

Absatzerkennung bei autonomen mobilen Robotern

Step Detection for Autonomous Mobile Robots

Peter Bechtel, Andreas Schatz, Lars Dieterle und Jürgen Adamy

In dieser Arbeit wird ein Absatzerkennungssystem für mobile Roboter vorgestellt, das die Gefahr des Absturzes an Absätzen ausschließt. Ausgehend von den allgemeinen Anforderungen wurde ein Sensorsystem, das auf einer Kombination von zwei Infrarotsensortypen basiert, und ein Fahralgorithmus zur Gefahrenvermeidung entwickelt. Die Methode ist weitgehend unabhängig vom Typ des radgetriebenen Roboters. Das System funktioniert ohne Vorwissen über das Aussehen der Absätze.

This paper presents a step detection system for mobile robots. It is used to prevent the robot from falling down steps during navigation. Regarding the general requirements a sensor system consisting of two types of infrared sensors and a step avoiding strategy was developed. This method can be applied to almost all wheel-based mobile robots. The system was designed to work without prior knowledge about the structure of the steps.

Schlagwörter: Mobile Robotik, Sicherheit, Infrarot-Sensorsystem, Absatzerkennung

Keywords: Mobile robotics, safety, infrared sensor system, step detection

1 Einleitung

Der Einsatz von mobilen Robotern ist derzeit auf wenige Anwendungen, wie z. B. Flächenreinigungsroboter [4; 13] und Transportroboter [3] beschränkt. Weitere mögliche Einsatzorte sind Büro- und Haushaltsumgebungen. Damit ergibt sich zwar ein vielversprechender Markt für die Zukunft, aber die Ansprüche an die Autonomie und Sicherheit dieser komplexen mechatronischen Systeme wachsen erheblich [8]. Schäden durch den Betrieb des Roboters müssen ausgeschlossen werden.

Methoden zur Verbesserung der Sicherheit allgemeiner technischer Systeme findet man z. B. in [12]. Die Sicherheit autonomer mobiler Robotersysteme im Speziellen ist ein wichtiges, bisher vernachlässigtes Gebiet [9]. [2] bietet eine Beurteilung der ethischen Auswirkungen des Einsatzes von Servicerobotern, bei der Sicherheitsfragen ebenfalls große Bedeutung haben. Andere weniger theoretische Arbeiten beschäftigen sich entweder mit der sicherheitsoptimalen Auswertung der vorhandenen Sensorinformationen – in [10] fuzzybasiert – oder Methoden zur Sicherheitsbewertung [6; 7]. Eine andere Herangehensweise zur Verbesserung der Sicherheit ist es, konkrete Gefahren zu analysieren und dem Roboter die Fähigkeit zu geben, diese zu vermei-

den. Dieser Weg wird in dieser Arbeit beschränkt. Überall vorhandene Gefahrenquellen für radgetriebene mobile Roboter sind nach unten führende Absätze. Diese können ab einer gewissen Höhe nicht überwunden werden und können bei Nichtbeachtung schlimmstenfalls zum Sturz des Roboters führen. Es ist daher notwendig, Absätze zuverlässig zu erkennen und entsprechend auszuweichen. In [5] wurde dieses für mobile Roboter im Geländeeinsatz schon gefordert und ein System zur Erkennung natürlicher Geländehindernisse vorgestellt. [1] und [11] beschreiben Stereobildverarbeitungssysteme zur Erkennung von Treppen anhand von Kantenbildern für Laufroboter.

In dieser Arbeit werden ein Absatzerkennungssystem und ein Algorithmus vorgestellt, die es radgetriebenen Robotern ermöglichen, nach unten führende Absätze in unbekannter Umgebung rechtzeitig zu erkennen und die Bahn anzupassen, sodass keine Absturzgefahr, z. B. an Treppen, besteht. Nach oben führende Absätze (Stufen) müssen entweder von Sensoren zur Kollisionsvermeidung (oft Ultraschallsensoren) erkannt werden oder können überfahren werden, wenn sie niedrig genug sind.

Das System hat eine vergleichsweise einfache, robuste Struktur. Die Kosten sind verglichen mit komplexer Senso-

rik – auch wegen des geringen Informationsverarbeitungs-aufwandes – niedrig, was für kommerzielle Anwendungen von besonderem Interesse ist.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: Das zweite Kapitel beschreibt eine allgemeine Methode zur Absatzerkennung. Das dritte und vierte Kapitel enthält die Auswahl geeigneter Sensoren und die Wahl der Montageposition. Im fünften Kapitel wird auf Sicherheitsaspekte eingegangen. Im sechsten Kapitel wird ein Fahralgorithmus zur Reaktion auf die aktuelle Absatzsituation beschrieben. Das siebte Kapitel beschreibt die Integration am Beispiel eines Pioneer II-Roboters von ActivMedia. Das achte Kapitel zeigt eine Fahrsimulation.

2 Absatzerkennung

In diesem Abschnitt wird eine Methode beschrieben, die es einem mobilen Roboter ermöglicht, Absätze zu erkennen. Folgende Anforderungen sind zu erfüllen:

- (F1) Das Absatzerkennungssystem darf bereits bestehende Sensorsysteme und die Funktion des Roboters nicht beeinträchtigen.
- (F2) Es muss ein rechtzeitiges Anhalten vor dem Absatz ermöglichen.
- (F3) Die Kosten sollen gering gehalten werden.

Aus der Forderung (F1) folgt, dass die Abmessungen des Roboters durch das Absatzerkennungssystem im Allgemeinen nicht überschritten werden dürfen. Ansonsten könnten beispielsweise die Kontaktsensoren, die zur Kollisionsdetektion verwendet werden, ihre Funktion nicht mehr erfüllen. Daher sind berührungslose Sensoren zur Absatzerkennung zweckmäßig. Der Energiebedarf des Systems darf zudem nicht zu hoch sein, um den Aktionsradius des Roboters nicht zu stark einzuschränken.

Die meisten radgetriebenen Roboter erlauben hohe Fahrgeschwindigkeiten und haben lange Anhaltewege, die nicht mehr klein gegenüber den Roboterabmessungen sind. Daher können die Sensoren nicht an der Unterseite des Roboters angebracht und senkrecht nach unten ausgerichtet werden: Absätze würden zu spät erkannt (F2). Dagegen erhält man bei waagerechter Ausrichtung keine Informationen über Absätze.

Eine mögliche Lösung ist, die Absatzsensoren – d.h. die Sensoren, die erkennen, ob ein Absatz vorhanden ist oder nicht – schräg nach unten auszurichten.

Im Zusammenhang mit (F1) ist es notwendig, zusätzlich die Tiefe der Absätze mittels Distanzsensoren zu messen, damit Unebenheiten des Bodens, die klein gegenüber dem Raddurchmesser sind, überfahren werden können. Ansonsten würde die normale Funktion des Roboters zu stark eingeschränkt.

Die Forderung (F3) bewirkt, dass nur eine relativ kleine Anzahl von Sensoren verwendet werden kann und auf

Standardbauteile zurückgegriffen werden muss. Die Funktionsweise des Absatzerkennungssystems kann in folgende Teilaufgaben zerlegt werden:

- (T1) Absätze unabhängig von der Form erkennen.
- (T2) Geschwindigkeit des Roboters stark reduzieren (*Tastmodus*), um rechtzeitig stoppen zu können und den Absatz genauer zu analysieren.
- (T3) Tiefe des Absatzes messen.
- (T4) Entscheiden, ob es sich um einen überfahrbaren Absatz handelt, und reagieren.

Die Aufgaben (T1) und (T3) können unabhängig von zwei Sensortypen übernommen werden. (T1) wird mittels der Absatzsensoren und (T3) mittels der Distanzsensoren gelöst. Ihre Anordnung zeigt Bild 1. Die Reduzierung der Geschwindigkeit (T2) und die Entscheidung (T4) übernimmt ein Fahralgorithmus.

3 Auswahl der Sensoren

Trotz der Beschränkung auf berührungslose Sensoren gibt es verschiedene Möglichkeiten, Absätze zu erkennen. Eine davon ist die Stereobildverarbeitung. Kameras sind universelle Sensoren und oft auf mobilen Robotersystemen vorhanden. Jedoch sind die bekannten Algorithmen zur Treppenerkennung vom Aussehen der Absätze abhängig [1]. Die in der mobilen Robotik stark verbreiteten preisgünstigen Ultraschallsensoren liefern häufig fehlerbehaftete Ergebnisse durch Mehrfachreflexionen, und als Abstandssensoren sind sie nicht sehr zuverlässig. Weiterhin kommen Lasersensoren in Frage, die sehr genaue Abstandsinformationen liefern, aber teuer sind. Ebenfalls geeignet sind Infrarotsensoren. Sie sind vergleichsweise günstig und haben neben einer gewissen Untergrundabhängigkeit keine gravierenden Nachteile.

Zur rechtzeitigen Absatzerkennung werden hier digitale Infrarot-Reflexionslichttaster mit Hintergrundausblendung als Absatzsensoren verwendet [15]. Bei diesem in Bild 2 dargestellten Sensortyp wird das diffus reflektierte Licht genutzt, um Objekte zu detektieren. Der Lichtstrahl trifft

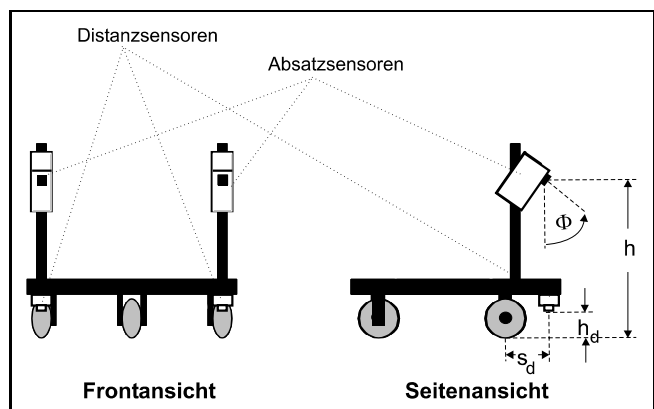


Bild 1: Anordnung der Sensorbaugruppen.

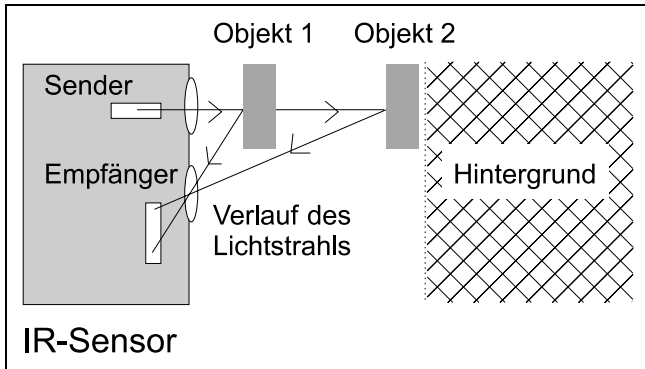


Bild 2: Infrarot-Reflexionslichttaster mit Hintergrundausblendung.

abhängig von der Objektentfernung in unterschiedlichen Winkeln auf die Linse und wird auf unterschiedliche Positionen des Empfängers abgebildet. Der Hintergrund wird ausgeblendet, indem der Empfänger auf die zur erwarteten Objektentfernung passende Position justiert wird. Denn dann fällt der reflektierte Lichtstrahl nicht mehr auf den Empfänger, weil Objekt 2 im Hintergrundbereich liegt. Die Messung funktioniert weitgehend unabhängig von Farbe und Oberfläche der Objekte bzw. des Untergrundes. Der gemessene Abstand wird durch einen einstellbaren Trigger in ein binäres Sensorausgangssignal umgewandelt. Das Ausgangssignal hat den Wert Null (Zustand: „**Absatz unmöglich**“), falls die gemessene Entfernung kleiner als der Triggerwert ist, sonst den Wert Eins (Zustand: „**Absatz möglich**“).

Zur Messung des Abstandes zwischen Roboterbodenplatte und Untergrund eignen sich analoge Infrarot-Distanzsensoren [14]. Diese führen eine direkte Abstandsmessung aus und geben das Ergebnis als analogen Wert aus, der noch mittels der hyperbelförmigen Sensorkennlinie in konkrete Entfernungen umzurechnen ist. Die Ausgangssignale der Distanzsensoren werden bei der Weiterverarbeitung durch selbstdefinierte Schwellwerte in die Zustände „**kein Absatz**“, „**überfahrbarer Absatz**“ und „**nicht überfahrbarer Absatz**“ übersetzt.

Voraussetzung für dieses Messprinzip ist, dass sich die Abstände der Sensoren zum Untergrund nur geringfügig ändern. Bei dem verwendeten Pioneer II-Roboter mit relativ geringer Nutzlast und Vollgummireifen ist diese Bedingung erfüllt. Bei Robotern, die z. B. Luftreifen haben, müssen auch die Absatzsensoren Abstandswerte anstelle von diskreten Zuständen liefern, und es muss eine Adaption der Schwellwerte vorgenommen werden.

4 Montageposition

Zur Absatzerkennung werden pro Antriebsrad jeweils ein Absatzsensor und ein Distanzsensor verwendet, sodass die gesamte Breite des Roboters abgesichert ist. Bild 1 zeigt die Positionierung der einzelnen Sensoren am Roboter. Die Absatzsensoren sind in der Sensorhöhe h im Sensorwinkel Φ angebracht. Das heißt, dass die empfangenen Signale

Streureflexionen sind, die bei idealen Reflexionseigenschaften des Untergrundes nicht auftreten. Es zeigte sich, dass auch auf „glatten“ Untergründen, wie z. B. Steinplatten oder PVC, regelmäßig Streureflexionen empfangen werden.

Zunächst werden die möglichen Bereiche für die Sensorhöhe h und den Sensorwinkel Φ berechnet. Die Mindestsensorhöhe h_{\min} wird von der effektiven Sensorreichweite $s_{\text{Sens.}}$ und vom maximalen Anhalteweg $s_{\text{Anh., max}}$ des Roboters bestimmt, siehe Bild 3. Der Anhalteweg $s_{\text{Anhalt.}}$ setzt sich wie folgt zusammen:

$$s_{\text{Anhalt.}} = s_{\text{Reakt.}} + s_{\text{Brems.}}$$

$$\text{mit } s_{\text{Reakt.}} = (\sum t_{\text{Lauf.}} + \sum t_{\text{Rech.}}) \cdot v \text{ und}$$

$$s_{\text{Brems.}} = \frac{\frac{1}{2} m_{\text{Robot.}} v^2 + \frac{1}{2} \sum_i \Theta_i \omega_{\text{Rad},i}^2}{\text{EMK} + F_L + F_R} \quad (1)$$

Dabei ist $s_{\text{Reakt.}}$ der Reaktionsweg, $s_{\text{Brems.}}$ der Bremsweg, $t_{\text{Lauf.}}$ die maximale Laufzeit und $t_{\text{Rech.}}$ die maximale Rechenzeit. Kenngrößen des Roboters sind die Masse $m_{\text{Robot.}}$, die Trägheitsmomente der rotierenden Teile Θ_i , die Winkelgeschwindigkeiten der Räder $\omega_{\text{Rad},i}$, die Fahrgeschwindigkeit des Roboters v , die bremsende elektromotorische Kraft EMK , die Luftwiderstandskraft F_L und die Reibkraft F_R , die beispielsweise in den Lagern auftritt. Die Laufzeiten bestehen aus der Sensorsignallaufzeit sowie den Übertragungszeiten für jedes Teilstück der Strecke Sensor, Mikroprozessor, Onboard-PC, Roboter-Mikroprozessor, Motor. Für jeden Teilabschnitt muss bei dieser Worst-Case-Abschätzung ein Abtastschritt hinzugezählt werden. Die Rechenzeiten setzen sich aus den Signalverarbeitungszeiten im Sensor, Mikroprozessor, Onboard-PC und Roboter-Mikroprozessor zusammen. In Gl. (1) wurde eine konstante Verzögerung vorausgesetzt. Da diese Näherung sehr grob ist, wurde der Bremsweg $s_{\text{Brems.}}$ experimentell bestimmt. Weil die effektive Sensorreichweite $s_{\text{Sens.}}$ konstant ist und die Detektionsentfernung d größer als der maximale Anhalteweg $s_{\text{Anh., max}}$ sein muss, ergibt sich für den minimalen Sensorwinkel Φ_{\min} :

$$\Phi_{\min} = \arcsin \left(\frac{s_{\text{Anh., max}}}{s_{\text{Sens.}}} \right)$$

Des Weiteren ist der maximale Sensorwinkel auf Φ_{\max} begrenzt, sonst tritt Totalreflexion auf. So ergeben sich die

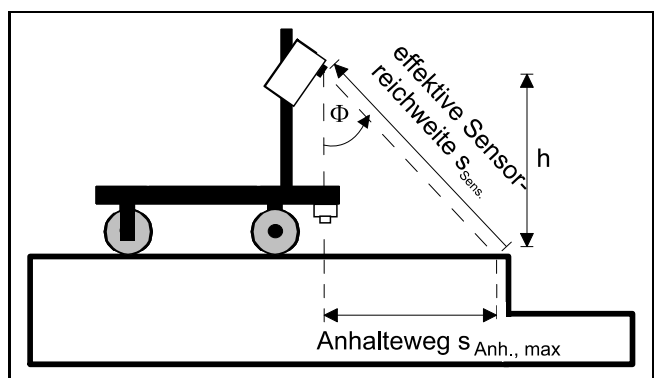


Bild 3: Absatzerkennung.

Grenzen der zulässigen Sensorhöhe h zu

$$h_{\max} = s_{\text{Sens.}} \cdot \cos \Phi_{\min},$$

$$h_{\min} = s_{\text{Sens.}} \cdot \cos \Phi_{\max}.$$

Dabei ist h_{\max} die Höchstsensorhöhe. Bei der Montage muss der Sensorwinkel Φ entsprechend eingestellt, und passend dazu der Triggerwert kalibriert werden. Es kann ein Toleranzbereich vorgesehen werden, der jedoch deutlich kleiner als die maximal überfahrbare Absatzhöhe sein muss. Ohne Toleranzbereich würden selbst kleine Nickbewegungen, wie sie beim Beschleunigen aufgrund der Massenträgheit auftreten, zum Auslösen der Absatzsensoren führen. Stark spiegelnde Untergründe erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Totalreflexionen, wodurch ebenfalls die Absatzsensoren ungewollt auslösen.

Die Distanzsensoren sind jeweils direkt in Fahrtrichtung vor den Antriebsrädern an der Bodenplatte des Roboters in der Höhe $h_d = 5$ cm über dem Boden und der Entfernung s_d vom Radmittelpunkt montiert, um den Abstand zum Boden zu überwachen (vgl. Bild 1). Durch die senkrechte Ausrichtung tritt keine Totalreflexion auf. Eine Kalibrierung ist nicht notwendig.

5 Sicherheit

Weil die Information, ob ein Absatz vorhanden ist oder nicht, für den Roboter sicherheitskritisch ist, treten zu den Forderungen in Kapitel 2 noch weitere hinzu.

- (F4) Das Absatzerkennungssystem muss unabhängig von Umweltbedingungen seine Aufgabe ordnungsgemäß erfüllen.
- (F5) Fehlmessungen oder systematische Fehler müssen so weit möglich durch die Weiterverarbeitung abgefangen werden.

Aufgrund der Forderung (F4) sollten nur aktive Sensoren, die eigene Signale aussenden anstatt nur zu empfangen, verwendet werden. Für Kameras müsste eine Beleuchtung mitgeführt werden, um unabhängig von Umgebungslichtquellen zu sein.

Die fünfte Forderung (F5) könnte man erfüllen, indem man durch Plausibilitätstests, durch Redundanz oder eine zusätzliche Überwachungsebene die Sensorwerte zuverlässiger macht. Hier wurde jedoch mit den Originalsensordaten weitergearbeitet. Dafür wurde dem Roboter bei der Auswertung der Sensordaten ein „vorsichtiges“ Verhalten vorgeschrieben. Man macht sich zu Nutze, dass von den vier prinzipiell möglichen Fällen:

- (M1) Es ist ein Absatz vorhanden, Absatzsensor gibt „**Ab-satz unmöglich**“ aus.
- (M2) Es ist kein Absatz vorhanden, Absatzsensor gibt „**Ab-satz unmöglich**“ aus.
- (M3) Es ist ein Absatz vorhanden, Absatzsensor gibt „**Ab-satz möglich**“ aus.

- (M4) Es ist kein Absatz vorhanden, Absatzsensor gibt „**Ab-satz möglich**“ aus.

Fall (M1) praktisch ausgeschlossen ist. Das Signal müsste vor dem Triggerwert reflektiert werden, obwohl dort ein Absatz, d. h. nur Luft, vorhanden ist. Die Fälle (M2) und (M3) beschreiben das Sollverhalten. Der andere Fehlerfall (M4) kann vereinzelt auftreten. Denn auch wenn überhaupt kein Signal empfangen werden kann, z. B. durch den Ausfall des Sensors, Totalreflexion oder Absorption des Signals auf ungünstigem Untergrund, tritt der Zustand „**Ab-satz möglich**“ auf.

Um die Sicherheit weiter zu verbessern, ist es wie erwähnt möglich, die Redundanz durch zusätzliche Sensoren zu erhöhen und das System gegen Störungen durch fremde Quellen abzusichern. Ersteres verursacht allerdings höhere Kosten und erhöhten Energiebedarf des Roboters. Letzteres kann man erreichen, indem man das Impulssignal des Sensors durch eine codierte Impulsfolge ersetzt.

6 Fahralgorithmus zur Gefahrenvermeidung

Der Algorithmus legt die Geschwindigkeit und die Bahn des Roboters abhängig von den Informationen des Absatzerkennungssystems fest. Ein Statechart des verwendeten Fahralgorithmus zeigt Bild 4.

Der Roboter bewegt sich zuerst ohne Geschwindigkeitsbeschränkung mit der festgelegten Maximalgeschwindigkeit v_{\max} . Wenn der linke oder der rechte Absatzsensor in den Zustand „**Ab-satz möglich**“ wechselt, wird der *Tastmodus* aktiviert, d. h. für eine vorgegebene Zeit wird die Geschwindigkeit auf v_{tast} herabgesetzt. Falls der rechte bzw. der linke Distanzsensoren in den Zustand „**nicht überfahrbarer Absatz**“ schaltet, d. h. falls die gemessene Distanz größer als der Abstand zum Boden plus die vorgegebene maximal überfahrbare Absatzhöhe ist, wird die *Ausweichstrategie nach links* bzw. *nach rechts* ausgelöst. Dann fährt der Roboter zunächst ein kleines Stück zurück und dreht sich, je nachdem welcher Distanzsensoren zuerst „**nicht überfahrbarer Absatz**“ meldete, vom Absatz weg. Das heißt, falls der linke Sensor zuerst meldet, dreht der Roboter sich nach rechts, ansonsten dreht er nach links.

Ob der Roboter noch weiter dreht, hängt davon ab, ob der entsprechende Absatzsensor – bei Linksdrehung der Rechte, bei Rechtsdrehung der Linke – bereits wieder in den Zustand „**Ab-satz unmöglich**“ zurückgeschaltet hat. Falls nicht, dreht der Roboter sich noch um einen Zufallsanteil weiter. Der zufallsabhängige Zuschlag verhindert, dass der Roboter auf engem Raum immer die gleiche Bahn abfährt; als günstig hat sich für holonome Roboter der Bereich von 50° bis 70° erwiesen. Nachdem die Ausweichstrategie ausgeführt ist, befindet sich der Roboter wieder im *Tastmodus*. Falls während der vorgegebenen Zeit kein Absatzsensor „**Ab-satz möglich**“ ausgibt, schaltet der Algorithmus in den Zustand *Bewegung ohne Geschwindigkeitsbeschränkung*, und der Zyklus beginnt von vorn.

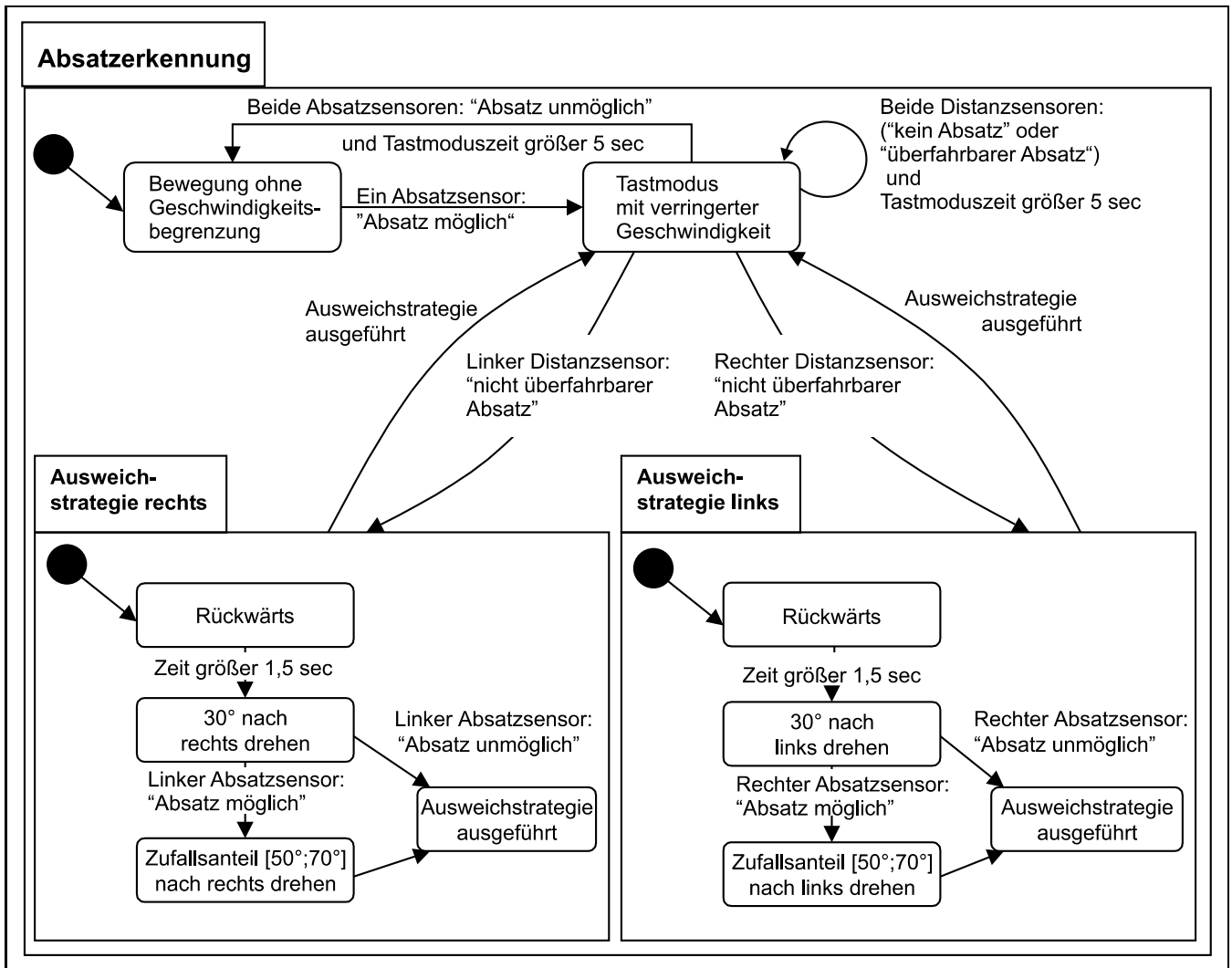


Bild 4: Statechart des Fahralgorithmus.

7 Integration in einen Pioneer II

In diesem Abschnitt wird die Integration des Systems in einen autonomen mobilen Roboter Pioneer II der Firma ActivMedia Robotics erläutert. Der Roboter ist ca. 1,2m hoch, die Bodenplatte ist 44 cm lang und 33 cm breit. Angetrieben wird der Roboter über zwei unabhängig ansteuerbare Antriebsräder. Ein frei bewegliches Stützrad trägt das Gewicht des Roboters.

Der Pioneer II bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Der Bremsvorgang erfolgt durch Abschalten der Motoren. Bremsversuche ergaben einen Bremsweg von 54 cm aus voller Fahrt.

Die Anbindung der Sensordaten an den Onboard-Rechner des Roboters erfolgt über eine Interfaceschaltung, die die Sensordaten über eine serielle Verbindung weitergibt. Ein Blockschaltbild der Hardwarestruktur zeigt Bild 5. Zur Kommunikation mit dem Mikrocontroller wurde ein Bus-system entwickelt, über das die Werte der analogen Distanzsensoren und die Zustände der digitalen Absatzen-sensoren eingelesen werden.

8 Ergebnisse

Die Testfahrt wurde auf zwei Platten durchgeführt, die hintereinander auf dem Boden ausgelegt wurden. Die Platten haben eine leicht verschiedene Dicke von 2 cm bzw. 2,5 cm. Als maximal überfahrbarer Absatz wurde dem Roboter 1 cm vorgegeben. Damit wurde eine Testumgebung geschaffen, die Gefahren für den Roboter ausschließt, aber die Aufgabenstellung komplizierter als in der realen Umgebung gestaltet. Der 0,5 cm hohe Übergang zwischen den beiden Platten stellt einen überfahrbaren Absatz dar. Die Ränder der Platten zum Boden sind nicht überfahrbar.

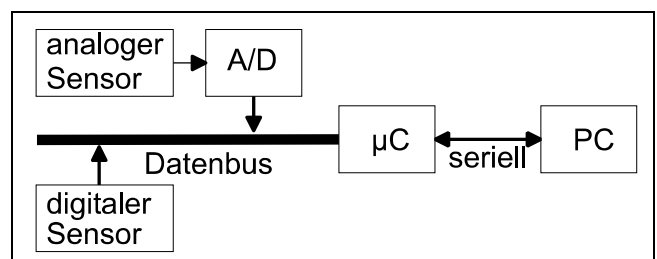


Bild 5: Blockschaltbild des Hardwareaufbaus des Sensorsystems.

In Bild 6 sind die Sensordaten und die Roboterreaktion während der Testfahrt beschrieben. Die erste Zeile zeigt die beiden Platten und einige charakteristische Positionen des Roboters von der Seite. Darunter sieht man links die gleiche Situation aus der Draufsicht. In der dritten und vierten Zeile ist rechts der weitere Verlauf der Fahrt auf der zweiten Platte, abschnittsweise dargestellt. Dabei zeigen die gepunkteten Vektoren über den Rädern des Roboters an die Stelle, die in der jeweiligen Situation von den Absatzsensoren erfasst wird. Die gestrichelten Vektoren in der Mitte geben die Richtung und Größe der Fahrgeschwindigkeit v an. In der fünften Zeile ist die aktuelle translatorische Fahrgeschwindigkeit des Roboters v (schwarz) und die Maximalgeschwindigkeitsvorgabe (hellgrau)¹ über der Zeit dargestellt. Die Winkelgeschwindigkeit ist nicht eingetra-

gen. Darunter befinden sich die aktuellen Werte des linken (hellgrau) und rechten (schwarz) digitalen Absatzsensors und in der untersten Zeile des linken (hellgrau) und rechten (schwarz) analogen Distanzsensors. Die eingekreisten Nummern beziehen sich jeweils auf die charakteristischen Zeitpunkte während der Testfahrt.

Beim Fahrtbeginn (1) beschleunigt der Roboter auf $v_{max} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Zum Zeitpunkt (2) erkennen beide Absatzsensoren nahezu gleichzeitig den niedrigen Absatz (ca. 0,5 cm) zwischen den beiden Platten und die Geschwindigkeitsvorgabe wird auf Tastgeschwindigkeit $v_{tast} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ reduziert. An der zweiten Platte (3) erkennen beide Distanzsensoren einen überfahrbaren Absatz, der Roboter bleibt noch auf Tastgeschwindigkeit. Zum Zeitpunkt (4) wird die Geschwindigkeit wieder auf $v_{max} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ erhöht, da während der vorgegebenen Zeit von 5 s kein nicht überfahrebarer Absatz erkannt wurde. Danach (5) lösen die Absatzsenso-

¹ Bei Rückwärtsfahrt erkennt man deutlich die Abweichung zur (negativen) Sollgeschwindigkeit.

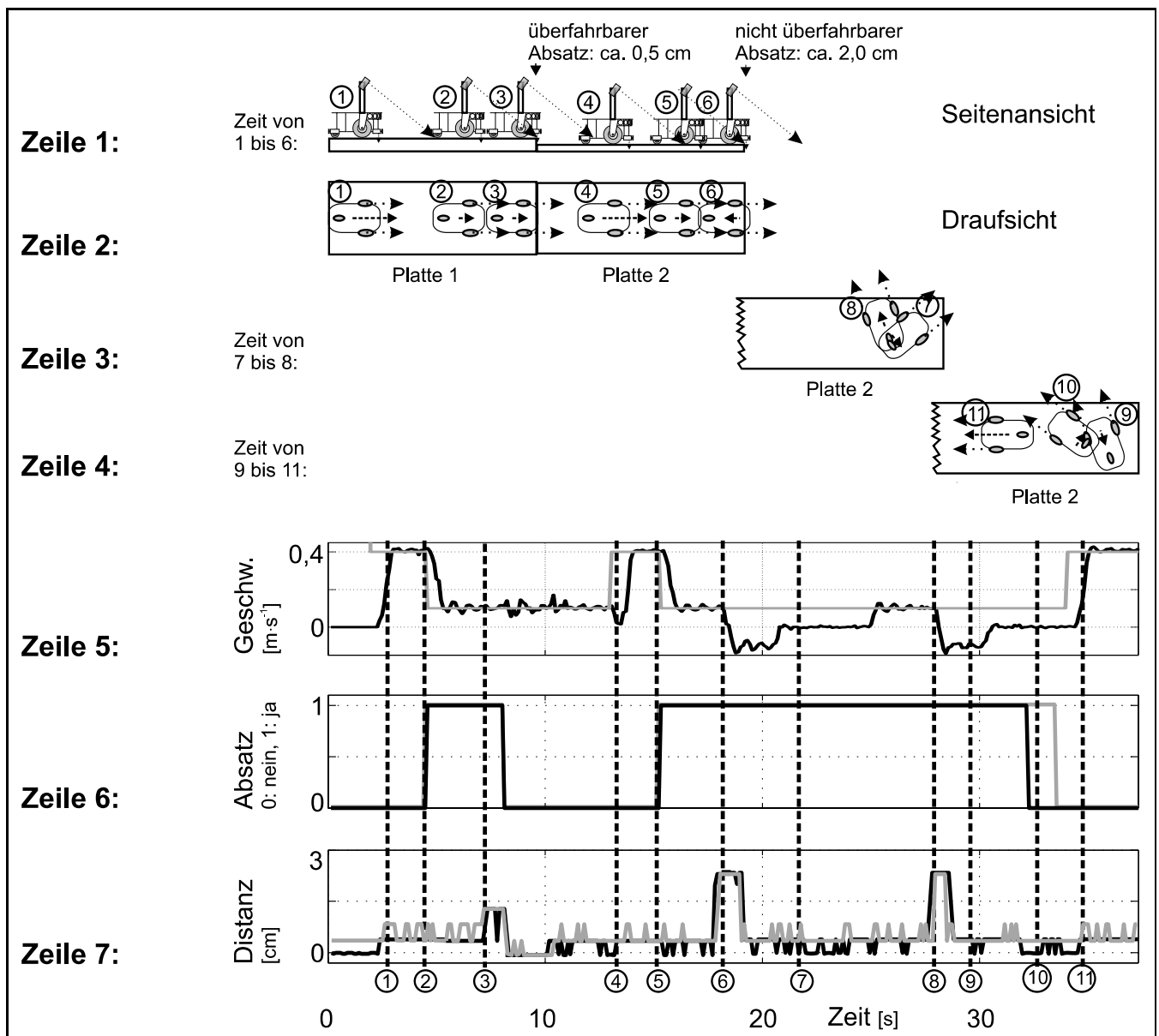


Bild 6: Sensordaten und Roboterreaktion bei einem typischen Testlauf.

ren aus, die Fahrgeschwindigkeit wird reduziert, und die Distanzsensoren erkennen den nicht überfahrbaren Absatz (6). Nun beginnt die Ausweichstrategie nach links. Der Roboter setzt zurück, dreht um 30° plus Zufallsanteil nach links (7), fährt nach vorn und erkennt den nächsten nicht überfahrbaren Absatz mit dem rechten Distanzsensor zuerst (8). Dadurch fährt er wieder ein Stück zurück (9), dreht weiter nach links (10) und setzt, nachdem beide Absatzsensoren keine Absätze mehr erkennen, mit $v_{\max} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zum Zeitpunkt (11) seine Fahrt fort.

Der Roboter ist mit dem Absatzerkennungssystem und dem Fahralgorithmus in der Lage, auch bei geringem Unterschied zwischen überfahrbarer und nicht überfahrbarer Absatzhöhe autonom in einer Umgebung mit Absätzen zu fahren.

9 Zusammenfassung

Radgetriebene Serviceroboter, die in unbekanntem Umgebungen agieren, müssen nach unten führende Absätze erkennen, um Abstürze zu vermeiden. In dieser Arbeit wurde ein Absatzerkennungssystem vorgestellt, das diese Aufgabe erfüllt und mit reduzierter Geschwindigkeit kleine Absätze überfährt. Die Effizienz des Systems wurde durch den vorgestellten Fahralgorithmus und die Testfahrten mit dem Pioneer II-Roboter beispielhaft bestätigt. Mit geringen Anpassungen kann das Absatzerkennungssystem für andere radgetriebene Roboter verwendet werden.

Danksagung

Die Autoren danken den Firmen Pepperl+Fuchs GmbH sowie Sharp Microelectronics für die Unterstützung der Arbeit.

Literatur

- [1] A. Albert, M. Suppa, W. Gerth, „Detection of stair dimensions for the path planning of a bipedal robot“, *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italy, 2001*. S. 1291–1296.
- [2] T. Christaller *et al.*, „Robotik: Perspektiven für menschliches Handeln in der zukünftigen Gesellschaft“, *Springer, Berlin, 2001*, ISBN 3-540-42779-1.
- [3] J. Evans *et al.*, „Handling real-world motion planning: a hospital transport robot“, *IEEE Control Systems Magazine, Volume: 12 Issue: 1, 1992*. S. 15–19.
- [4] H. Endres, W. Feiten, G. Lawitzky, „Field test of a navigation system: autonomous cleaning in supermarkets“, *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Leuven, Belgium, Volume: 2, 1998*. S. 1779–1781.
- [5] L. Henriksen, E. Krotkov, „Natural Terrain Hazard Detection with a Laser Rangefinder“, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, 1997*. S. 968–973.
- [6] K. Ikuta, M. Nokata, H. Ishii, „Safety Evaluation Method of Human-Care Robot Control“, *Proc. of International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan, 2000*. S. 119–127.
- [7] M. Rachkov, „Safety Systems of Technological Climbing Robots“, *Proc. of IEEE International Symposium of Industrial Electronics, Guimaraes, Portugal, 1997*. S. 660–665.
- [8] N. Tomatis *et al.*, „A Complex Mechatronic System: from Design to Application“, *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italy, 2001*. S. 278–283.
- [9] V. J. Traver, A. P. del Pobil, M. Pérez-Franzisco, „Making Service Robots Human-Safe“, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan, 2000*. S. 696–701.
- [10] E. Tunstel, A. Howard, H. Seraji, „Fuzzy Rule-Based Reasoning for Rover Safety and Survivability“, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001*. S. 1413–1420.
- [11] Y. Xiong, L. Matthies, „Vision-Guided Autonomous Stair Climbing“, *Proc. of IEEE International Conference of Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, 2000*. S. 1842–1847.
- [12] W. Steinhorst, „Sicherheitstechnische Systeme: Zuverlässigkeit und Sicherheit kontrollierter und unkontrollierter Systeme“, *Vieweg, Braunschweig, 1999*, ISBN 3-528-03867-5.
- [13] M. Schofield, „Neither master nor slave ... ‘. A practical case study in the development and employment of cleaning robots“, *Proc. of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Barcelona, Spain, Volume: 2, 1999*. S. 1427–1434.
- [14] M. Watanabe *et al.*, „Feldeffekttransistortyp-Sensor und Verfahren zu dessen Betrieb“, *Patentschrift DE0003504401C2, Sharp K. K., Osaka, Japan, 1988*.
- [15] G. Kegel, „Näherungssensor und Verfahren zur Personenerkennung“, *Patentschrift DE0004115785C2, Pepperl+Fuchs GmbH, Mannheim, Germany, 1998*.

Manuskripteingang: 16. September 2002.

Dipl.-Ing. Peter Bechtel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik im Fachbereich Elektrotechnik der Technischen Universität Darmstadt. Hauptarbeitsgebiet: Autonome mobile Roboter.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Petersenstr. 20, D-64287 Darmstadt, Fax: +49-(0)6151-16-7424, E-Mail: petbec@rtr.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Andreas Schatz hat seine Studienarbeit zum Thema „Gefahrenvermeidung durch Absatzdetektion für ein autonomes mobiles Robotersystem“ am Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik angefertigt und ist heute Produktspezialist für Elektromagnetische Sensoren bei Pepperl+Fuchs.

Adresse: Pepperl+Fuchs GmbH, Königsberger Allee 87, D-68307 Mannheim, E-Mail: aschatz@de.pepperl-fuchs.com

Dipl.-Ing. Lars Dieterle schrieb seine Studienarbeit „Entwicklung und Integration eines Sensorsystems zur Treppenerkennung für ein autonomes mobiles Robotersystem“ am Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik. Heute ist er als Engineering Consultant bei BERATA tätig.

Adresse: BERATA GmbH Geschäftsstelle München, Pelkovenstr. 51, D-80992 München, E-Mail: lars.dieterle@berata.com

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy ist Leiter des Fachgebietes Regelungstheorie und Robotik im Fachbereich Elektrotechnik der Technischen Universität Darmstadt. Hauptarbeitsgebiete: Regelungsverfahren, Computational Intelligence, Autonome mobile Robotik.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik, Fachgebiet Regelungstheorie und Roboter, Landgraf-Georg-Str. 4, D-64283 Darmstadt, Fax: +49-(0)6151-16-2507, E-Mail: adamy@rtr.tu-darmstadt.de