

Feldstudie zur Navigation autonomer mobiler Roboter an belebten öffentlichen Orten

Jens HEGENBERG, Ludger SCHMIDT

*Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik, Universität Kassel,
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel*

Kurzfassung: Autonome mobile Roboter fahren zunehmend im öffentlichen Raum. Mögliche Konflikte zwischen der Fahrroute des Roboters und den Laufwegen der Passanten müssen so aufgelöst werden, dass die Passanten sich nicht gestört oder gefährdet fühlen und der Roboter dennoch effizient sein Ziel erreicht. Dazu wird eine Studie präsentiert, die nonverbale Kommunikation von Bewegungsabsichten mittels Blicken bzw. Kopfbewegungen im Feld erprobt. Bestehende Erkenntnisse aus künstlichen Szenarien und Laborstudien sowie zum menschlichen Verhalten werden im halböffentlichen Raum eines Einkaufszentrums einer Felderprobung unterzogen sowie vorläufige Ergebnisse präsentiert.

Schlüsselwörter: Mensch-Roboter-Interaktion, autonome mobile Roboter, Ausweichen, Kollisionsvermeidung, Feldstudie

1. Einleitung

Autonome mobile Roboter werden zunehmend im (halb-)öffentlichen Raum eingesetzt, wobei das Spektrum der Anwendungsfälle von Lieferrobotern auf öffentlichen Straßen, über Auskunft- und Handgepäcktransportroboter an Flughäfen bis hin zu Servierrobotern in Restaurants reicht. Dort, wo Menschen und Roboter sich Bewegungsräume teilen, kommt es unweigerlich zu Konfliktsituationen bei Begegnungen. Diese sind gegenüber Begegnungen zwischen Menschen potenziell kritischer, da die Bewegungsabläufe des Roboters aufgrund des fehlenden menschlichen Referenzsystems schwieriger einschätzbar sind. Dies betrifft einerseits die Einschätzung der Bewegungsfähigkeiten, bspw. der Länge des Bremswegs oder der Rotationsgeschwindigkeit, und andererseits die Einschätzung dessen, was vom Roboter als Hindernis wahrgenommen werden kann. Ein Mensch, der sich auf Kollisionskurs mit einem Roboter befindet, hat also keine Anhaltspunkte dazu, ob der Roboter ihn sensorisch erfasst hat, und kann somit nicht sicher präzisieren, ob und wie sich die Fahrroute des Roboters fortsetzen wird, um basierend darauf über die Anpassung der eigenen Laufwege zu entscheiden. Daher sollen die Roboterbewegungen für den Menschen lesbar und vorhersehbar gestaltet werden (Dragan et al. 2013), wozu insbesondere non-verbale Kommunikation zu nutzen ist (Avelino et al. 2021).

Begegnungssituationen zwischen Mensch und Roboter werden zumeist virtuell (Nummenmaa et al. 2009) oder in Laborstudien betrachtet (Fiore et al. 2013; Hart et al. 2020; Unhelkar et al. 2015). Üblicherweise werden dabei 1-zu-1-Begegnungen frontal oder in definierten Winkeln nachgestellt und unterschiedliche Gestaltungsvarianten zur Auflösung dieser Konfliktsituationen erprobt. Offen bleibt häufig, wie sich

diese Laborergebnisse ins Feld übertragen lassen. Im Feld sind die Wahrnehmungskanäle der Passanten deutlich stärker beansprucht als in einem Versuchsaufbau im Labor. Ob und wann der Roboter vom Menschen überhaupt wahrgenommen wird, wird nicht betrachtet. Den Probanden ist in der Regel bekannt, dass sie mit einem Roboter zusammentreffen werden, sodass auch das Überraschungsmoment in der Regel keine Rolle spielt. Aufgrund ihrer zumeist geringen Höhe können Roboter durch andere Menschen verdeckt werden und deshalb bzw. auch generell erst spät wahrgenommen werden. Auch die statische Haltung eines fahrenden Roboters ohne schwingende Arme oder voranschreitende Beine etc. verringert die Wahrscheinlichkeit frühzeitig oder im peripheren Sichtfeld wahrgenommen zu werden.

2. Lösungsansatz

Eingesetzt wird der Roboter TIAGo++ des Herstellers Pal Robotics. Dieser ist mit zwei Armen, einem schwenk- und neigbaren Kopf sowie einem Touchscreen vor der Brust ausgestattet (siehe Abbildung 1). Die Mobilität erfolgt mittels Radantrieb. Ein Hubmechanismus ermöglicht die Variation der Roboterhöhe zwischen 1,1 m und 1,45 m. Während der Fahrt ist aus Stabilitätsgründen eine Höhe im unteren Bereich dieses Intervalls zu wählen, sodass die Höhe ungefähr derjenigen eines 8- bis 12-jährigen Kindes entspricht. Der Roboter bewegt sich im Rahmen der Studie autonom im halböffentlichen Raum eines Einkaufszentrums, wobei die non-verbale Kommunikation der geplanten Fahrtroute durch Blick- bzw. Kopfbewegung erfolgt.

Menschen richten ihren Blick bei Richtungswechseln in die beabsichtigte Bewegungsrichtung, zuerst mit den Augen und dann mit dem Kopf (Hollands et al. 2002). Dieses Blickverhalten wird bei Begegnungen mit anderen Menschen intuitiv genutzt, um Konflikte zu vermeiden, und sollte daher bei der Gestaltung von Begegnungen mit Robotern ebenfalls berücksichtigt werden (Hart et al. 2020; Nummenmaa et al. 2009). Wenn ein Roboter, wie der hier eingesetzte, nicht über bewegliche Augen verfügt, ist die Darstellung der Bewegungsabsicht ausschließlich mittels der Kopfbewegung eine adäquate Alternative (Hart et al. 2020; Unhelkar et al. 2015).

Weiterhin nutzt der Mensch den Augenkontakt, um sich zu vergewissern, vom Gegenüber wahrgenommen worden zu sein. Wird kein Augenkontakt hergestellt, weil das Gegenüber sich bspw. auf sein Smartphone fokussiert, kann davon ausgegangen werden, (noch) nicht wahrgenommen worden zu sein und bei einem drohenden Konflikt entsprechend frühzeitig reagieren zu müssen. Dieser Aspekt der Kommunikation durch Blicke wird hier nicht umgesetzt. Erstens würde dies die Kommunikation der geplanten Bewegungsrichtung erschweren (Khambhaita et al. 2016) und zweitens würde dieser direkte Blickkontakt mit einem menschenähnlichen Roboter erfahrungsgemäß mehr Aufmerksamkeit auf den Roboter lenken und vermehrt zu ungewollten aktiven Interaktionen der Passanten mit dem Roboter führen.

Während der autonomen Fahrt wird der Kopf fortlaufend so ausgerichtet, dass ein Punkt in 0,5-2 m Entfernung auf dem Boden vor dem Roboter anvisiert wird. Die Entfernung des Punktes wird in Abhängigkeit von der aktuellen Geschwindigkeit des Roboters ermittelt und entspricht ungefähr einem zeitlichen Vorhalt von knapp 4 s, wie von Khambhaita et al. (2016) vorgeschlagen. Der Punkt liegt auf der vom Navigationsalgorithmus auf Basis von zuvor generierten Karten und aktuellen Sensordaten ermit-

telten Fahrroute. In der Kontrollbedingung schaut der Roboter geradeaus auf den Boden vor sich und bewegt den Kopf nie, analog zur Nichtwahrnehmung des Gegenübers bei der Smartphone-Nutzung.



Abbildung 1: Links: TIAGo++ mit oberhalb des Kopfes montierter 360°-Kamera im Labor; Mitte: TIAGo++ im Einkaufszentrum; Rechts: Vergleich der Frontansicht mit gesenktem und nach vorne gerichtetem Kopf

3. Methodik

Die Datenerhebung wurde in einem Einkaufszentrum an zwei Wochentagen im Oktober 2023 zwischen ca. 10 und 15 Uhr bzw. 12 und 17 Uhr durchgeführt. Das Einkaufszentrum lässt sich abstrakt als ein 300 m langer u-förmiger Gang beschreiben, der links und rechts von Geschäften gesäumt wird (siehe Abbildung 2). Der Versuch fand auf einem der beiden Schenkel des u-förmigen Ganges statt, wo der Roboter auf einer Strecke von 90 m entgegen der üblichen Laufrichtung, also im Linksverkehr, im Kreis fuhr. Eine aus Sicherheitsgründen begleitende Person hielt sich in möglichst großem Abstand zum Roboter auf und setzte notwendige Steuerkommandos diskret über ein Mobiltelefon ab. Regelmäßig auftretende Blockaden des Roboters durch Passanten wurden durch aus der Ferne aktivierte Sprachausgaben aufgelöst, die mit zunehmender Intensität um die Freigabe des Weges baten. Durch diese diskrete Überwachung des Roboters wurde sichergestellt, dass er weitestgehend unbegleitet erschien. Die Gestaltung und Evaluation der Sprachinteraktion wird hier aus Platzgründen ausgeklammert.



Abbildung 2: Links: Vom Roboter aufgezeichneter Grundriss des u-förmigen Ganges des Einkaufszentrums; Rechts: Der vom Roboter befahrene Gang, weiße Flächen sind vom Roboter befahrbar, schwarze Punkte stellen vom Roboter gemessene Hindernisse dar und graue Flächen konnten nicht gemessen werden.

Die Geschwindigkeit des Roboters wurde auf maximal 0,6 m/s begrenzt, was ungefähr der Geschwindigkeit einer älteren Person mit Gehhilfe entspricht. Somit ist der Roboter langsamer als die Personen in seiner Umgebung, die sich ungefähr mit 1 m/s bis 1,35 m/s fortbewegen (Molnár 1996). Dadurch wird das Sicherheitsgefühl der Passanten nicht beeinträchtigt. In kritischen Situationen verringert sich zudem der Bremsweg, sodass der Begleitperson mehr Zeit zum Reagieren bleibt.

Die unabhängige Variable ist hier die Gestaltung des Blickverhaltens des Roboters, also geradeaus auf den Boden oder in Fahrtrichtung auf den Boden. Die abhängigen Variablen sind die Aufmerksamkeit, die dem Roboter zuteilwird, die Wahrnehmung des Roboters durch Passanten sowie die Effizienz der Roboterfahrt. Die Wahrnehmung des Roboters wird als die Anzahl der Passanten, die den Roboter mit dem Blick fixiert haben, und die Aufmerksamkeit als Anzahl der aktiven Interaktionsversuche durch Passanten, jeweils bezogen auf die Gesamtanzahl der Menschen, die den Roboter frontal passiert haben, operationalisiert. Zur Ermittlung der Blickzuwendung und Interaktionsversuche werden aus Roboterperspektive 360°-Videoaufnahmen der Umgebung erstellt. Die Effizienz der Roboterfahrt soll in dieser Studie auf einzelne Begegnungen heruntergebrochen werden. Eine Auswertung nach Gesamtstrecke pro Zeit würde aufgrund der zahlreichen Umgebungseinflüsse, Tageszeit, Wetter, Rabattaktionen etc., sehr lange Zeiträume für die Datenaufnahme erfordern. Zudem lässt sich die Betrachtung einzelner Begegnungen besser diagnostizieren und in den Kontext der Erkenntnisse aus Laborstudien stellen.

In Laborstudien werden zumeist Korridore mit rechteckigem Grundriss betrachtet, die mit Messtechnik zur Positionserfassung von Mensch und Roboter ausgestattet sind. Im Feld findet die Begegnung frei in der Fläche statt. Der betrachtete Gang ist mindestens 9 m breit und wird nur in Teilbereichen durch statische Aufbauten, Bänke etc. in der Gangmitte verengt. Zur Erfassung der relativen Positionen werden die Entfernungsmessungen des Laserscanners des Roboters herangezogen, die Hindernisse in einer Ebene parallel zum Boden in einer Höhe von ca. 30 cm mit einem frontalen Öffnungswinkel von 190° und in einer Entfernung von bis zu 25 m erfassen. Diese Daten werden zur Selbstlokalisierung des Roboters anhand einer zuvor aufgenommenen Karte und zur Detektion der Beine der Passanten verwendet. Als Begegnung sollen alle Situationen betrachtet werden, in denen sich ein Mensch in einem Abstand von 12 Metern frontal auf Kollisionskurs mit dem Roboter befindet. Dazu wird ein 12 m x 2 m-großer Betrachtungskorridor über die Daten gelegt und die Positionen von Mensch und Roboter innerhalb dieses Korridors in ein normiertes 2-D-Koordinatensystem mit initialen Positionen $P_{\text{Roboter}} = (0;0)$ und $P_{\text{Mensch}} = (12;0)$ transformiert. Diese Normierung der Daten sorgt für die Vergleichbarkeit der Begegnungssituationen untereinander und ermöglicht zusätzlich den Vergleich mit ähnlich kodierten Daten aus

der Literatur, die oft in (Labor-)Gängen mit rechteckigem Grundriss und ähnlichen Dimensionen aufgezeichnet wurden.

Der Zeitpunkt des Ausweichens wird in der Literatur anhand des Winkels zwischen Bewegungsvektor und x-Achse festgelegt (Jia et al. 2019). Beim Start der Ausweichbewegung wird dieser Winkel größer, erreicht ein Maximum und beginnt wieder zu fallen, wenn der Mensch auf seine ursprüngliche Bewegungsrichtung zurückkehrt. Auch die seitliche Abweichung (y-Koordinate) kann zur Beschreibung des Ausweichvorgangs herangezogen werden. Anhand der Videoaufnahmen wird zudem beurteilt, ob der Roboter oder andere Faktoren, bspw. das Betreten eines Geschäfts, zum Ausweichen geführt haben.

4. Auswertungsansatz und erste Ergebnisse

Insgesamt wurden vier Stunden Videomaterial und Entfernungsmessdaten aufgezeichnet. Die vorläufigen Ergebnisse der Videoauswertung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Nicht gewertet wurden Personen, die auf Bänken sitzen, den Roboter von hinten überholen oder hinter Hindernissen bzw. auf der anderen Gangseite laufen. Personen, die dem Roboter wiederholt begegnen, werden nur bei der ersten Begegnung gewertet. Als Interaktion wird jede aktive Kontaktaufnahme, bspw. Winken, Ansprechen oder die absichtliche Blockade der Fahrroute, gewertet. Eine genauere Klassifikation angelehnt an Babel et al. 2022 ist in Arbeit.

Tabelle 1: Videobasierte Ergebnisse für die Anzahl gewerteter Passanten insgesamt, für die Anzahlen der Passanten, die den Roboter anschauten, die eine Interaktion mit dem Roboter begannen und die zur Kollisionsvermeidung dem Roboter auswichen.

	Gesamt	Gesenkter Blick	Richtungsweisender Blick
Gesamtanzahl gewerteter Passanten	2075	1151	924
Blickkontakt zum Roboter	1811	1003	808
Interaktion mit dem Roboter	404	176	228
Ausweichvorgänge	374	206	168

Die Auswertung der Begegnungen ist noch fortlaufend. In Abbildung 3 ist ein exemplarischer Auswertungsvorgang dargestellt, der für die 374 videobasiert identifizierten Konfliktsituationen durchgeführt werden muss. Der weiß umrandete Betrachtungskorridor wird in einer Begegnungssituation so über die Karte gelegt, dass links in der Mitte der Roboter und rechts in der Mitte der Mensch positioniert ist. Dann wird die Aufzeichnung gestartet und der zeitliche Verlauf der Positionen ermittelt. Das Ergebnis sind die im Plot dargestellten Daten, mit deren Hilfe Begegnungen verglichen sowie der relative Abstand bei Auflösung des Konflikts durch Ausweichen ermitteln werden kann.

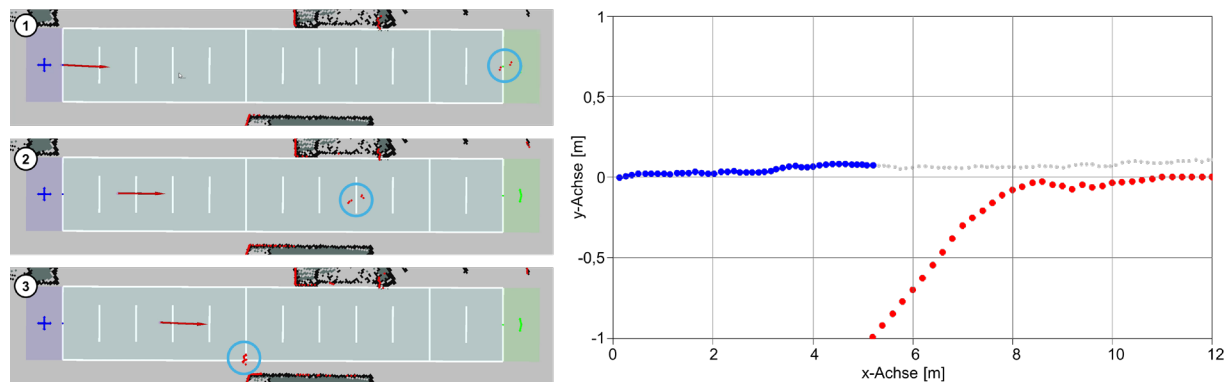


Abbildung 3: Links: Drei Zeitpunkte eines Ausweichvorgangs im Visualisierungstool RVIZ mit 12-m-langem Betrachtungskorridor (weiß umrandet, grün und blaue Schaltflächen), aufgezeichneter Karte (grau/schwarz), aktuellen Entfernungsmessungen (rot), aktueller Roboterpose (Kreis mit rotem Pfeil) und Personenpositionen (blauer Kreis); Rechts: Normierter Plot der Routen des Menschen (rot) und des Roboters bis zu der Stelle, an der der Mensch den Korridor verlässt (blau), und darüber hinaus (grau).

5. Literatur

- Avelino J, Garcia-Marques L, Ventura R, Bernardino A (2021) Break the Ice: a Survey on Socially Aware Engagement for Human-Robot First Encounters. *Int J Social Robotics* 13 (8): 1851–1877
- Babel F, Kraus J, Baumann M (2022) Findings From A Qualitative Field Study with An Autonomous Robot in Public: Exploration of User Reactions and Conflicts. *Int J Social Robotics* 14 (7): 1625–1655
- Dragan AD, Lee KC, Srinivasa SS (2013) Legibility and Predictability of Robot Motion. In: *Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. IEEE Press, 301–308
- Fiore SM, Wiltshire TJ, Lobato EJC, Jentsch FG, Huang WH, Axelrod B (2013) Toward understanding social cues and signals in human–robot interaction: effects of robot gaze and proxemic behavior. *Frontiers in psychology* 4 (859): 1-15
- Hart J, Mirsky R, Xiao X, Tejeda S, Mahajan B, Goo J, Baldauf K, Owen S, Stone P (2020) Using Human-Inspired Signals to Disambiguate Navigational Intentions. In: Wagner AR, Feil-Seifer D, Haring KS, Rossi S, Williams T, He H, Ge SS (Ed) *Proceeding on the 12th International Conference on Social Robotics*. Cham: Springer, 320-331
- Hollands MA, Patla AE, Vickers JN (2002) “Look where you’re going!”: Gaze behaviour associated with maintaining and changing the direction of locomotion. *Experimental Brain Research* 143, 221-230
- Jia X, Feliciani C, Yanagisawa D, Nishinari K (2019) Experimental study on the evading behavior of individual pedestrians when confronting with an obstacle in a corridor. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 531 (121735), 1-17
- Khambhaita H, Ríos-Martínez J, Alami R (2016) Head-Body Motion Coordination for Human Aware Robot Navigation. In: Ajoudani A (Ed) *9th International Workshop on Human Friendly Robotics*. HAL, 1-8 (hal-01568838)
- Molnár P (1996) *Modellierung und Simulation der Dynamik von Fußgängerströmen*. Aachen: Shaker
- Nummenmaa L, Hyönä J, Hietanen JK (2009) I’ll walk this way: eyes reveal the direction of locomotion and make passersby look and go the other way. *Psychological science* 20 (12), 1454-1458
- Unhelkar VV, Perez-D’Arpino C, Stirling L, Shah JA (2015) Human-robot co-navigation using anticipatory indicators of human walking motion. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE, 6183–6190



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration
und ihre Auswirkung auf Mensch,
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

GfA-Press

Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

office@internetkundenservice.de, www.internetkundenservice.de