Ein Fahrassistent für ältere und behinderte Menschen

Thomas Röfer, Axel Lankenau

Bremer Institut für Sichere Systeme, TZI, FB3,
Universität Bremen, Postfach 330440, D–28334 Bremen
roefer@tzi.de, alone@tzi.de

Zusammenfassung Dieser Beitrag beschreibt die Komponenten eines Fahrassistenten für behinderte und ältere Menschen, der auf einen kommerziell erhältlichen Rollstuhl aufsetzt. Dabei wird sowohl auf die schnelle sensorische Erfassung der Umgebung für eine sichere Kollisionsvermeidung als auch auf automatisches Ausweichen eingegangen, wobei die speziellen Aspekte des „Shared-Control" hervorgehoben werden, also der Tatsache, dass sich auf dem Rollstuhl ein Mensch befindet, der nach wie vor die volle Kontrolle über das System zu haben wünscht und bei seinen Aktionen lediglich unterstützt, aber nicht beherrscht werden soll.

1 Einleitung

Im Projekt *Bremer Autonomer Rollstuhl* werden Techniken entwickelt, die ältere und behinderte Personen bei der Benutzung von Rollstühlen unterstützen sollen. Die Bandbreite solcher Hilfen reicht von einfachen Mechanismen zur Kollisionsvermeidung bis zum vollautomatischen Fahren über längere Distanzen (vgl. z.B. Musto *et al.*, 1999). Im Folgenden sollen die Fähigkeiten des sog. Fahrassistenten vorgestellt werden, einer Anwendung, die den Benutzer des Rollstuhls *Rolland* (vgl. Abb. 1a) von den Aufgaben Kollisionsvermeidung, Geschwindigkeitsanpassung und exaktem Ausweichen befreit, ihm aber ansonsten die volle Kontrolle über das Fahrzeug erhält. Rolland basiert auf einem *Meyra Genius 1.522*, d.h. auf einem Rollstuhl mit PKW-artiger Kinematik, wobei sich die Lenkachse allerdings hinten befindet. Der Benutzer steuert das System mit einem Joystick. Der Rollstuhl ist mit einem Standard-PC (Pentium 233, 64 MB RAM) und Sensoren ausgestattet, um seine Umgebung wahrzunehmen.

2 Ultraschallsensoren

Neben Laserscannern sind Ultraschallsensoren die verbreitetste Methode für die Entfernungsmessung in der mobilen Robotik. Sie sind wesentlich preiswerter und kleiner als Laserscanner, weshalb sie in größerer Anzahl auf einem mobilen Roboter eingesetzt werden können, wohingegen Experimentalroboter nur selten mit mehr als einem oder zwei Laserscannern ausgestattet werden, wie man z.B. bei Gutmann *et al.* (1998), Edlinger und Weiß (1995) und Kirchner (1997) sieht.

Da ein Rollstuhl eine längliche Form hat, wären viele Lasersensoren notwendig, damit das Gerät seine gesamte Umgebung wahrnehmen kann. Deshalb wurde Rolland mit 27 Polaroid-Sonarsensoren ausgestattet, die um den Rollstuhl in einer Höhe von 50 cm befestigt sind.

Sonarsensoren messen Entfernungen durch das Aussenden eines Ultraschallimpulses (Borenstein *et al.*, 1996). Dieser Puls wird von den Gegenständen in der Umgebung zurück zum Sensor reflektiert. Daher kann der Sensor die Flugzeit des Sonarimpulses bis zur ersten zurückkehrenden Reflektion messen. Aus diesem Zeitraum kann die Entfernung zum nächsten Objekt bestimmt werden. Ausgehend vom Sensor breitet sich der Impuls entlang eines Kegels aus, der durch den *Öffnungswinkel* des Sensors bestimmt wird. Daher haben Ultraschallsensoren eine hohe Entfernungsauflösung, aber eine geringe Richtungsauflösung, da sie nur eine einzige Distanz innerhalb ihres Öffnungskegels messen können. Dadurch sinkt die Ortsauflösung des Sensors je weiter Hindernisse entfernt sind.

Zusätzlich zu dieser geringen Genauigkeit gibt es mehrere Gründe für mögliche Fehlmessungen:

2.1 Spiegelreflektionen

Es ist möglich, dass ein Gegenstand nicht genug Energie in Richtung des Sensors reflektiert, um von diesem bemerkt zu werden. Dieses ist entweder der Fall, wenn ein Gegenstand sehr klein ist oder wenn der Ultraschallimpuls eine Oberfläche unter einem sehr flachen Winkel trifft. Dadurch sind die Entfernungen, die gemessen werden, zu groß, d.h. Hindernisse werden übersehen. Um das Risiko des Übersehens von Objekten durch das Messen unter ungünstigen Winkeln zu reduzieren, sind die Ultraschallsensoren bei Rolland an der Vorder- und Rückseite kreisförmig angeordnet. Daher ist mindestens immer ein Sensor in einem fast senkrechten Winkel zu potenziellen Hindernissen orientiert.

2.2 Cross-Talks

In den meisten Sonar-Entfernungsmesssystemen kann ein Sensor nicht entscheiden, ob der Impuls, den er auffängt, von ihm selbst oder von einen anderen Sensor ausgesandt wurde. Außerdem ist es sogar möglich, dass ein Impuls einer früheren Messung den Sensor erreicht. In beiden Fällen sind die gemessenen Entfernungen zu klein, weil der störende Impuls früher zum Sensor gelangt als der von ihm ausgesandte. Um solche sog. *Cross-Talks* zu reduzieren, werden nur wenige Sensoren gleichzeitig gefeuert, und deren Messrichtung sollte so unterschiedlich wie möglich sein. Einige Sonar-Messsysteme wurden sogar so entworfen, dass sie nur mit wenigen Sensoren gleichzeitig Messungen vornehmen können, z.B. kann das Nomadic *Sensus 100* System, so wie es bei Rolland verwendet wird, nur zwei Sensoren zur gleichen Zeit feuern, einen links und einen rechts. Deshalb werden die Ultraschallmessungen nacheinander in einer bestimmten Reihenfolge, der sog. *Feuerstrategie* durchgeführt. Um Cross-Talks auch über mehrere Messzyklen hinweg zu minimieren, sollten sich auch die Orientierungen der Sensoren, die

a) b)

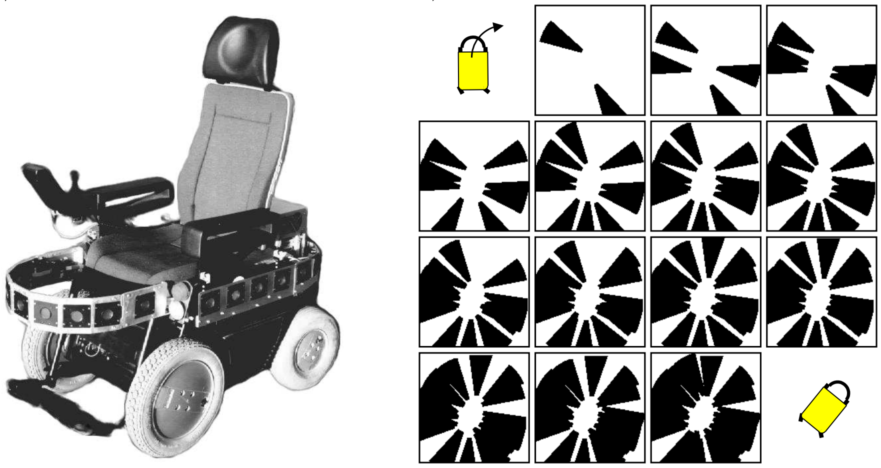

Abb. 1. a) Der Bremer Autonome Rollstuhl *Rolland*. b) Eine statische Ultraschall-Feuerstrategie. Die schwarze Farbe kennzeichnet die Gebiete, die von den Sonarsensoren während eines vollständigen Durchlaufes von 14 Messzyklen erfasst werden, während der Rollstuhl eine enge Rechtskurve fährt.

nacheinander gefeuert werden, möglichst stark voneinander unterscheiden. Daher aktivieren typische Feuerstrategien die Sensoren in einer pseudo-zufälligen, alternierenden Reihenfolge.

Abbildung 1b stellt eine solche Feuerstrategie sowie ein potenzielles Problem dieses Ansatzes dar. Der Rollstuhl ist mit 27 Ultraschallsensoren ausgestattet, von denen er jeweils zwei gleichzeitig feuern kann. Die Sensoren sind so angeordnet, dass sich der Rollstuhl im Stand innerhalb von 14 Messzyklen ein vollständiges Bild seiner Umgebung machen kann. Dies gilt allerdings nicht mehr, sobald er sich bewegt. Falls er z.B. eine enge Rechtskurve fährt, wie dies in Abb. 1b dargestellt ist, kann er seine Umgebung nur unvollständig vermessen, weil sich die Aufnahmepositionen der Messwerte durch die Bewegung des Rollstuhls kontinuierlich verschieben. Daher besteht das Risiko, Hindernisse durch die Verwendung solch statischer Feuerstrategien zu übersehen; nicht nur für den Bremen Autonomen Rollstuhl, sondern auch für andere mobile Roboter mit Sonarsensoren, z.B. dem *Nomad 200*, der von Nomadic hergestellt wird (z.B. benutzt von Owen und Nehmzow, 1997), oder RWI's *B21* (z.B. benutzt von Burgard *et al.*, 1997). In Abschnitt 4 wird eine dynamische Feuerstrategie präsentiert, die dieses Problem löst.

Um die Auswirkungen von Crosstalks auf das Verhalten des Rollstuhls zu reduzieren, werden Hindernisse erst berücksichtigt, wenn sie mindestens zweimal gemessen wurden. Die dynamische Feuerstrategie, die in Abschnitt 4 beschrieben wird, stellt sicher, dass die zweifache Erfassung eines Hindernisses den Erkennungsprozess nicht wesentlich verlangsamt.

2.3 Blindheit im Nahbereich

Da die meisten Ultraschallsensoren nur eine Membrane haben, mit der sie den Sonarimpuls sowohl erzeugen als auch wieder auffangen, benötigen sie einen gewissen Zeitraum nach dem Senden, um wieder in den Ruhezustand zurückzukehren, sodass die Vibration, die durch die Rückkehr des Impulses ausgelöst wird, auch registriert werden kann. Während dieses Zeitraumes werden keine eingehenden Ultraschallsignale erfasst, woraus eine Blindheit für Objekte resultiert, die sich sehr nah an dem Sensor befinden, z.B. können die Sensoren des Bremer Autonomen Rollstuhls keine Entfernungen von weniger als 15 cm messen.

3 Rechtzeitiges Anhalten

Eine der wichtigsten Aufgaben des Bremen Autonomen Rollstuhls besteht darin, Kollisionen zu vermeiden. Auf der untersten Stufe, der Sicherheitsschicht, bedeutet dies, dass er *rechtzeitig* anhält, bevor ein Zusammenstoss geschehen kann. Auf höheren Stufen (vgl. Abschnitt 5) kann dieses Ziel auch durch Umfahren von Hindernissen erreicht werden. Die Entscheidung, ob es notwendig ist, den Rollstuhl abzubremsen, wird auf der Basis der aktuellen Geschwindigkeit, der negativen Beschleunigung des Rollstuhls beim Bremsen (Verzögerung), seiner Reaktionszeit und der *Fahrtstrecke* zum nächsten Hindernis gefällt. Letzteres ist die Entfernung, die der Rollstuhl bei seiner aktuellen Fahrtrichtung und seinem aktuellen Lenkwinkel zurücklegen kann, bevor er mit dem ersten Hindernis kollidiert.

Während es einfach ist, den Anhalteweg für eine bestimmte Geschwindigkeit zu berechnen, kann die Fahrtstrecke zum dichtesten Hindernis nicht unmittelbar ermittelt werden. Die Bewegung des Rollstuhls ist nicht-holonom und sein Körper hat eine relativ komplizierte Form. Außerdem geben die Sensoren kein vollständiges Bild der Umgebung, sondern liefern ihre Messungen nacheinander über einen längeren Zeitraum hinweg (ungefähr 0.5 s für einen kompletten Durchgang), während sich der Rollstuhl bewegt. Deshalb wurde das Problem des Berechnens der Fahrtstrecke zum nächsten Hindernis in zwei Teilprobleme zerlegt: Den Aufbau einer *lokalen Hinderniskarte* und die Bestimmung der Entfernung zum dichtesten Hindernis mit Hilfe von *virtuellen Sensoren* (Röfer und Lankenau, 1998):

3.1 Lokale Hinderniskarte

Die lokale Hinderniskarte (Elfes, 1991) ist eine quadratische Anordnung von Zellen, von denen jede – unter anderem (vgl. Abschnitt 4) - das Vorhandensein eines Hindernisses an der entsprechenden Position in der Umgebung des Rollstuhls repräsentiert (vgl. Abb. 2a). Synchron zu den Bewegungen des Rollstuhls werden die Einträge in der Karte verschoben, jedoch nicht rotiert. Die Karte besteht aus 134×134 Zellen, die jeweils eine Fläche von 3×3 cm^2 repräsentieren, d.h. sie hat eine Größe von etwa 4×4 m^2.

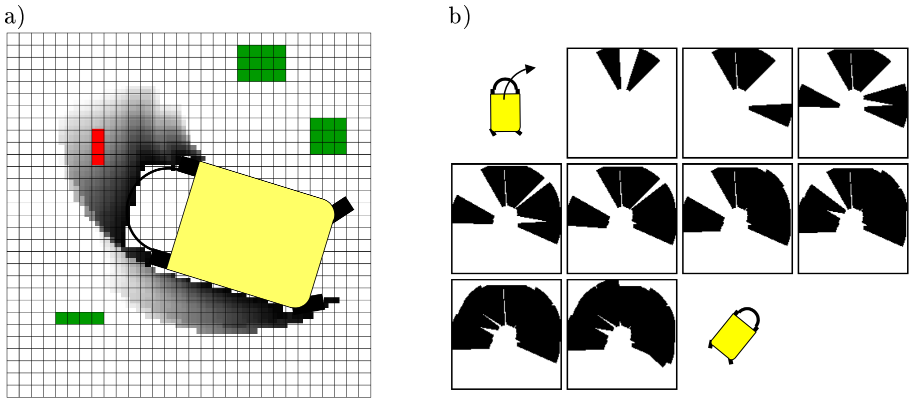

Abb. 2. a) Die lokale Hinderniskarte und ein virtueller Sensor. Je dunkler die Zellen, desto kürzer die Fahrtstrecke bis zur Kollision. b) Die adaptive Ultraschall-Feuerstrategie.

3.2 Virtuelle Sensoren

Die Bestimmung der Entfernung zum dichtesten Hindernis basiert auf der Annahme, dass bereits alle relevanten Objekte in der Karte erfasst wurden. Um zu entscheiden, ob der Rollstuhl mit einem Hindernis kollidieren könnte, muss seine aktuelle Bewegung in die Zukunft projiziert werden, d.h. ermittelt werden, wann der Rollstuhl welche Zelle erreichen wird. Wegen der nicht-holonomen Bewegung ist dies keine triviale Aufgabe. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, die versuchen, den Berechnungsaufwand durch Vereinfachen der Region, die nach Hindernissen durchsucht werden muss, zu reduzieren (vgl. Furtwängler *et al.*, 1998), benutzt der Bremer Autonome Rollstuhl eine genaue Methode: die virtuellen Sensoren (vgl. Abb. 2a). Für jede Kombination aus Fahrtrichtung, Lenkeinschlag und Verdrehung gegenüber der Karte existieren vorausberechnete Regionen, die nach Hindernissen durchsucht werden. Die virtuellen Sensoren sind so organisiert, dass das dichteste Hindernis zuerst gefunden wird und gleichzeitig die Strecke bekannt ist, die der Rollstuhl zurücklegen muss, bis er mit dem Hindernis kollidiert. Diese Distanz kann direkt mit dem aktuell zu erwartenden Anhalteweg verglichen werden, um zu bestimmen, ob gebremst werden muss oder nicht.

4 Adaptive Ultraschall-Feuerstrategie

Wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben wurde, existiert bei der Verwendung einer statischen Strategie zum Feuern der Ultraschall-Sensoren das Risiko, dass relevante Hindernisse übersehen werden. Deshalb ist eine solche Strategie ungeeignet, um aus den erhaltenen Messungen eine Karte aufzubauen, die für die Erkennung drohender Kollisionen genutzt wird. Rolland verwendet statt dessen eine dynamische Strategie, bei der die Feuerreihenfolge der Sensoren aus der aktuellen Bewegungsrichtung des Rollstuhls, seinem Lenkwinkel und den in der Karte vermerkten früheren Messungen abhängt.

4.1 Relevanter Bereich

Aus der aktuellen Fahrtrichtung und dem Lenkeinschlag ergibt sich der Bereich der Umgebung, der überhaupt für die Kollisionsvermeidung relevant ist, nämlich genau der, der auch vom zugehörigen virtuellen Sensor durchsucht wird (vgl. Abb. 2a). Falls es Hindernisse in diesem Gebiet gibt, sind nur jene Zellen interessant, die eher erreicht werden können als das dichteste, bereits bekannte Hindernis, da der Rollstuhl vor diesem sowieso anhalten muss. Je mehr Hindernisse es gibt, desto kleiner wird also der zu erfassende Bereich. Da für jeden Sensor bekannt ist, welchen Bereich der Karte er vermessen kann, können gezielt diejenigen Sensoren gefeuert werden, die Teile des relevanten Gebiets wahrnehmen können.

4.2 Alter der Messungen

Um eine gleichmäßige Erfassung dieses Bereichs zu erhalten, wird für jede Zelle der Karte das Alter der Messung mitgeführt. Es werden in jedem Schritt genau die beiden Sensoren gefeuert, die auf Zellen ausgerichtet sind, die die ältesten Messungen enthalten. Gibt es in einem Zyklus mehrere solcher Sensoren, wird derjenige gefeuert, der zusätzlich selbst am längsten nicht mehr verwendet wurde.

4.3 Eintragen einer Messung

Wenn eine neue Ultraschallmessung eintrifft, wird diese in die Karte eingetragen. Innerhalb des Öffnungswinkels des Sensors werden alle Zellen gelöscht, die dem Sensor näher als die gemessene Entfernung sind, jedoch nicht näher als der Blindbereich des Sensors, d.h. 15 cm. Die Zellen in der gemessenen Entfernung werden als belegt gekennzeichnet. Alle anderen Zellen bleiben unverändert. Zusätzlich wird das Alter der Messung aller modifizierten Zellen angepasst. Das Alter der Zellen, die zum ersten Mal als belegt gemessen wurden, wird auf „besonders alt“ gesetzt, um eine sofortige Neumessung zu forcieren (vgl. Abschnitt 2). Das Alter der anderen wird auf 0 zurückgesetzt.

Bereiche der Umgebung, die vom Rand her in die Karte hineinrollen, werden bis zu ihrer ersten Erfassung aus Sicherheitsgründen als belegt angesehen. Ein Zyklus des Moduls „Rechtzeitiges Anhalten“ – Eintragen neuer Sensormessungen, Verschieben der Karte, Altern der Messungen – dauert weniger als 3 ms. Da der Rollstuhl Befehle in einem 32 ms Takt entgegen nimmt, wird die Karte etwa 31 Mal pro Sekunde aktualisiert.

4.4 Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die schnelle Erfassung der relevanten Umgebung durch die adaptive Feuerstrategie. Wie in Abb. 1b fährt der Rollstuhl eine enge Rechtskurve. Jedoch unterscheidet sich die Reihenfolge, in der mit den Sensoren Messungen durchgeführt werden. Zum Einen werden nur nach Vorne und zur Außenseite der Kurve orientierte Sensoren verwendet, d.h. jene, die den Teil der Umgebung

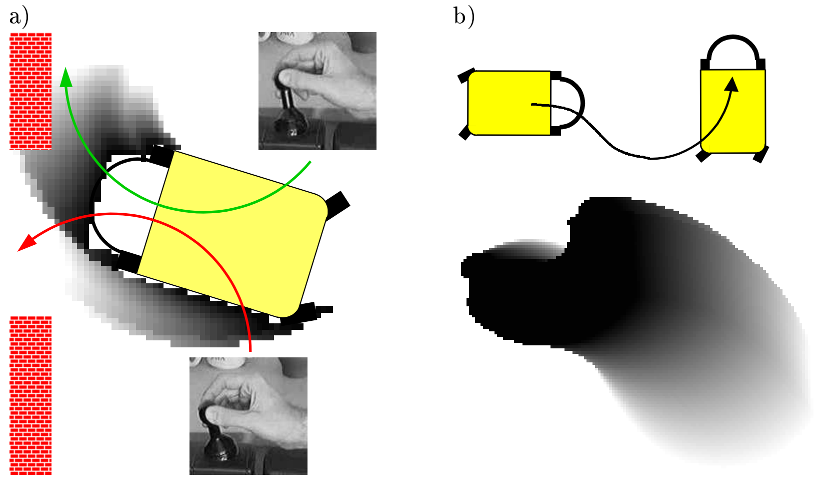

Abb. 3. Automatisches Ausweichen. a) Die vom Benutzer vorgegebene Fahrtrichtung entscheidet, zu welcher Seite der Rollstuhl ausweicht. b) Die Geschwindigkeitskarte für das Ausweichen nach links bei aktuell maximal rechtem Lenkeinschlag. Für jede Zelle ist die größte Geschwindigkeit gespeichert, mit der der Rollstuhl beim Ausweichen gerade nicht mehr diese Zelle überstreicht. Je dunkler eine Zelle dargestellt ist, desto geringer ist die erlaubte Geschwindigkeit.

erfassen, der während des Abfahrens der Kurve erreicht wird. Zum Anderen wird dieser Bereich sehr schnell vermessen. Schon nach sechs Messzyklen ist die Erfassung des Gebiets fast perfekt. Das Loch auf der linken Seite kommt dadurch zustande, dass der Rollstuhl dieses Gebiet nicht mit seiner Vorderseite passieren wird. Erst später, nachdem er sich weiter gedreht hat, kann er diese Region mit seinem Heck erreichen, weshalb sie erst dann erfasst werden muss.

5 Automatisches Ausweichen

Automatisches Ausweichen ist eine der wichtigsten Fähigkeiten, die ein autonomes mobiles System beherrschen sollte. Daher wurden auch schon viele verschiedene Methoden zur Hindernisvermeidung entwickelt. Eine kurze Übersicht wurde von Borenstein und Koren (1991) zusammengestellt, wobei die Autoren zwischen drei Klassen von Algorithmen unterscheiden: Kanten-Detektionsmethoden, die Repräsentation von Hindernissen durch Wahrscheinlichkeitsgitter, sowie Potenzialfeldmethoden. Sie alle sind anwendbar für Roboter mit Ultraschallsensoren, aber keine von ihnen wurde für den Einsatz in sog. „Shared-Control“-Systemen entworfen, d.h. für Systeme, in denen sich die Maschine die Steuerung mit einem Benutzer teilt, wie z.B. bei einem intelligenten Rollstuhl.

Eine typische Ausweichsituation ist in Abb. 3a dargestellt: Der Rollstuhl nähert sich einem Türdurchgang. Er könnte nun entweder direkt auf den Türpfosten zufahren und vor ihm stehen bleiben (reine Kollisionsvermeidung), nach links ausweichen und somit den Türdurchgang passieren oder nach rechts ausweichen und an der Wand entlang fahren. Ein früherer Ansatz, der auf Rolland implementiert wurde, war eher Maschinen-orientiert: für alle möglichen Lenkeinschläge des Rollstuhls wurde ermittelt, wie viel Fahrtstrecke wahrscheinlich auf einer entsprechenden Kurve bis zum dichtesten Hindernis verbleiben würde. Ähnlich wie bei der Vektor-Feld-Histogramm-Methode (Bell *et al.*, 1994) wurde dann der Lenkeinschlag ausgewählt, mit dem der Rollstuhl vermutlich am weitesten hindernisfrei fahren kann (Röfer und Lankenau, 1998). Auch wenn einige Verbesserungen im Vergleich zur VFH Methode erreicht wurden, krankte dieser Ansatz jedoch an der Tatsache, dass die Entscheidung, ob z.B. durch die Tür gefahren oder ihr ausgewichen werden soll, einzig vom Zeitpunkt des Eingreifens abhing und dieser von Situation zu Situation verschieden war.

5.1 Ausweichrichtung

Der neue Ansatz beachtet dagegen die vom Benutzer mit dem Steuerknüppel angedeutete Fahrtrichtung um zu erfahren, welche der drei Alternativen (nach links, nach rechts oder gar nicht ausweichen) er wünscht. Die lokale Karte wird mit dem zu dieser Richtung gehörigen virtuellen Sensor nach den dichtesten Hindernissen durchsucht (vgl. Abb. 3a). In dem virtuellen Sensor ist für jede Zelle der Karte gespeichert, in welche Richtung (links/rechts) ihr am besten auszuweichen ist. Dies ergibt sich aus dem Teil des Rollstuhls, der diese Zelle zuerst erreichen wird. Falls z.B. eine Zelle zuerst mit dem linken Vorderteil erreicht wird, ist es angebracht, nach rechts an dem Hindernis vorbeizufahren; ist der mutmaßliche Kollisionspunkt die hintere linke Seite, sollte jedoch nach links ausgewichen werden, usw. Diese Information wurde für jede Fahrtrichtung, jeden Lenkeinschlag und jede Rotation gegenüber der Karte vorausberechnet, steht also ohne kalkulatorischen Zusatzaufwand zur Laufzeit zur Verfügung.

5.2 Geschwindigkeit

Ausweichen besteht allerdings nicht nur aus dem Ändern des Lenkwinkels, sondern auch aus der Reduktion der Geschwindigkeit. Da das Lenken Zeit benötigt, muss der Rollstuhl beim Ausweichen auch abbremsen, um der Lenkung die nötige Zeit zu verschaffen. Hierzu existieren wiederum im Voraus berechnete Tabellen, die für jede Zelle der lokalen Karte, die aktuelle Fahrtrichtung (vorwärts/rückwärts), jeden aktuellen Lenkeinschlag und jede gewünschte Ausweichrichtung (links/rechts) die maximale Geschwindigkeit enthalten, mit der der Rollstuhl beim Ausweichen gerade nicht mehr mit der jeweiligen Zelle kollidiert (vgl. Abb 3b).

5.3 Ergebnisse

Der Ansatz zur Hindernisvermeidung wurde in verschiedenen Situationen erfolgreich getestet, z.B. in engen Korridoren, beim Türdurchfahren und in Umgebungen mit vielen umherlaufenden Personen (Hannovermesse Industrie 1999). Abbildung 4 zeigt z.B. zwei Fahrten durch eine 92 cm breite Tür, eine vorwärts

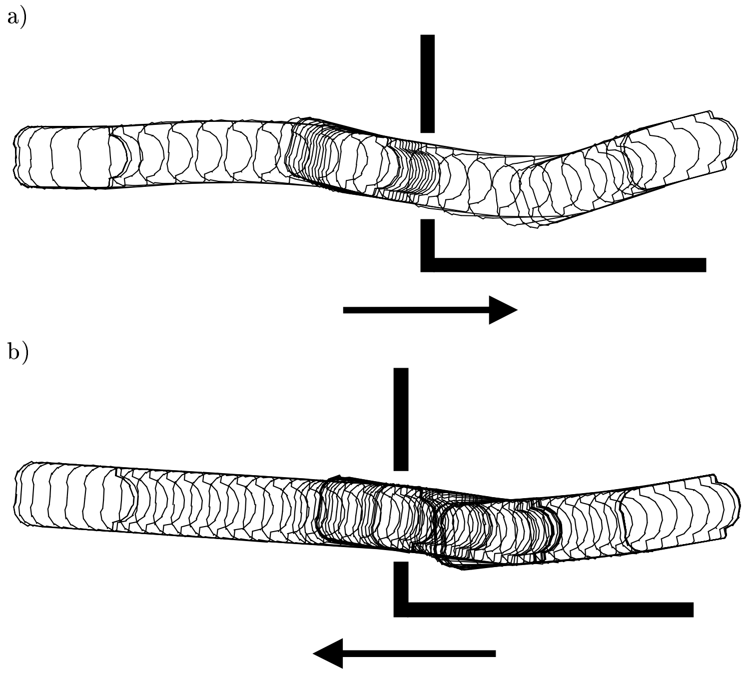

Abb. 4. Passieren eines Türdurchgangs mit Hindernisvermeidung in 0,5 Sekundenschritten. a) Vorwärts. b) Rückwärts.

(Abb. 4a), die andere rückwärts (Abb. 4b). Jeder der dargestellten Umrisse entspricht der Position des Rollstuhls in 0,5 Sekundenschritten. Während der Experimente deutete der Benutzer nur grob in die Richtung der Tür, die Feinnavigation wurde von Rolland übernommen. Der Rollstuhl fährt jeweils recht schnell (vorwärts z.B. 84 cm/s) auf die Tür zu, bremst dann ab und lenkt ein, durchfährt den Türrahmen und beschleunigt wieder. In Abb. 4a wird zusätzlich noch einer Seitenwand im hinter der Tür liegenden Raum ausgewichen.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die Module eines Fahrassistenten für behinderte und ältere Menschen präsentiert, einem Rollstuhl, der mit Ultraschallsensoren und einem PC ausgestattet wurde. Hierzu wurde zuerst eine genauere Analyse der typischen Probleme von Ultraschallsensoren durchgeführt und im Anschluss eine Methode zur Erfassung der Umgebung und der Kollisionsvermeidung vorgestellt, die zumindest einige dieser Probleme reduziert. Das vorgestellte Verfahren der Kollisionsvermeidung ist schnell und genau, es ermöglicht z.B. das Fahren in Menschenmengen. Des Weiteren wurde ein Verfahren zum automatischen Ausweichen präsentiert, bei dem der Benutzer weitgehend die Kontrolle über die vom Rollstuhl eingeschlagene Fahrtrichtung behält.

In Zukunft – und z.T. auch schon realisiert – wird der Fahrassistent mit einem Satz von automatischen Manövern ausgestattet, wie z.B. dem Wenden auf der Stelle und dem Andocken an Tische.

Danksagung

Die Autoren dieses Beitrags werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch das Schwerpunktprogramm „Raumkognition“ unterstützt.

Literatur

D. A. Bell, S. P. Levine, Y. Koren, L. A. Jaros und J. Borenstein (1994). Design criteria for obstacle avoidance in a shared control system. In: *Proceedings of the RESNA '94 Conference*, 17–24. Nashville.

J. Borenstein und Y. Koren (1991). The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **7**(3), 278–288.

J. Borenstein, H. R. Everett und L. Feng (1996). *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. University of Michigan.

W. Burgard, D. Fox und D. Henning (1997). Fast grid-based position tracking for mobile robots. In: G. Brewka, C. Habel und B. Nebel (Hrsg.), *KI-97: Advances in Artificial Intelligence*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 289–300. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

T. Edlinger und G. Weiß (1995). Exploration, navigation and self-localization in an autonomous mobile robot. In: R. Dillmann, U. Rembold und T. Lüth (Hrsg.), *Autonome Mobile Systeme*, Informatik aktuell, 142–151. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

A. Elfes (1991). Occupancy grids: A stochastic spatial representation for active robot perception. In: S. S. Iyengar und A. Elfes (Hrsg.), *Autonomous Mobile Robots*, Band 1, 60–70. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California.

R. Furtwängler, U. D. Hanebeck und G. Schmidt (1998). Dynamic control of a mobile manipulator. In: *Proceedings of AMC'98, 5th Int. Workshop on Advanced Motion Control*, 440–445. Coimbra, Portugal.

J.-S. Gutmann, W. Burgard, D. Fox und K. Konolige (1998). An experimental comparison of localization methods. In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'98)*. Victoria, Canada.

A. Kirchner (1997). Mapping with laser rangefinder and a grid based transformation estimation. In: *Proc. Third ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems*, 320–325. Bremen.

A. Musto, K. Stein, A. Eisenkolb und T. Röfer (1999). Qualitative and quantitative representations of locomotion and their application in robot navigation. In: *Proc. of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, 1067–1073. Morgan Kaufman Publishers, Inc., San Francisco, CA.

C. Owen und U. Nehmzow (1997). Middle scale navigation – a case study. In: *Spatial Reasoning in Mobile Robots and Animals*, 104–112. AISB-97 Workshop, Manchester University.

T. Röfer und A. Lankenau (1998). Architecture and applications of the Bremen Autonomous Wheelchair. In: P. P. Wang (Hrsg.), *Proc. of the Fourth Joint Conference on Information Systems*, Band 1, 365–368. Association for Intelligent Machinery.