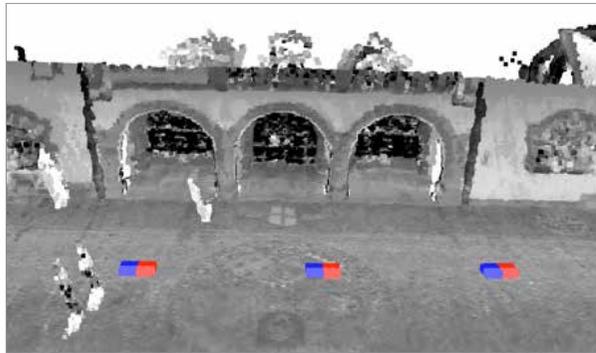
innerstädtischen Bereichen ohne fremde Hilfe zu navigieren. Als Plattform diente der in EUROPA entwickelte Roboter Obelix. Obelix ist ungefähr 1,60 Meter groß, wiegt etwa 100 Kilogramm und ist mit modernster Sensorik ausgestattet. Er verfügt über Kameras, die ihm nützliche Informationen über seine Umgebung liefern. Auch ist er mit

diversen Lasersensoren ausgestattet, mit denen der Roboter mehrmals pro Sekunde seine Umgebung nach Hindernissen abtastet. Zusätzlich verfügt Obelix über einen Lagesensor ähnlich dem menschlichen Gleichgewichtsorgan. Diese sogenannte inertielle Messeinheit kann sehr schnell Lageveränderungen oder Erschütterungen feststellen und liefert Obelix nützliche Information, zum Beispiel über Unebenheiten in der Straßenoberfläche. So kann er bei allzu heftigen Erschütterungen aus Sicherheitsgründen seine Geschwindigkeit reduzieren.

Seine eigene Bewegung steuert Obelix mithilfe von zwei getrennt angetriebenen Rädern links und rechts sowie zwei passiven Laufrädern, wie man sie von Einkaufswagen kennt, eines vorne und eines hinten. Er bewegt sich mit einer maximalen Geschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde. Somit kann er etwa 3,5 Kilometer in der Stunde zurücklegen, was nur geringfügig langsamer ist als die normale Geschwindigkeit eines Fußgängers. Außerdem kann er niedrige Stufen von bis zu drei Zentimetern Höhe überwinden. Damit vermag er abgesenkte Bordsteine zu überqueren, vor normalen Bordsteinen muss er aber derzeit noch kapitulieren. Seine Intelligenz erhält Obelix durch eine Software, deren Entwicklung den Großteil der Arbeit ausmachte. Diese baut zwar teilweise auf vorhandenen Technologien zur autonomen Navigation auf, erforderte aber vielfache Erweiterungen, um Obelix das autonome Navigieren in Innenstädten zu erlauben. So beinhaltet die neue Technologie ein akkurates



Obelix, ein Roboter auf vier Rädern, findet seinen Weg (oben). Dank modernster Sensorik nimmt er seine Umwelt wahr (unten), erkennt er Hindernisse und navigiert eigenständig.



Ein autonomer Roboter braucht eine immense künstliche Intelligenz, bis er mit der Fülle der Informationen aus hochkomplexen Situationen umgehen kann.

Kartierungssystem für städtische Umgebungen, eine Datenstruktur für den Umgang mit besonders großen Karten sowie ein Lokalisierungssystem, das eine zentimetergenaue Positionsbestimmung innerhalb dieser Karten ermöglicht. All diese Bestandteile müssen integriert werden und zusammenarbeiten, um Obelix erfolgreich zu seinem Ziel zu führen.

Besonderes Augenmerk legte das Entwicklerteam für das Steuerungssystem von Obelix auf die Überprüfung der Straßenoberfläche. Obelix erkennt verschiedene Arten von Hindernissen: statische und bewegte Objekte, auch Gras oder sogenannte negative Hindernisse wie Schlaglöcher, abwärts führende Treppen oder die in Frei-

burg sehr verbreiteten Bächle. Er kann diese Bereiche erkennen und sicher umfahren. Die Möglichkeit, bewegte Dinge zu erkennen und deren Richtung und Geschwindigkeit vorherzusagen, ermöglicht Obelix außerdem, Personen, die seinen Weg kreuzen, rechtzeitig auszuweichen.

Im August 2012 war die Entwicklung der Steuerungssoftware ausreichend weit gekommen, und wir konnten Obelix der Öffentlichkeit präsentieren. Unter den Augen zahlreicher Neugieriger und Medienbeobachter meisterte er den über drei Kilometer langen Weg von der Technischen Fakultät der Universität Freiburg in die belebte Innenstadt, bis er den Bertoldsbrunnen, eines der Wahrzeichen Freiburgs, erreichte. Das Team wollte mit die-

sem Experiment die Möglichkeiten aufzeigen, die ein solches System schon heute bietet.

Der Roboter Obelix wurde nicht vollständig in Freiburg entwickelt. An dem Projekt EUROPA waren verschiedene europäische Partner beteiligt. Unter Freiburger Leitung entwickelten gemeinsam Forscher der ETH Zürich, der Universität Oxford, der KU Leuven und der RWTH Aachen ein intelligentes Gesamtsystem. Es kann nicht nur autonom navigieren, sondern hat auch bei der Interaktion mit Benutzern oder der Interpretation von Sensordaten neue Maßstäbe gesetzt. Auch die Hardwareplattform ist eine Neuentwicklung. Sie wurde von der Firma Bluebotics speziell für den Einsatz in Fußgängerzonen entwickelt. Der durchgängig



Nach vier Kilometern am Ziel: Obelix spazierte ohne nennenswerte Ausfälle von der Technischen Fakultät bis zum Bertoldsbrunnen in der Freiburger City.

kooperative Ansatz des EUROPA-Projekts erlaubt es, Kompetenzen und Erfahrungen in verschiedenen Bereichen zu bündeln und nutzbar zu machen – von der Umgebungsmodellierung über die Bildverarbeitung und Personenerkennung bis zur Produktentwicklung selbst. Unter der Koordination von Wolfram Burgard und der technischen Leitung von Cyrill Stachniss entstand ein Navigationssystem, das sich nicht nur auf Roboter beschränkt, sondern zukünftig auch auf anderen Systemen wie beispielsweise voll autonomen Rollstühlen eingesetzt werden kann.

Natürlich hat Obelix noch einiges zu lernen und sind einige Probleme ungelöst. So ist beispielsweise sein Sensoraufbau maßgebend dafür, was er wahrnehmen kann und was nicht. Mit anderen Worten: Es gibt noch einige „tote Winkel“, in denen Obelix seine Umgebung nicht erkennen kann.

Beispielsweise können Fahrradfahrer, die in seinen Weg hineinragen unter ungünstigen Bedingungen übersehen werden. Darüber hinaus gibt es immer wieder Fälle, in denen Obelix zwar etwas erfasst, aber falsch interpretiert. So erkennt er herumliegendes Laub, das sich in der Höhe deutlich vom Boden abhebt, oder dünne Äste, die aus Hecken oder Gebüsch auf den Gehweg hinausragen, als potenzielle Hindernisse. Während wir Menschen diese einfach ignorieren und über ihnen hinweg oder durch sie hindurch laufen, weiß Obelix nicht, dass es sich um harmlose Objekte handelt. Er behandelt sie wie jedes andere reale Hindernis auch und versucht ihnen daher auszuweichen. Laub ist für ihn nicht von einem Stein vergleichbarer Größe unterscheidbar. Dass Objekte „verformbar“ sein können und als solche erkannt werden müssen, ist noch nicht Teil seiner Kompetenz. Obelix weicht somit allen Dingen

aus, die für ihn auf irgendeine Weise ein Hindernis darstellen.

Eine besondere Schwierigkeit stellt auch weiterhin das Überqueren von Straßen dar. Die Reichweite der Sensoren von Obelix ist zu begrenzt und nicht hochauflösend genug, um herannahende Fahrzeuge oder Fahrräder aus ausreichender Distanz zuverlässig zu erkennen. Auch kann er mit seiner aktuellen Software die Ampelphasen nicht zuverlässig deuten. Trotz dieser Einschränkungen ist Obelix bereits in der Lage, weite Strecken ohne menschliche Intervention zurückzulegen. Die Reaktionen von Passanten sind durchwegs positiv, und die Forscher der Universität Freiburg sind zuversichtlich, dass ihre grundlagenorientierte Forschung es in Zukunft ermöglichen wird, Obelix' Fähigkeiten im Laufe der Zeit zu erweitern und ihn schrittweise immer besser in seine Umgebung zu integrieren.



Prof. Dr. Wolfram Burgard,
Gottfried Wilhelm Leibniz-Preisträger 2009,
und

PD Dr. Cyrill Stachniss
forschen und lehren an der Albert-Ludwigs-
Universität Freiburg.

Adresse: Institut für Informatik, Arbeitsgruppe
Autonome Intelligente Systeme, Georges-
Köhler-Allee 79, 79110 Freiburg

DFG-Förderung im Rahmen
von Projekten des TRR 8/3
„Raumkognition – Schließen,
Handeln, Interagieren“.

<http://ais.informatik.uni-freiburg.de>



Albrecht Beutelspacher

Offenes Geheimnis

Verschlüsselung geht neue Wege: Die Initialzündung auf dem Weg zur „Public-Key-Kryptografie“ war der RSA-Algorithmus. Noch aber sind grundlegende mathematische Fragen zu lösen, bevor damit zum Beispiel das „elektronische Bezahlen“ möglich wird.

Seit über 2000 Jahren hat die Kryptografie das Ziel, Daten vertraulich zu übermitteln. Bis zur Mitte der 1970er-Jahre herrschte unangefochten das Paradigma der sogenannten symmetrischen Kryptografie. Deren Grundidee ist die folgende: Sender und Empfänger einer vertraulichen Mitteilung einigen sich auf ein gemeinsames Geheimnis, den sogenannten Schlüssel, auf dem die Sicherheit ihrer Kommunikation beruht. Der Sender benützt den Schlüssel zum Verschlüsseln, der Empfänger zum Entschlüsseln, und ein Angreifer hat schlechte Karten, wenn er die übermittelte Geheimbotschaft ohne Kenntnis des Schlüssels knacken möchte.

Solche Verfahren hatten sich konkurrenzlos durchgesetzt, und man hatte sich an die mit ihnen einhergehenden prinzipiellen Schwierigkeit gewöhnt: Vor jeder vertraulichen Kommunikation muss man nämlich schon ein Geheimnis ausgetauscht haben. Dies ist insbesondere dann aufwendig, wenn viele gleichberechtigte Partner miteinander kommunizieren wollen.

Es war eine ausgesprochene Sensation, als 1976 Whitfield Diffie und Martin Hellman etwas anderes zu denken wagten. Ihre Vision: Um jemandem eine vertrauliche Nachricht zu schicken, sollte man kein Geheimnis brauchen. Natürlich benötigt der Empfänger zum Entschlüsseln einen geheimen Schlüssel, denn sonst hätte er keinen entscheidenden Vorteil gegenüber einem Angreifer. Also: Ver-

schlüsseln ohne spezielles Geheimnis, Entschlüsseln mit dem einzigartigen privaten Geheimnis.

Eine gute Veranschaulichung und gleichzeitig ein Indiz dafür, dass die Vision auch Realität werden könnte, sehen wir im Postdienst: Um jemandem eine vertrauliche Nachricht zukommen zu lassen, wird der entsprechende Brief in einen Umschlag gesteckt und dann der Briefkasten mit dem Namen der Empfängerin gesucht. Das Einwerfen des Briefes entspricht dem Anwenden des öffentlichen Schlüssels. Anschließend hat niemand mehr Zugriff auf den

Brief – außer der legitimen Person, die den Briefkasten mit ihrem privaten Schlüssel öffnen kann.

Zurück zu den Anfängen. Zwei Jahre später, im Jahr 1978, veröffentlichten Ron Rivest, Adi Shamir und Len Adleman den nach ihnen benannten RSA-Algorithmus, den ersten Algorithmus mittels Public Key (PK). Damit war PK-Kryptografie Realität geworden. Das mathematische Verfahren, auf dem der RSA-Algorithmus und fast alle anderen PK-Algorithmen beruhen, ist die „modulare Exponentiation“.

Verschlüsseln ohne Geheimnis: Das Grundprinzip macht sich hoch erfolgreich der öffentliche Postdienst zunutze.

