Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 17

Artikel: Kursregelung für ein automones Fahrzeug

Autor: Domeisen, Heinz / Gütensperger, Pascal

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902101

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Vor über hundert Jahren übernahmen automobile (selbstbewegliche) Fahrzeuge Bewegungs- und Beförderungsaufgaben, die zuvor von Menschen und Tieren geleistet worden waren. Dem Menschen verblieben die intelligenten Aufgaben des Pilotierens und Steuerns. Heute verfügen wir über technische Mittel, die an eine weitere Automatisierungsstufe denken lassen, in welcher sich die automobilen zu autonomen Fahrzeugen entwickeln, die sich selbständig in unbekannter oder sich ändernder Umgebung zurechtfinden. Der folgende Artikel beschreibt den Aufbau und die Regelung eines autonomen Fahrzeugs, das selbständig einer Bodenmarkierung folgen und an Kreuzungen in eine vorprogrammierte Richtung abzweigen kann.

Kursregelung für ein autonomes Fahrzeug

■ Heinz Domeisen, Pascal Güntensperger

Computer übernehmen in zunehmendem Masse Steuerungsaufgaben bei Robotern und Fahrzeugen. Systeme mit paralleler Kinematik, sogenannte Stewart-Plattformen oder Hexapods, lassen sich überhaupt erst dank der heute verfügbaren hohen Leistung von Digitalrechnern realisieren.

Autonome Fahrzeuge sollen sich in unbekannter oder sich ändernder Umgebung selbständig zurechtfinden. Dies stellt hohe Anforderungen an das Steuerprogramm des Fahrzeugs, das auf verschiedenste Situationen vorbereitet bzw. lernfähig sein muss. Die Einsatzgebiete autonomer Fahrzeuge reichen vom innerbetrieblichen Transport bis zu Arbeiten in gefährlicher Umgebung (Feuer, Minensuche usw.).

Oft soll ein solches Fahrzeug einen vorgegebenen Kurs fahren. Wegen möglicher Hindernisse und Störungen führt die Implementierung einer reinen Steuerung jedoch im allgemeinen nicht zum Ziel. Eine Regelung sorgt dafür, dass Kursabweichungen, unabhängig von der Ursache, korrigiert werden. Ausserdem kann der Soll-Kurs im allgemeinen auf einfache Art und Weise vorgegeben werden.

An der Hochschule Rapperswil (HSR) sind bereits mehrfach solche Fahrzeuge gebaut und erprobt worden. Ziele der einzelnen Arbeiten waren:

- Abfahren eines vorgegebenen Kurses
- Hinderniserkennung und -umgehung ohne Verlust der Information über die zurückgelegte Distanz
- Fahrzeug für die Teilnahme am Wettbewerb Eurobot 98 (ausgezeichnet mit «Prix de la créativité» und «Best Design»)

Aufbau des Fahrzeuges

Wie bei allen Regelstrecken war es auch in diesem Fall sinnvoll, das Fahrzeug möglichst so zu konzipieren, dass für die Regelung keine zusätzlichen Probleme, etwa durch Nichtlinearitäten, auftreten konnten. Deshalb wurde bei der Entwicklung spezielles Augenmerk auf die Mechanik und Antriebstechnik gelegt.

Die an das Fahrzeug gestellten Anforderungen waren:

- Drehen an Ort möglich
- keine Probleme bei kleineren Bodenunebenheiten
- Hinderniserkennung
- selbständiges Folgen einer Bodenmarkierung und Abzweigen in einer vorgegebenen Richtung an einer Kreuzung

Adresse der Autoren
Prof. *Heinz Domeisen* und *Pascal Güntensperger*, Hochschule Rapperswil (HSR)
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Email heinz.domeisen@itr.ch

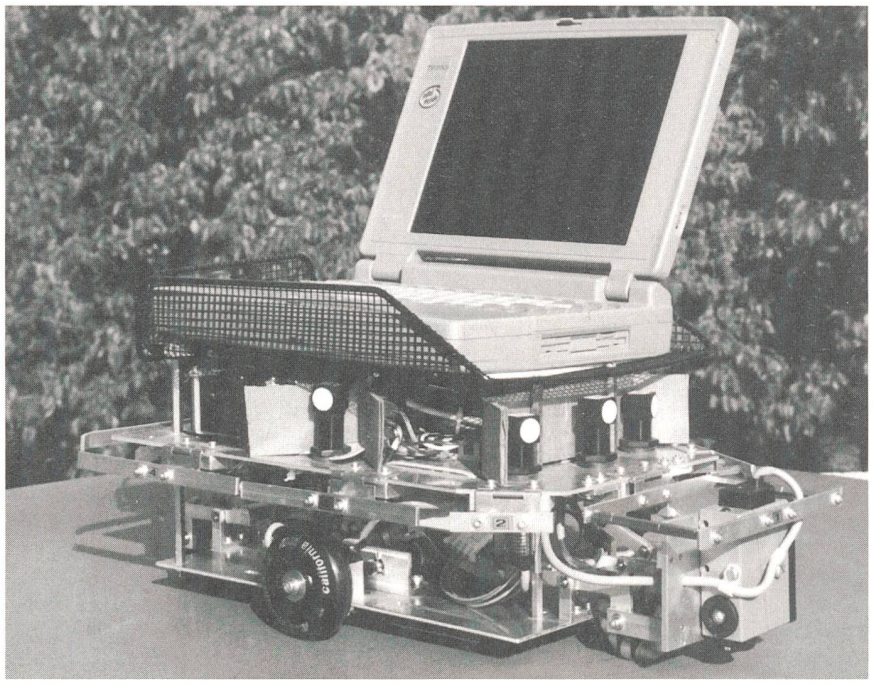

Bild 1 Fahrzeug Pathfinder

Mechanik und Antriebe

Das Fahrzeug bewegt sich auf vier Rädern, je einem angetriebenen links und rechts sowie je einem gefederten Stützrad vorne und hinten in der Mitte. Kleinere Bodenunebenheiten können somit problemlos überwunden werden. Als Stützräder wurden Allseitenrollen verwendet, die in allen Richtungen mitrollen, ohne sich drehen zu müssen. Damit ergeben sich keine stellungsabhängigen Kräfterückwirkungen, wie dies bei Schwenkrollen (wie sie typischerweise bei Bürostühlen zum Einsatz kommen) der Fall wäre. Dank der in der Fahrzeuglängsachse in der Mitte angeordneten Antriebsräder kann sich das Fahrzeug auch an Ort drehen. Für den Antrieb wurden drehzahlgeregelte Gleichstrommotoren eingesetzt. Damit kann ein präzises Einhalten der vorgegebenen Soll-Werte gewährleistet werden.

Die Stromversorgung der Antriebe und Sensoren erfolgt durch mitgeführte Akkus.

Sensoren

Der zurückgelegte Weg wird an den Antriebsrädern mittels Impulsgebern erfasst. Dies setzt natürlich voraus, dass diese Räder keinen Schlupf aufweisen. Es wurden deshalb Hartgummiräder gewählt.

Für die Erkennung von Hindernissen sorgen sechs Ultraschallsensoren. Drei davon «blicken» nach vorne, die restlichen drei sind auf den Seiten bzw. nach hinten angeordnet. Die Sensoren verfügen über eine Reichweite von etwa einem Meter und weisen einen Durchmesser der Messkeule von ungefähr 10 cm auf. Damit kann beim Vorwärtsfahren die gesamte Fahrzeugbreite abgedeckt werden, das heisst, auch schmale Hindernisse werden erkannt. Da das Fahrzeug an Ort drehen kann und nicht viel länger als breit ist, bewegt es sich in den allermeisten Fällen vorwärts, so dass die auf der Seite und hinten angeordneten Sensoren nur in Ausnahmesituationen zum Einsatz kommen.

Ein Problem beim Einsatz von Ultraschallsensoren ist, dass sie sich gegenseitig beeinflussen können. Wenn ein Sensor das Echo eines anderen erfasst, berechnet er einen völlig falschen Objektabstand. Deshalb müssen die Sensoren bei der Aussendung ihrer Signale synchronisiert oder gegeneinander abgeschirmt werden.

Rund um das Fahrzeug sind zusätzlich Stossstangen mit Mikroschaltern angebracht, die bei Berührung eines Objektes die Antriebe unmittelbar ausschalten. Diese können jedoch nur ansprechen, wenn vorher die Ultraschallsensoren ein Hindernis nicht erkannt haben – dienen also nur als letzte «Notbremse».

Der für die Kursregelung notwendige Kontrastsensor wurde an einer Parallelogrammführung aufgehängt. Damit bleibt auch beim Überfahren von Bodenunebenheiten und Einfedern einzelner Räder aufgrund von Schlägen der Abstand zwischen Sensor und Boden praktisch konstant, was für eine gute Regelung unumgänglich ist.

Fahrzeugüberwachung

Für die Steuerung und Regelung wird auf dem Fahrzeug ein Laptop-Rechner mitgeführt. Dem Nachteil des schweren und grossen Rechners steht der Vorteil der einfachen Bedienung und Programmänderung insbesondere in der Erprobungsphase gegenüber. Der Rechner erhält die Signale von den Sensoren über eine Analog/Digital-Wandlerkarte (PCMCIA) mit 12-Bit-Auflösung. Über dieselbe Karte werden auch die digitalen Eingänge von den Mikroschaltern erfasst. Die analogen Ausgänge werden über eine zweite PCMCIA-Karte an die Antriebselektronik weitergegeben.

Die Programmierung der Fahrzeugüberwachung und der Regelalgorithmen erfolgte in der Sprache C++.

Kursregelung

Die Aufgabe des Fahrzeugs Pathfinder besteht darin, einer am Boden aufgezeichneten Spur zu folgen. Die Spur enthält sowohl gerade wie auch gekrümmte Teilstücke. Des weiteren ist der Pathfinder in der Lage, Kreuzungen zu erkennen und nach einem vorprogrammierten Schema den Kurs ohne Zwischenhalt abzufahren.

Die Regelung des autonomen Fahrzeuges muss mehrere Schlüsselsituationen beherrschen. Die geforderten Bedingungen sind:

- Erkennung der Spur und Regelung der Spurverfolgung
- Erkennung von Kreuzungen
- programmierbarer Speicher für das Kursprogramm

Regelungskonzept

Das Fahren entlang des Striches wird ermöglicht, indem mittels eines optischen Kontrastsensors die Helligkeit der Bodenfläche erfasst und von der Kursregelung auf einem konstanten Wert (Soll-Wert) gehalten wird.

Ändert sich infolge einer Kurve oder Kursabweichung des Fahrzeugs dieser Helligkeitswert (Sensorbereich verlässt die Spur), so korrigiert das Fahrzeug entsprechend. Dies setzt voraus, dass die Lage des Pathfinders gegenüber dem Strich bekannt ist. Sie wird demzufolge beim Start als Eingabe verlangt und anschliessend selbständig verfolgt und aktualisiert.

Mit diesem Regelungskonzept erzielt man eine kontinuierliche Regelung, welche die Vorteile eines analogen Ausgangs am optischen Sensor ausnützt. Die Hauptgefahr dieses Prinzips liegt darin, dass bei einer engen Kurve nicht schnell

genug korrigiert werden kann und der Sensorbereich den Strich nach links bzw. rechts verlässt. Durch die fixierte Korrekturrichtung dreht sich das Fahrzeug dann um 180 Grad oder fährt orientierungslos im Kreis.

Idee für die Kreuzungserkennung

Um Kreuzungen erkennen zu können, muss der Sensor einen bestimmten, einmaligen Zustand erreichen: eine binäre Schaltschwelle. Als Lösung bieten sich die Extremwerte des Erfassungsspektrums an. Für den Pathfinder wurde der untere Grenzwert verwendet, indem vor den Kreuzungen ein stark lichtabsorbierendes Material in den Fahrweg eingebaut wurde. Der Kontrasttaster empfängt beim Überfahren dieser Markierung ein Minimalsignal und initialisiert den Kreuzungswechsel. Der Algorithmus wird je nach vorprogrammierter Richtung entsprechend gewählt und das Fahrzeug wenn nötig zum Spurwechsel bewegt.

Spursensor

Die Anforderung an ein optisches Sensorsystem besteht darin, den Farb- oder Helligkeitsunterschied zwischen den Komponenten Boden und Spurlinie zu erfassen und einen verrechenbaren Wert zu generieren. Die dafür in Frage kommenden Sensoren sind der Farb- oder der Kontrasttaster.

Sie arbeiten nach dem Prinzip der Reflexionsmessung. Das Trägerlicht (LED rot oder grün, IR-Licht, Laserstrahl oder Weisslichtlampe) wird vom Sensor ausgestrahlt und von der Markierung zurückgeworfen. Zur Erhöhung der Systemempfindlichkeit wird das Lichtbündel fokussiert gesendet und erzeugt in der Schärfeebene (Tastweite) einen Lichtfleck. Die Remission dieser Fläche wird im Taster ausgewertet und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Mit Kontrasttastern können Grauwertstufen unterschieden werden. Sie sind in der Lage, Kontrastmarkierungen zu lesen. Farben unterscheiden sich im Grauwertspektrum durch ihren Helligkeitswert. Somit ist für einen Kontrasttaster nicht der Farbton, sondern dessen Grauwert entscheidend. Die technischen Daten des eingesetzten Sensors sind in Tabelle I zusammengefasst.

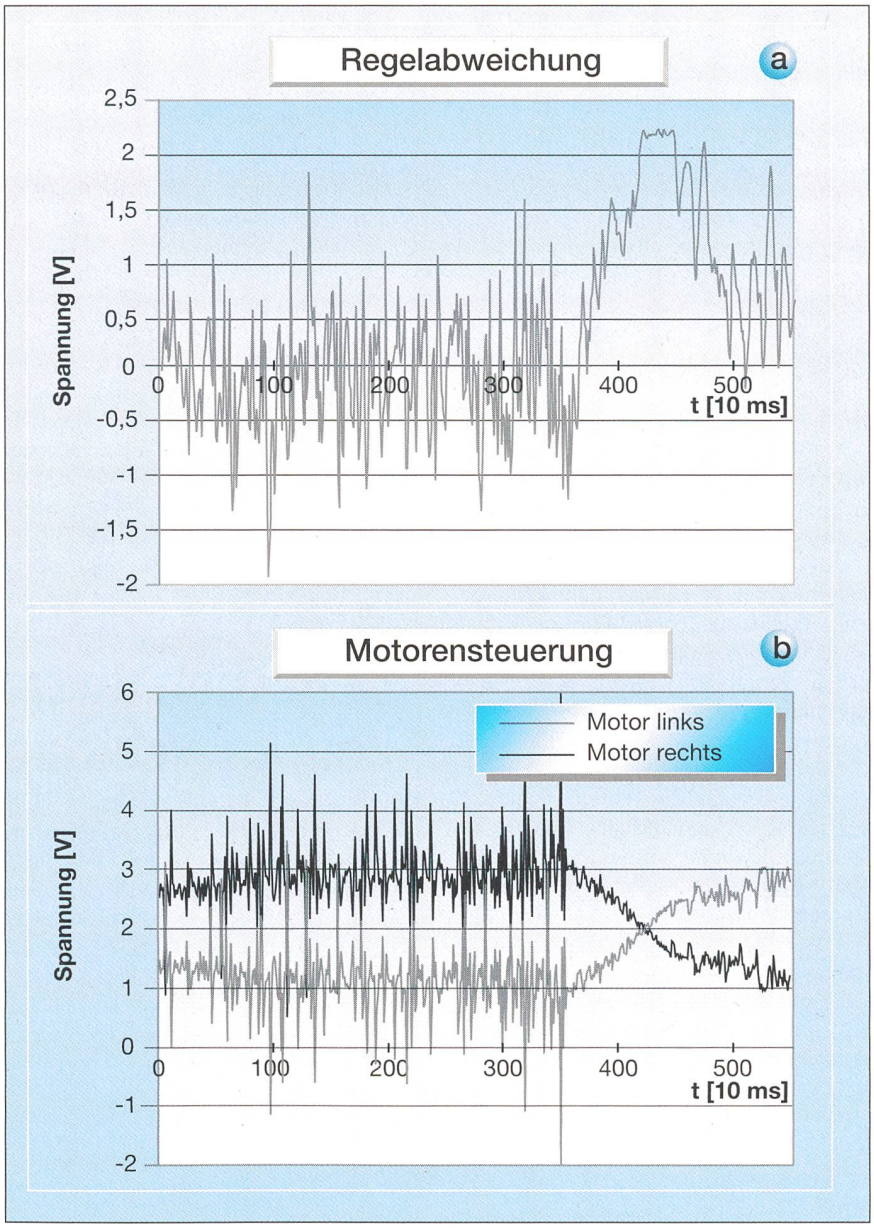

Bild 2 Regelabweichung und Motorensteuerung beim Übergang von einem Radius von 50 cm auf 30 cm (1 V entspricht einer Regelabweichung von 1,3 mm)

Regelung

Der Kontrasttaster erfasst den Helligkeitswert am Boden. Dieser wird von einem durch vorgängige Messungen bestimmten Soll-Wert subtrahiert, was die Regelabweichung ergibt. Der Soll-Wert repräsentiert den Helligkeitswert, bei welchem der Sensor in der Mitte des Übergangs zwischen Strich und Boden steht.

Die gemessene Abweichung wird mit dem Regelalgorithmus verrechnet und ergibt als Stellgrösse eine Korrekturgeschwindigkeit, welche dem einen Rad zur Fahrgeschwindigkeit addiert und dem anderen subtrahiert wird. Die dadurch entstehende Drehung des Fahrzeuges wirkt der Regelabweichung entgegen.

Welchem Rad die Korrekturgeschwindigkeit addiert und welchem sie subtrahiert wird, ist von der Lage des Gefährtes abhängig. Ist es auf der rechten Seite des Striches, so muss die Korrektur bei zu kleiner Helligkeit (Strich verlassen) nach links erfolgen; auf der linken Seite dementsprechend nach rechts. Es sind in beiden Fällen die gleichen Algorithmen zu gebrauchen (lediglich das Vorzeichen der Korrektur ändert).

Tabelle I Technische Daten des eingesetzten Sensors

Tastweite	18 ± 2 mm
Lichtfleck	ca. 2 mm × 8 mm
Lichtart	rote (650 nm) oder grüne (560 nm) LED
Fremdlichteinfluss	kompensiert
Analoger Ausgang	0 ... 6 VDC
Ansprechzeit	50 µs

Die Regelung wurde mit einem PID-Algorithmus durchgeführt. Im kontinuierlichen Fall lautet die Gleichung:

$$y = K_p \left(x_d + \frac{1}{T_N} \int x_d \, dt + T_V \frac{dx_d}{dt} \right) \quad (1)$$

Für den zeitdiskreten Fall ergibt sich daraus:

$$y_k = y_{k-1} + K_p \left(x_{dk} - x_{dk-1} + \frac{T}{T_N} x_{dk-1} \right) + K_p \left(\frac{T_V}{T} \left(x_{dk} - 2x_{dk-1} + x_{dk-2} \right) \right) \quad (2)$$

wobei x die Regelabweichung, y die Stellgrösse und K_p, T_N und T_V Parameter des Reglers sind.

Als erste Näherung für die Reglerparameter dienten Werte nach dem Verfahren von Takahashi. Diese führten jedoch nicht in allen Betriebszuständen zu stabilem Verhalten, weshalb eine Nachoptimierung auf einer «Normstrecke» (gerade Linie, eine 180°-Kurve und eine S-Kurve) durchgeführt wurde. Mit der Geraden konnten die statischen und mit der Kurve die dynamischen Regeleigenschaften bestimmt werden. Der diskrete PID-Regler lieferte insgesamt die besten Ergebnisse (Bild 2).

Das Testen der Fahreigenschaften diente dazu, für verschiedene Kurven die maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeiten zu ermitteln, mit denen das autonome Fahrzeug sicher das Ziel erreicht.

Für folgende Kurvenradien gelten die angegebenen Maximalgeschwindigkeiten:

Kurven bis Radius 40 cm: v_{max} = 40 cm/s
Kurven bis Radius 30 cm: v_{max} = 30 cm/s
Kurven bis Radius 25 cm: v_{max} = 20 cm/s

Bei Kreuzungen beträgt die maximal erreichte Geschwindigkeit 20 cm/s für einen sicheren Spurwechsel.

Einflüsse der Umgebung

Der wichtigste Umgebungseinfluss ist die Materialbeschaffenheit der verwendeten Spurmarkierung. Diese soll möglichst hell sein; am besten sogar spiegelnde Eigenschaften aufweisen. Auch muss der Kontrast zwischen Bodenfläche und Markierung möglichst gross sein. Weitere Faktoren, wie zum Beispiel die Umgebungshelligkeit, bewirkten keine negativen Effekte.

Zusammenfassung

An diesem Beispiel konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit einem einzigen Sensor zuverlässig einer vorgegebenen Linie oder Markierung zu folgen. Die Parameter des linearen Regelalgorithmus konnten über einen grösseren Bereich der Fahrzeuggeschwindigkeit unverändert gelassen werden, ohne dass deshalb Stabilitätsprobleme auftraten. Mit demselben Sensor konnten Kreuzungsmarkierungen erkannt und Abzweigungen richtig befahren werden. Der Aufwand für das Anbringen von Markierungen ist sehr klein. Die Fahrspur kann deshalb problemlos den jeweils aktuellen Bedürfnissen angepasst werden. Bei Verwendung von Sensoren mit grösserem räumlichen Messbereich lassen sich entsprechend höhere Fahrgeschwindigkeiten erzielen.

La gestion du cap pour un véhicule autonome

Il y a plus de cent ans, des véhicules automoteurs (automobiles) prennent le relais des hommes et des animaux qui assumaient jusqu'à ce jour les tâches de transport et de mouvement. Les tâches intelligentes de pilotage et de conduite sont dès lors l'apanage des hommes. Nous disposons aujourd'hui de moyens techniques qui permettent de penser à un nouveau niveau d'automatisation, dans lequel les automobiles se muent en véhicules autonomes, qui s'orientent de manière indépendante dans un milieu inconnu ou changeant. L'article décrit la structure et la régulation d'un véhicule autonome capable de suivre automatiquement un marquage routier et de bifurquer aux croisements dans une direction préprogrammée.

Der SEV auf dem Internet / L'ASE sur l'Internet:
http://www.sev.ch