
Kontinuierliche Verhaltenssteuerung eines autonomen Fahrzeugs in dynamischer Umgebung

Dem Fachbereich Informatik
der Universität Kaiserslautern
vorgelegte

Dissertation

zur Erlangung des Grades
eines Doktor rer. nat.

von

Dirk Reichardt

Januar 1996

Vorwort

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Konzept zur autonomen Fahrzeugführung für Kraftfahrzeuge auf Autobahnen sowie dessen Realisierung. Sie entstand in der Forschungsabteilung F1M/IA der Daimler-Benz AG, in der ich während dieser Arbeit tätig war.

Das hier vorgestellte Konzept stellt Methoden zur Verfügung, die anhand von Sensorinformationen eine Situationsbeschreibung aufbauen und adäquate Fahrmanöver ermitteln, die dann vom Fahrzeug ausgeführt werden. Das Versuchsfahrzeug ist dadurch in der Lage, im realen Autobahnverkehr ohne Eingriff des menschlichen Fahrers auf der Straße zu fahren, Sicherheitsabstände einzuhalten und sogar selbständig zu überholen und Ausweichmanöver einzuleiten.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Steuerungssystem ist Bestandteil des Versuchsfahrzeugs VITA II (*Vision Technology Application*) der Daimler-Benz AG, das in der Endphase des EUREKA Projekts PROMETHEUS als Demonstrator für autonomes Fahren mittels Bildverarbeitung aufgebaut worden ist.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen, die am Aufbau von VITA II beteiligt waren, für die sehr gute und erfolgreiche Zusammenarbeit bedanken. Sie haben es möglich gemacht, die entwickelten Konzepte auch im realen Straßenverkehr zu verifizieren.

Außerdem möchte ich Herrn Metzler und Herrn Hahn sowie allen Kollegen für die sehr gute Arbeitsatmosphäre danken, in der ich mich während der Erstellung meiner Arbeit sehr wohl gefühlt habe.

Zu Dank bin ich auch allen verpflichtet, die mir durch kurzfristiges Durchlesen und Korrigieren von Vorversionen meiner Arbeit geholfen haben.

Bei Herrn Professor Richter und Herrn Professor von Puttkamer möchte ich mich für die Unterstützung bedanken, die mir beim Verfassen meiner Arbeit eine große Hilfe war.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Jens Schick, der durch zahlreiche anregende Diskussionen und durch konstruktive Kritik zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 EINLEITUNG | 1 |
| <hr/> | |
| 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung | 1 |
| 1.2 Eingliederung in das Prometheus Programm | 2 |
| 1.3 Gliederung und Überblick | 5 |
| <hr/> | |
| 2 AUTONOMES FAHREN | 7 |
| <hr/> | |
| 2.1 Aufbau eines autonomen mobilen Systems | 7 |
| 2.1.1 Das Sensorsystem | 8 |
| 2.1.2 Das Aktorsystem | 10 |
| 2.1.3 Das Kontrollsystem | 10 |
| 2.1.4 Das Kommunikationssystem | 11 |
| 2.2 VITA II als Plattform für autonomes Fahren | 12 |
| 2.2.1 Hardware- und Softwarearchitektur | 14 |
| 2.2.1.1 Anwendungsrechner | 14 |
| 2.2.1.2 Fahrzeugrechner | 16 |
| 2.2.1.3 Plattformrechner | 17 |
| 2.2.2 Das Sensorsystem | 17 |
| 2.2.2.1 Straßenerkennung | 17 |
| 2.2.2.2 Hinderniserkennung | 19 |
| 2.2.2.3 Verkehrszeichenerkennung | 22 |
| 2.2.3 Das Kontrollsystem | 23 |
| 2.2.4 Die Fahrzeugansteuerung | 23 |
| 2.2.5 Das Kommunikationssystem | 24 |
| <hr/> | |
| 3 AUTONOME VERHALTENSSTEUERUNG | 27 |
| <hr/> | |
| 3.1 Abgrenzung der Diskurswelt | 32 |
| 3.2 Gefahrengebirge und elektrisches Feld | 35 |
| 3.2.1 Der generalisierte Potentialfeldansatz | 36 |
| 3.2.1.1 Die generalisierte Potentialfeldmethode nach Krogh | 37 |
| 3.2.1.2 Diskussion von Erweiterungen der Potentialfeldmethode | 39 |
| 3.2.2 Definition einer Gefahrenkarte | 40 |
| 3.2.3 Die Gefahrenkarte als Grundlage der Verhaltenssteuerung | 41 |
| 3.2.3.1 Modellierung der Straße | 41 |
| 3.2.3.2 Modellierung anderer Verkehrsteilnehmer | 43 |
| 3.2.3.3 Modellierung von Verkehrsregeln | 45 |
| 3.2.3.4 Modellierung von Fahrerintentionen | 46 |
| 3.2.4 Verknüpfung der Teilkarten | 47 |
| 3.2.5 Interpretation der Gefahrenkarte als elektrisches Feld | 48 |
| 3.2.6 Kritische Betrachtung des Ansatzes | 49 |

| | |
|--|------------|
| 3.3 Das Verhaltensmusterkonzept | 52 |
| 3.3.1 Erklärungsmodelle des Fahrverhaltens | 53 |
| 3.3.2 Architektur des Verhaltensmusterkonzepts | 56 |
| 3.3.3 Wissensrepräsentation und Inferenz | 58 |
| 3.3.3.1 Fahrer- und Fahrzeugparameter | 59 |
| 3.3.3.2 Aufbau eines Verhaltensmusters | 61 |
| 3.3.3.3 Repräsentation von Handlungsbeschreibungen | 62 |
| 3.3.3.4 Repräsentation von Abhängigkeiten zwischen Verhaltensmustern | 64 |
| 3.3.3.5 Algorithmus zur Verhaltenssteuerung | 65 |
| 3.3.4 Verhaltensmuster für die Fahrzeugführung auf Autobahnen | 72 |
| 3.3.4.1 Verhaltensmuster für Notreaktionen | 73 |
| 3.3.4.2 Basisverhaltensmuster | 80 |
| 3.3.4.3 Verhaltensmuster für schematisierte Handlungen | 82 |
| 3.3.4.4 Integration der Fahrerintentionen | 86 |
| 3.3.4.5 Verknüpfung der Verhaltensmuster | 87 |
| 3.4 Aufbau einer Situationsbeschreibung aus Sensordaten | 88 |
| 3.4.1 Aufgaben und Lösungsmethoden | 88 |
| 3.4.1.1 Auftretende Fehlerarten | 89 |
| 3.4.1.2 Die Fusionsaufgabe | 90 |
| 3.4.1.3 Glättung von Sensordaten | 92 |
| 3.4.2 Architektur des Situationsverwaltungssystems | 94 |
| 3.4.3 Konzeptrahmen als Repräsentationsstruktur | 96 |
| 3.4.3.1 Straßenkonzeptrahmen | 97 |
| 3.4.3.2 Verkehrszeichenkonzeptrahmen | 98 |
| 3.4.3.3 Hinderniskonzeptrahmen | 99 |
| 3.4.4 Verwaltung des Szenenspeichers | 100 |
| 3.4.4.1 Der Straßenverwaltungsprozeß | 101 |
| 3.4.4.2 Der Verkehrszeichenverwaltungsprozeß | 102 |
| 3.4.4.3 Der „Matching“-Prozeß | 104 |
| 3.4.4.4 Der „Set & Forget“- Prozeß | 106 |
| 3.4.4.5 Der „Merge & Split“-Prozeß | 109 |
| 3.4.4.6 Der „Filtering & Extrapolation“-Prozeß | 109 |
| 3.4.5 Schemabasierte Situationsanalyse | 111 |
| 3.4.5.1 Anforderungen an ein Fehlermodell | 111 |
| 3.4.5.2 Beispiele kritischer Verkehrsszenen | 112 |
| 3.4.5.3 Erkennung von dynamischen Szenen | 113 |
| 3.4.5.4 Korrektur erkannter Fehler | 118 |
| 3.5 Simulation | 119 |
| 3.5.1 Der Aufbau des Simulationssystems | 120 |
| 3.5.1.1 Die Ein-/Ausgabeverwaltung | 121 |
| 3.5.1.2 Die virtuelle Welt | 123 |
| 3.5.1.3 Die Simulation von Agenten | 124 |
| 3.5.2 Die Simulation von VITA II | 127 |
| 3.5.2.1 Simulation des Sensorsystems von VITA II | 128 |
| 3.5.2.2 Integration des Kontrollsystems von VITA II | 130 |
| 3.5.2.3 Simulation des Aktorsystems von VITA II | 131 |
| 3.5.3 Die Analysehilfsmittel der Simulationsumgebung | 131 |
| 3.5.3.1 Generierung von Eingangsdaten | 131 |
| 3.5.3.2 Darstellung und Auswertung | 132 |

| | |
|--|------------|
| 4 ERGEBNISSE IN SIMULATION UND REALITÄT | 133 |
| <hr/> | |
| 4.1 Ergebnisse im realen Straßenverkehr | 133 |
| 4.1.1 Laufzeitbetrachtungen | 134 |
| 4.1.2 Ergebnisse aus Messfahrten | 134 |
| 4.1.2.1 Randbedingungen bei autonomen Fahrten mit VITA II | 134 |
| 4.1.2.2 Exemplarische Darstellung von Fahrmanövern | 136 |
| 4.2 Simulationsergebnisse | 140 |
| 4.2.1 Beispiel eines Überholvorgangs | 140 |
| 4.2.2 Szenario für Notreaktionen | 142 |
| <hr/> | |
| 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 145 |
| <hr/> | |
| 5.1 Zusammenfassende Kritik | 145 |
| 5.2 Vergleich zu existierenden Verfahren | 148 |
| 5.2.1 Das Kontrollsystem von VaMoRs-P | 148 |
| 5.2.1.1 Zusammenfassung | 149 |
| 5.2.1.2 Vergleich | 150 |
| 5.2.2 Verwandte Arbeiten | 150 |
| 5.3 Autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr von morgen | 151 |
| <hr/> | |
| ANHANG | |
| <hr/> | |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|-----|
| Abbildung 1 | : Der Daimler-Benz Versuchsträger VITA II | 12 |
| Abbildung 2 | : Aufbau des autonomen Fahrzeugs VITA II | 13 |
| Abbildung 3 | : Rechnerarchitektur von VITA II | 14 |
| Abbildung 4 | : Prozessornetzwerk des Anwendungsrechners | 15 |
| Abbildung 5 | : Prozessornetzwerk des Fahrzeugrechners | 16 |
| Abbildung 6 | : Rückwärtige Kameraplattform in VITA II | 18 |
| Abbildung 7 | : Kamerablickwinkel von VITA II | 19 |
| Abbildung 8 | : VisionBumper Kamera in VITA II | 21 |
| Abbildung 9 | : Fächerkamera des LOD-Moduls | 21 |
| Abbildung 10 | : Kommunikationsstruktur in VITA II | 25 |
| Abbildung 11 | : Informations- / Aktionszyklus des autonomen Fahrens | 29 |
| Abbildung 12 | : Koordinatensystem der Diskurswelt | 33 |
| Abbildung 13 | : Potentialfeld $P(x,v)$ mit $v = 12 \text{ m/s}$ und $\alpha = 5 \text{ m/s}^2$ | 38 |
| Abbildung 14 | : Beispiel einer Gefahrenkarte $G_{15,15}$ | 40 |
| Abbildung 15 | : Gefahrenkarte für eine einspurige Straße | 42 |
| Abbildung 16 | : Modellierung einer Straße mit zwei Spuren | 43 |
| Abbildung 17 | : Beispiel einer Sollgeschwindigkeitskurve | 44 |
| Abbildung 18 | : Modellierung eines Hindernisses als Gefahrengelände | 44 |
| Abbildung 19 | : Gefahrenrepräsentation für ein langsamer vorausfahrendes Fahrzeug | 45 |
| Abbildung 20 | : Fahrerkenntlinie zur Einhaltung von Sollgeschwindigkeitsvorgaben | 47 |
| Abbildung 21 | : Fusion einer Teilkarte zur Straßenbeschreibung (a) und einer zur Hindernisbeschreibung (b) mit dem Gewichtsverhältnis 2:3 (c) und 3:2 (d) | 48 |
| Abbildung 22 | : Drei-Ebenen Verhaltensmodell nach Rasmussen [Rasmussen 83] | 55 |
| Abbildung 23 | : Regelkreis "Mensch - Straße - Fahrzeug" nach Hehlen & Huguenin [Huguenin 88] | 56 |
| Abbildung 24 | : Architektur des Kontrollsystems basierend auf Verhaltensmustern | 58 |
| Abbildung 25 | : Basisverhaltensmuster | 63 |
| Abbildung 26 | : Übergangnetz zur Repräsentation von Handlungsabläufen | 64 |
| Abbildung 27 | : Übergangnetz für Notreaktionen | 64 |
| Abbildung 28 | : Gewichtung und Verknüpfung von Verhaltensmustern | 70 |
| Abbildung 29 | : Übersicht über die Notreaktionen | 74 |
| Abbildung 30 | : Modellierung der Fahrerreaktion für das Folgen vorausfahrender Fahrzeuge | 81 |
| Abbildung 31 | : Übersicht über die Verhaltensmuster für schematisierte Handlungen | 83 |
| Abbildung 32 | : Verhaltensmuster und Kantenschemata zum Aufbau eines Inhibitionsnetzes | 86 |
| Abbildung 33 | : Funktionsschaubild des SA-Moduls | 95 |
| Abbildung 34 | : Straßenkonzeptrahmen | 98 |
| Abbildung 35 | : Aufbau des Situationsverwaltungssystems | 101 |
| Abbildung 36 | : Einfache Ähnlichkeitsfunktion für Hindernispositionen | 105 |
| Abbildung 37 | : Ähnlichkeitsfunktion für Verfolgungsfahrten | 106 |
| Abbildung 38 | : Beispiele für Fehlerfälle | 112 |
| Abbildung 39 | : Veranschaulichung unscharfer Begriffe für die Geschwindigkeit | 114 |
| Abbildung 40 | : Automat zur Erkennung von Ereignissen | 117 |
| Abbildung 41 | : Datenflußdiagramm der Simulation | 121 |
| Abbildung 42 | : Straßenmodellierung in der virtuellen Welt | 124 |
| Abbildung 43 | : Datenflußdiagramm für die Agentensimulation | 125 |
| Abbildung 44 | : Datenflußschema der Sensorsimulation | 129 |
| Abbildung 45 | : Benutzeroberfläche der Simulation | 132 |
| Abbildung 46 | : Messung von Vision Bumper | 135 |
| Abbildung 47 | : Automatischer Spurwechsel des VITA II Fahrzeugs | 137 |
| Abbildung 48 | : Fusion der Entfernungsmessung von CT und ODT | 138 |
| Abbildung 49 | : Schätzung der Hindernisgeschwindigkeit aus Messungen | 138 |
| Abbildung 50 | : Automatische Abstandhaltung | 139 |
| Abbildung 51 | : Abbremsen auf ein langsames Fahrzeug | 140 |
| Abbildung 52 | : Distanzverläufe der Hindernisse eines Simulationslaufs | 141 |
| Abbildung 53 | : Aktivierung des Überhol-Verhaltensmusters | 141 |
| Abbildung 54 | : Geschwindigkeitsverlauf für das autonome Fahrzeug | 142 |
| Abbildung 55 | : Simulierter Überholvorgang | 142 |
| Abbildung 56 | : Notreaktionsszenario | 143 |
| Abbildung 57 | : Steuervorgabe für die laterale Position | 144 |
| Abbildung 58 | : Notbremsung bis zum Stillstand | 144 |

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Konzept zur Steuerung eines autonomen Fahrzeugs auf Autobahnen zu entwickeln und dieses anhand des Versuchsfahrzeugs VITA II (Vision Technology Application) der Daimler Benz AG auch zu realisieren.

Der hier vorgestellte Ansatz ist motiviert durch Erklärungsmodelle des menschlichen Fahrverhaltens sowie durch die Methode der künstlichen Potentialfelder zur Steuerung autonomer mobiler Roboter. Der direkte Zusammenhang zwischen dem Fahrverhalten und der subjektiv empfundenen Gefahr einer Verkehrssituation, bzw. des Risikos, das sich aus der Situation ergibt, wird genutzt, um ein Entscheidungskriterium für automatische Fahrmanöver zu erhalten.

Jedem Element der Umgebung wird ein Gefahrenwert zugeordnet. Aus dieser Gefahrenrepräsentation der Verkehrssituation werden dann Fahrzeugaktionen abgeleitet, die unter Berücksichtigung der Fahrerintentionen eine Gefahrenminimierung anstreben.

Zwei Ansätze werden vorgestellt, denen unterschiedliche Gefahrenrepräsentationen zugrunde liegen. In einer ersten Untersuchung wird eine Gefahrenkarte der Umgebung aufgebaut und Gefahr und Reaktion direkt gekoppelt, so daß sich die Steuerungsaufgabe als Pfadsuche-Problem in einem Gefahrengebirge darstellt. Der zweite Ansatz berücksichtigt durch diese Untersuchung gewonnene Erkenntnisse und trennt zwischen Gefahr und Reaktion. Das Wissen über Verhaltensweisen und Gefahren ist hier in konkurrierenden Verhaltensmustern repräsentiert. Diese Verhaltensmuster entsprechen Handlungsschemata, die Verhaltensweisen in verschiedenen Ebenen kognitiver Inanspruchnahme eines Fahrers beschreiben. Ein Inhibitionsnetzwerk verbindet die Verhaltensmuster und regelt den Grad ihrer Aktivierung über eine Risikoabwägung.

Mit dem Einsatz der Verhaltenssteuerungsmethoden im realen Umfeld ergibt sich die Problematik der Verarbeitung fehlerbehafteter, unvollständiger und inkonsistenter Information, die von den Sensormodulen des Versuchsfahrzeugs VITA II geliefert wird. Der zweite Teil der Arbeit befaßt sich daher mit einer Methode zur Sensorfusion und Filterung der durch Sensormodule erfaßten Umgebung.

Zur Vermeidung von Risiken wird eine Simulationsumgebung speziell für das Versuchsfahrzeug entwickelt und eingesetzt, in der beliebige Szenarien gestellt werden können, um die Reaktionen des Fahrzeugs zu testen.

Abstract

This thesis discusses an approach to automatic vehicle guidance on a motorway. The realization of the system has taken place on the Daimler-Benz research vehicle VITA II (Vision Technology Application).

The approach presented here is motivated by psychological models of human driving behaviour and by the artificial potential field approach which is known from robotics.

The close connection between driving behaviour and the subjective risk of a traffic situation is used to introduce a decision criterion for driving manoeuvres. Each element of the traffic scene is associated with a risk value. This leads to a risk based representation of traffic situations which is used to generate actions that intend to minimise the risk.

Two approaches are presented which are based on different risk representations. The first approach builds a risk map for representation of the environment. By computing the risk value and the reaction the vehicle guidance task is reduced to a search problem.

The second approach integrates the gained experience and separates risk and reaction. Knowledge about the driver's behaviour is represented by competing behavioural patterns. Behavioural patterns correspond to action schemes. They represent driving behaviour of different cognitive levels together with a risk value that describes the necessity of their execution. A set of behavioural patterns is arranged in an inhibition network structure. This network is used to combine their results with regard to their associated risk. The objective is the computation of a command vector for the autonomous vehicle.

In real world application the main problem is the noisy input data from different image processing modules. This renders autonomous driving very difficult. The main task to solve this problem is to build up a consistent situation representation in real-time. One part of this thesis deals with this problem and presents a sensor fusion method designed for VITA II.

As a supporting work a simulation system for system development and testing has been built up. It contains models of the used sensors and deterministic models of vehicle dynamics and provides an appropriate test bed for the subsequent use of the developed programs in real traffic.

Abkürzungen

| | |
|---------------|--|
| AD/DA-Wandler | Analog D igital/ D igital A nalog - Wandler |
| AHS | A utomated H ighway S ystems |
| AICC | A utonomous I ntelligent C ruise C ontrol |
| AMR | A utonomer M obiler R oboter |
| AMV | A utonomous M obile V ehicle |
| AWR | A nwendungs r echner |
| BC | B ehaviour C ontrol |
| C40 | TMS320 C40 |
| CAN-Bus | C ontroller A rea N etwork |
| CCD-Kamera | C harge C oupled D evice |
| CED3 | C ommon E uropean D emonstrators |
| CT | C ar T rack |
| DDB | D ynamic D ata B ase |
| FZG | Fahrzeug |
| I/O | I nput/ O utput |
| LOD | L ateral O bstacle D etection |
| MON | M onitoring Modul |
| ODT | O bstacle D etection and T racking. |
| PROMETHEUS | P rogramme for a E uropean T raffic with H ighest E fficiency and U nprecedented S afety |
| RDT/ RT | R oad D etection and T racking / R oad T racking |
| REC | R ecorder Modul |
| SA | S ituation A ssessment |
| SPARC | S calable P rocessor A rchitecture |
| STS | S tate T ransition S ystem |
| TIP | T ransputer I mage P rocessing |
| TLC | T ime to L ine C rossing |
| TSR | T raffic S ign R ecognition |
| TTC | T ime to C ollision |
| VB | V ision B umper |
| VC | V ehicle C ontrol |
| VITA | V ision T echnology A pplication |

Mathematische Symbole

| | |
|--------|---------------------------|
| R | Reelle Zahlen |
| N | Natürliche Zahlen |
| Pot(M) | Potenzmenge einer Menge M |