



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

Ausarbeitung Anwendungen 2 -  
SoSe 2009  
Johann Heitsch

Koordinierung von autonomen Fahrzeugen

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung in das Themengebiet</b>	<b>3</b>
1.1 Zentrale Koordination . . . . .	4
1.2 Dezentrale Koordination . . . . .	4
<b>2 Vorstellung vergleichbarer Arbeiten</b>	<b>5</b>
2.1 Anbieter kommerzieller Produkte . . . . .	5
2.2 Kommunikationstechniken . . . . .	6
2.3 Sensortechniken . . . . .	7
2.3.1 Sensoren . . . . .	7
2.3.2 Sensorfusion . . . . .	8
2.4 Forschungsgruppen . . . . .	9
2.4.1 TR 28 . . . . .	9
2.4.2 PReVeNT . . . . .	10
2.5 Algorithmen . . . . .	11
2.5.1 Conflict-Free Motion of Multiple Mobile Robots Based on Decentralized Motion Planning and Negotiation . . . . .	11
2.5.2 A Complete and Scalable Strategy for Coordinating Multiple Robots Wi- thin Roadmaps . . . . .	12
<b>3 Abgrenzung zu eigenen Arbeitszielen und / oder Methoden</b>	<b>13</b>
<b>4 Zusammenfassung</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>

### **Kurzzusammenfassung**

In dieser Ausarbeitung wird das Umfeld des Forschungsgebietes der Koordinierung von autonomen Fahrzeugen beschrieben. Dabei liegt der Fokus jedoch nicht auf den Algorithmen für die Koordinierung, sondern auf Projekten und Forschungen, welche für eine dezentrale Koordination notwendig sind. Es geht somit um die Erstellung von lokalen Karten und die Entscheidungsfindung anhand dieser.

## **1 Einführung in das Themengebiet**

Die Anzahl autonomer Fahrzeuge nimmt derzeit immer weiter zu. In der Industrie werden diese Fahrzeuge häufig für den Transport von Waren u.ä. genutzt. So transportieren z.B. in der Gläsernen Manufaktur von Volkswagen autonome Fahrzeuge Arbeitsmaterialien und Werkstücke zu den Arbeitsplätzen der Mitarbeiter (siehe [forum-vw \(2009\)](#)).

In der Wissenschaft hingegen werden andere Typen von autonomen Fahrzeugen erforscht. Hierbei ist zumeist der Fokus auf Fahrzeugen, welche sich autonom in Städten zurechtfinden sollen (vgl. [cog \(2009\)](#)).

In beiden Ansätzen, sowohl in der industriellen Nutzung, als auch bei den Forschungsansätzen gibt es das Problem der Koordinierung. Bei Transportsystemen mit autonomen Fahrzeugen kommen derzeit zentrale Steuerungen zum Einsatz. Diese kommen jedoch an ihre Grenzen (vgl. Kapitel 1.1). Abhilfe können hier dezentrale Ansätze schaffen. Die Grundsätze einer dezentralen Koordinierung sind in Kapitel 1.2 beschrieben.

Die sich in der Forschung befindenden autonomen Fahrzeuge benötigen grundsätzlich immer eine dezentrale Koordinierung. Dieses resultiert daraus, dass es keine Möglichkeit gibt, alle Fahrzeuge zentral zu koordinieren. Dieses wird auch gar nicht angestrebt.

Die Forschung bietet somit viel Wissen über das autonome Verhalten von Fahrzeugen, welche z.T. auf die Anwendungen in der Industrie übertragen werden können.

Unter der Koordination im Kontext dieser Ausarbeitung wird die Pfadplanung verstanden. Diese Pfadplanung hat das Ziel, die Fahrzeuge ohne Kollisionen und möglichst auf dem kürzestem Weg an ihre Ziele zu bringen.

Diese Ausarbeitung befasst sich mit den Techniken, die benötigt werden, um eine Koordinierung von Fahrzeugen, die industriell genutzt werden, zu ermöglichen. Dabei werden Projekte vorgestellt, die von Interesse bei der Erstellung und Auswertung von lokalen Karten sind.

## 1.1 Zentrale Koordination

Bei der zentralen Koordination werden die Routen für alle Fahrzeuge auf einem Rechner berechnet. Dazu benötigt die zentrale Recheneinheit alles Wissen über das Umfeld, in dem sich die Fahrzeuge bewegen. Dieses sind zum einen die statische Struktur der Umgebung, wie z.B. Wände, Regale und andere statische Hindernisse, zum anderen die dynamischen Hindernisse, wie z.B. Blockaden auf Strecken durch herumliegende Gegenstände. Zudem muss die Recheneinheit jederzeit über die genaue Position der einzelnen Fahrzeuge Bescheid wissen. Handelt es sich bei den Fahrzeugen um nicht gleichartige und/oder um nicht holonome Fahrzeuge, so muss der Planer für jedes Fahrzeug ein Fahrzeugmodell kennen, das als Grundlage für die Bewegungsplanung dient.

Anhand dieser Informationen kann der zentrale Planer für alle Fahrzeuge die optimale Route berechnen.

Jedoch ist diese Berechnung sehr aufwändig. Die Komplexität wächst mit der Anzahl der Fahrzeuge sehr stark an. Zwar kann der Anstieg mit entsprechenden Algorithmen verringert werden, jedoch ist der Aufwand auch damit noch zu hoch.

Zu beachten ist auch, dass die Berücksichtigung aller dynamischen Eigenschaften der Umgebung und der Fahrzeuge die Komplexität der Berechnung weiter steigert.

Für die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und dem zentralen Planer ist zudem eine Infrastruktur notwendig, welche in der Regel in ihrer Ausbreitung beschränkt ist.

Der Vorteil an der zentralen Lösung ist, dass es Algorithmen gibt, die *komplett* sind. Dadurch lässt sich für jedes mögliche Problem auch eine Lösung finden. Auch die Berechnung einer *optimalen* Lösung ist möglich.

## 1.2 Dezentrale Koordination

Im Gegensatz zu dem zentralen Ansatz sollen die Fahrzeuge bei dem dezentralen Ansatz vollkommen autonom agieren. Eine zentrale Stelle ist maximal für die Koordinierung und Verteilung von Aufträgen nötig, auf diese wird aber in dieser Ausarbeitung nicht weiter eingegangen.

Der grobe Ansatz, der auch in dieser Ausarbeitung weiter verfolgt wird, ist, dass die Fahrzeuge eigenständig anhand einer Karte ihre Route von ihrer aktuellen Position zu ihrem Zielort berechnen. Dabei berücksichtigen sie nur dynamische Hindernisse, welche ihnen derzeit bekannt sind. Andere Fahrzeuge werden in die Routenplanung nicht miteinbezogen.

Ist die Route berechnet, begibt sich das Fahrzeug auf dieser Route zu seinem Ziel. Trifft dieses dabei auf andere Fahrzeuge oder dynamische Hindernisse, so ist eine lokale Umplanung

der Route notwendig. Hierzu kann das Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen, mit denen es vermeindlich im Konflikt steht, interagieren. Wenn es sich um Hindernisse handelt, sucht sich das Fahrzeug eigenständig einen Weg um das Hindernis.

Da keine zentrale Instanz vorhanden ist, ist auch keine Netzwerkinfrastruktur notwendig. Jedoch benötigen die Fahrzeuge mehr Wissen über das lokale Umfeld. So müssen Fahrzeuge sich gegenseitig erkennen, bzw. mögliche Kollisionen und Deadlocks möglichst früh erkennen. Zudem brauchen die Fahrzeuge die Fähigkeit, eigenständig in einem z.T. unbekanntem Gebiet zu navigieren.

Die Vorteile dieser Lösung sind die geringere Komplexität der Routenberechnung, da diese von jedem Fahrzeug eigenständig vorgenommen wird und somit unabhängig von der gesamten Anzahl der Fahrzeuge ist. Die Fahrzeuge können bei der Berechnung ihre nicht holonomen Eigenschaften und Dynamik miteinbeziehen. Der Nachteil ist jedoch, dass Kollisionen und Deadlocks früh und dezentral erkannt werden und Strategien zur Umplanung vorhanden sein müssen.

## 2 Vorstellung vergleichbarer Arbeiten

### 2.1 Anbieter kommerzieller Produkte

Allein auf dem deutschen Markt gibt es zahlreiche Anbieter von fahrerlosen Transportsystemen. Diese Systeme bestehen aus diversen autonomen (fahrerlosen) Fahrzeugen und einer zentralen Steuereinheit.

Zu erwähnen sind hier die Firmen STILL GmbH ([still \(2009\)](#)), E&K Automation ([ek \(2009\)](#)) und Frog AGV Systems GmbH ([frog \(2009\)](#)).

Jede dieser Firmen bietet Systeme an, mit denen Lager automatisiert werden können. Hierzu sind Fahrzeuge jeglicher Größen im Angebot. Koordiniert werden die Fahrzeuge durch zentrale Koordinierungssysteme, welche nicht nur die Fahrzeuge koordinieren können, sondern auch die Fähigkeiten besitzen, mit diversen anderen Aktoren, wie z.B. Fahrstühlen und Türen, in der Umgebung zu interagieren.

Einige wichtige Details über die Produkte werden in den weiteren Kapiteln beschrieben.

## 2.2 Kommunikationstechniken

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben ist, wird unter Umständen für eine lokale Kollisionsvermeidung eine Kommunikation zwischen den im Konflikt stehenden Fahrzeugen benötigt. Ansätze, welche ohne Kommunikation auskommen, werden im weiteren nicht betrachtet.

Um zwischen Fahrzeugen kommunizieren zu können, werden Funkübertragungen verwendet (Festag u. a. (2008)).

Das Car2Car Communication Consortium (c2ccc (2007)) beschäftigt sich mit der Kommunikation zwischen Fahrzeugen. Dabei liegt der Fokus auf der Erstellung und der Verbreitung eines Industrie- Standards für die Car2Car Kommunikation, basierend auf W-Lan Komponenten. Anwendung soll dieser Standard in Sicherheitsanwendungen finden. Um Bandbreiten garantieren zu können, soll ein exklusiver Frequenzbereich für die sicherheitskritischen Anwendungen reserviert werden.

Es sind unter anderem folgende Szenarios definiert worden:

- Safety
  - Cooperative Forward Collision Warning
  - Pre-Crash Sensing/Warning
  - Hazardous Location V2V Notification
- Traffic Efficiency
  - ...
- Infotainment and Others
  - ...

Im Szenario *Safety* geht es um Anwendungen, in welchen die Fahrer der Fahrzeuge bzw. die Fahrzeugsysteme vor Gefahren gewarnt werden sollen. In diesen Anwendungen spielt unter anderem die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen eine große Rolle. Diese Art von Kommunikation ist für die lokale Kollisionsvermeidung von hoher Bedeutung, da hier eine zuverlässige Kommunikation zwischen Fahrzeugen, welche sich in einem Konflikt befinden, zustande kommen muss. Zudem ist ein ausreichendes Wissen über die Umwelt nötig.

In dem Manifest des Car2Car Communication Consortiums werden die Anforderungen an eine solche Kommunikation beschrieben, jedoch noch keine expliziten Lösungen der einzelnen Probleme dargestellt.

Die Arbeiten [Boban u. a. \(2008\)](#), [Choi u. a. \(2008\)](#) und [Harsch u. a. \(2007\)](#) beschäftigen sich unter anderem mit dem Routing in VANETs<sup>1</sup>. Es besteht häufig die Anforderung einen Multicast in bestimmte Regionen zu versenden, um dort befindliche Fahrzeuge zu warnen. Diese Art von Multicast wird Geocast genannt. Da sich bei der lokalen Kollisionsvermeidung jedoch die Fahrzeuge nah beieinander befinden, wird ein Geocast nicht zwingend erforderlich sein. Er kann jedoch Abhilfe bei der Identifizierung von Fahrzeug und bei der Deadlockerkennung schaffen.

Die Präsentation [Kosch \(2006\)](#) gibt einen weiteren Überblick über Projekte, welche sich mit der Car2Car Kommunikation beschäftigen.

## 2.3 Sensortechniken

### 2.3.1 Sensoren

Für den Aufbau einer lokalen Karte, die für die Positionsbestimmung in einer globalen Karte und für die lokale Routenplanung benötigt wird, sind diverse Sensoren nötig. Im Folgenden werden einige Sensoren beschrieben, welche derzeit in der Industrie und Forschung genutzt werden.

**Odometrie:** Hierbei handelt es nicht um einen Sensor direkt, sondern die Wegmessung eines Fahrzeuges, die auf der Beobachtung seiner Räder basiert. Mittels z.B. Inkrementalgebern wird die Drehrate der Räder bestimmt. Hieraus lässt sich einfach mittels der Formel  $\Delta s = \pi * d * n$  die zurückgelegte Strecke  $\Delta s$  berechnen. Jedoch ist dieses Verfahren sehr fehleranfällig. Das Paper [Doh u. a. \(2003\)](#) beschreibt ein Modell, welches die Fehler darstellt.

**Laserscanner:** Ein Laserscanner ermittelt anhand der Laufzeit eines ausgesandten Laserimpulses den Abstand ( $d = ct/2$ ) zu einem Hindernis. Dabei wird der Laser mittels eines Spiegels rotiert, so dass nicht nur die Entfernung zu einem festen Punkt ermittelt werden kann, sondern ein weiterer Bereich erfasst werden kann (vgl. [Velupillai und Guvenc \(2009\)](#)). Somit kann diese Technik genutzt werden, um zu navigieren.

**Rasternavigation:** Hierbei handelt es sich um ein Konzept, welches derzeit häufig in der Industrie Anwendung findet (vgl. [forum-vw \(2009\)](#), [frog \(2009\)](#)). Mittels Magneten, die im Boden eingelassen sind, und einem Magnetlineal, welches die Magneten sehr genau orten kann, kann ein Fahrzeug navigieren bzw. seine Positionsbestimmung korrigieren.

---

<sup>1</sup>Vehicle Adhoc NETWORKS

**Leitlinie:** Eine weitere Möglichkeit ist es, einem Fahrzeug mittels Leitlinien die Fahrbahn vorzugeben. Dieses wird aber nicht weiter beschrieben, da dieses Verfahren nicht relevant im Kontext der Ausarbeitung ist.

**Bildverarbeitung:** Die Bildverarbeitung ist ein mächtiges Instrument, um die Umgebung zu erkennen. Jedoch ist diese sehr aufwändig und benötigt viel Rechenkapazität. Derzeit wird diese nur in der Forschung und noch nicht in industriellen Produkten für die Navigation eingesetzt. In der Arbeit [Rull \(2008\)](#) wird beschrieben, wie mit Hilfe von Kamerabildern eine Karte erzeugt werden kann. Die Arbeit [Davison u. a. \(2007\)](#) beschreibt, wie mittels Bildverarbeitung das SLAM<sup>2</sup> Problem gelöst werden kann. Die Ansätze in den beiden Arbeiten können genutzt werden, um eine Lokalisierung in einer Karte vorzunehmen.

### 2.3.2 Sensorfusion

Die im vorherigen Kapitel [2.3.1](#) beschriebenen Sensoren können jeweils einzeln eingesetzt werden. Potentielle Fehler können aber nicht erkannt oder korrigiert werden. Auch ist z.B. die Odometrie alleine nicht in der Lage, eine lokale Karte für eine Routenplanung zu erstellen. Somit müssen die diversen Sensordaten mehrerer Sensoren zusammengeführt werden.

Mit dieser Themenstellung befasst sich das Forschungsgebiet *Sensor Fusion*.

Die Grundidee ist es, die Daten von mehreren Sensoren zu verschmelzen (siehe [Abbildung 1](#)) und somit die Qualität der Daten zu verbessern. Zum Beispiel kann eine Kamera alleine keine genaue Distanz messen, da Tiefeninformationen fehlen. Wird ein Laserscanner zur Hilfe genommen, so kann ein Objekt genauer erfasst und vermessen werden.

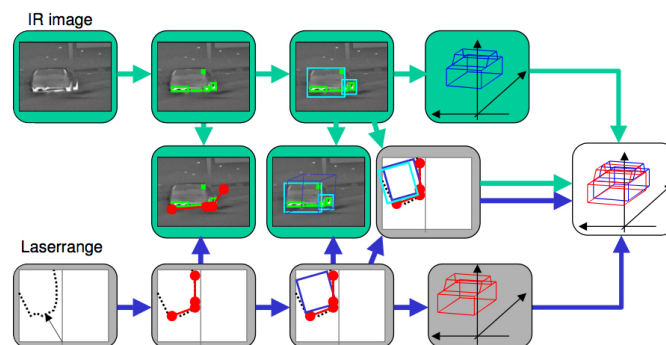


Abbildung 1: Beispiel für ein Sensorfusion Vorgang (aus: [Fuchs \(2005\)](#))

<sup>2</sup>Simultaneous Localization and Mapping



Der Artikel [Wender und Dietmayer \(2008\)](#) beschreibt genau so eine Fusion von Kamera- und Laserscannerdaten für die Erkennung von Fahrzeugen.

Im Kontext dieser Arbeit kann Sensorfusion genutzt werden, um die Genauigkeit der lokalen Karte zu erhöhen. Befinden sich Fahrzeuge in einem Konflikt, so gibt es zusätzlich mehrere Sichten auf die lokale Umgebung. Mittels Sensorfusion ist es möglich, eine sehr genaue Karte zu erstellen, welche die Informationen aller beteiligten Fahrzeuge enthält. Dieses führt dazu, dass das lokale Planen der Route verbessert werden kann.

## 2.4 Forschungsgruppen

Diverse Universitäten beschäftigen sich mit autonomen Fahrzeugen und Fahrerassistenzsystemen. Im Folgenden wird der Sonderforschungsbereich TR 28 und das EU- Förderprogramm PReVeNT kurz vorgestellt und bewertet, in wie weit die Forschungen für das Thema dieser Ausarbeitung von Nutzen sind.

### 2.4.1 TR 28

Bei dem Sonderforschungsbereich TR 28 [cog \(2009\)](#) handelt es sich um den *Transregional Collaborative Research Venter 28 - Cognitive Automobiles*. Das Projekt ist Anfang 2006 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft ins Leben gerufen worden. Beteiligt sind das Fraunhofer Institut (IITB), die Universität Karlsruhe, die TU München und die Universität der Bundeswehr Nürnberg. Ziel ist es, den Fahrzeugen möglichst viel Wissen über ihre Umwelt zu vermitteln, um anhand des Wissens den Fahrer zu unterstützen.

Das Projekt gliedert sich in 3 Forschungsbereiche:

- A: Distributed Sensorial Perception
  - A1: Attention driven mono-/stereoscopic Perception of Complex Traffic Environments
  - A2: Detection, Classification and State Estimation of Traffic related Objects
  - A3: Integration of complementary Sensors and Sensor Data Fusion
  - A4: Cooperative Perception of communicating Vehicles
- B: Behaviour Decision, Generation, and Conduction
  - B1: Interpretation of Traffic Situations and Recognition of Behaviors
  - B2: Cognitive Behavior Decision and Path Planning

- B3: Distributed Cooperation
- B7: Safety Assessment of (autonomous) Decisions with Methods of Hybrid Verification
- C: Automobiles and IT Basis System
  - C1: Vehicle Dynamics and Control Concepts
  - C2: Vehicle Dynamics and Control Strategies with detailed Trajectory Planning
  - C3: Hardware and Software-Architecture
  - C4: Car-to-Car Communication

Der Bereich A befasst sich mit der Aufnahme und Erkennung der Umwelt. Das Wissen, welches in diesem Bereich gesammelt worden ist, ist essentiell für die Erstellung einer lokalen Karte. Es werden Fahrspuren und andere Verkehrsteilnehmer (A1) und deren Eigenschaften erkannt, sowie deren Geschwindigkeit ermittelt (A2). A3 und A4 befassen sich mit den Themen, die im Kapitel 2.3.2 beschrieben wurden und sind somit von großer Bedeutung.

Der Bereich B befasst sich mit der Interpretation der in Bereich A gesammelten Daten und der darauf basierenden Entscheidungsfindung. Dabei ist im Subprojekt B1 die Interpretation von Situationen für das Thema von hoher Bedeutung, da die Interpretation eine wichtige Vorstufe für die lokale Routenplanung ist (B2). Mit der Kooperation von Fahrzeugen befasst sich Bereich B3, jedoch in dem TR 28 auf eine andere Art, als wie sie für das Thema der Ausarbeitung benötigt wird. In der Forschung geht es um das gemeinsame Ausweichen und ähnliche Szenarios. Für das Thema der Ausarbeitung ist eine Kooperation bezüglich der Umplanung von Routen notwendig. Die grundsätzlichen Prinzipien sind gleich. B7 befasst sich mit der Verifikation von geplanten Fahrmanövern. Dieses wird auch für die Umplanung von Routen benötigt, um die Sicherheit von Personen und Maschinen zu gewährleisten.

Der Bereich C befasst sich mit der Dynamik der Fahrzeuge. In C1 und C2 werden die Fahrstrecke unter der Berücksichtigung des aktuellen Zustandes des Fahrzeugs geplant. Dieses ist von großer Relevanz, da es sich zumeist um nicht holonome Fahrzeuge handelt. Im Bereich C3 wird die optimale Architektur erforscht. C4 befasst sich mit der Kommunikation (vgl. Kapitel 2.2).

#### 2.4.2 PReVeNT

Das EU- Förderprogramm PReVeNT [prevent \(2009\)](#) befasst sich mit ähnlichen Fragestellungen, wie der TR 28 (Kapitel 2.4.1). Die einzelnen Subprojekte ordnen sich folgenden Funktionsfeldern unter:

1. Safe Speed and Safe Following
2. Lateral Support
3. Intersection Safety
4. Vulnerable Road User and collision Mitgration
5. Corss-functional Activities

Bei den Funktionsfeldern sind für die Ausarbeitung die Positionen 2,3 und 5 von besonderer Bedeutung. Feld 2 beschäftigt sich mit dem Fahren auf Fahrbahnen, Feld 3 mit der Sicherheit und Koordinierung auf Kreuzungen und das 5te Feld mit Schnittmengen aller Felder. Zu dieser gehört auch das bereits vorgestellte Projekt *ProFusion Fuchs* (2005) (vgl. Kapitel 2.3.2).

## 2.5 Algorithmen

Bisher lag der Fokus der Ausarbeitung auf den Themen, welche für die Erstellung einer lokalen Karte und deren Auswertung benötigt werden. Im Folgenden werden kurz zwei Algorithmen dargestellt, die eine Kollisionsvermeidung und Umplanung einer Route beschreiben.

### 2.5.1 Conflict-Free Motion of Multiple Mobile Robots Based on Decentralized Motion Planning and Negotiation

In dem Paper [Azarm und Schmidt \(1997\)](#) ist ein einfacher dezentraler Ansatz beschrieben, mit dem sich Fahrzeuge koordinieren können, wenn diese miteinander im Konflikt stehen. Der Ansatz ist ähnlich dem Ansatz, der im Kapitel 1.2 beschrieben wurde.

Das Auflösen von Konflikten zwischen den Fahrzeugen wird durch eine dynamische Verteilung von Prioritäten gelöst.

Alle Fahrzeuge versenden periodisch ihre aktuelle Position. Alle Fahrzeuge in der Umgebung prüfen, ob das Fahrzeug eine Blockade auf ihrer Route darstellt.

Ist dieses der Fall, informiert das blockierte Fahrzeug (A) das andere (B), welches daraufhin versucht, seine Route umzuplanen. Ist das Fahrzeug B nicht in der Lage eine neue Route zu planen, so informiert es das blockierte Fahrzeug A. Nun beginnt eine Verhandlung, in der beide Fahrzeuge sich gegenseitig ihre Routen schicken. Beide Fahrzeuge versuchen anhand der Routeninformationen des jeweils anderen, eine neue Route zu planen. Diese neu geplante Route wird dem jeweils anderem Fahrzeug mitgeteilt. Beide Fahrzeuge ermitteln anschließend anhand festgelegter Metriken, welche der beiden möglichen Routenausführungen am besten sind und legen ihre Prioritäten fest.

Mit diesem sehr einfachen Algorithmus können sich bis zu drei Fahrzeuge koordinieren. Sind mehr Fahrzeuge in einen Konflikt involviert, so warten die Fahrzeuge, welche nicht der Verhandlung angehören, auf ihrer Position und verhandeln anschließend mit den Fahrzeugen, mit denen sie im Konflikt stehen.

### 2.5.2 A Complete and Scalable Strategy for Coordinating Multiple Robots Within Roadmaps

In dem Paper [Peasgood u. a. \(2008\)](#) wird ein Algorithmus beschrieben, mit dem Deadlock Situationen einfach gelöst werden können. Konzipiert ist dieser für Umgebungen mit vielen schmalen Gängen, in welchen sie Fahrzeuge nicht begegnen können. Die Routenplanung wird anhand von Karten vorgenommen indem in die Karte ein Spannbaum gelegt wird. Der Spannbaum muss mindestens ein Blatt mehr haben als die Anzahl der zu koordinierenden Fahrzeuge. Die Idee ist, dass in diesem Spannbaum jedes Fahrzeug sein Ziel erreichen kann, da immer ein Blatt frei ist und somit zwei Fahrzeuge die Möglichkeit haben, ihre Plätze zu wechseln. Der Algorithmus teilt sich in vier Phasen auf.

**Phase 1:** Für jedes Fahrzeug wird ein Blatt ausgewählt. Mittels des A\*- Algorithmus wird der Pfad vom Fahrzeug zum gewählten Blatt berechnet. Befinden sich weitere Fahrzeuge auf dem Pfad, so wird das sich dem Blatt am nächsten befindliche Fahrzeug auf das Blatt gesetzt. Am Ende der Phase befinden sich alle Fahrzeuge auf Blättern.

**Phase 2:** Angefangen bei dem Fahrzeug, welches am weitesten von der Wurzel entfernt ist, wird getestet, ob sich das Fahrzeug in einem Teilbaum befindet, dessen Wurzel das Ziel des Fahrzeuges ist. Ist dieses der Fall, so bleibt das Fahrzeug stehen. Anderenfalls wird ein Fahrzeug in dem Teilbaum gesucht, dessen Ziel ausserhalb des Teilbaumes ist. Ist ein solches Fahrzeug gefunden, wird für dieses ein freies Blatt ausserhalb des Teilbaums gesucht. Wird ein Blatt ausserhalb des Teilbaumes gefunden, so fährt das Fahrzeug auf diesen. Wenn kein Blatt vorhanden ist fährt das Fahrzeug auf der Wurzel des Teilbaumes.

**Phase 3:** Angefangen bei dem Fahrzeug, welches am dichtesten an der Wurzel ist, bewegen sich alle Fahrzeuge auf ihre Zielpositionen.

**Phase 4:** Erstellen eines Plans, welcher möglichst viele der Bewegungen gleichzeitig ausführt.

Mit dem Algorithmus können beliebig viele Fahrzeuge auf ihre Zielposition gefahren werden. Die Komplexität steigt dabei nur linear mit der Anzahl der Fahrzeuge.

In dem Paper ist der Algorithmus zentral implementiert worden, aber es besteht die Möglichkeit auch diesen dezentral zu implementieren.

Es ist jedoch nicht zu vergessen, dass die Suche nach einem optimalen Spannbaum nicht trivial ist.

### **3 Abgrenzung zu eigenen Arbeitszielen und / oder Methoden**

In den Kapiteln [2.2](#), [2.3](#), [2.4](#) und [2.5](#) werden viele Ansätze beschrieben, welche für die Arbeitsziele sehr wichtig sind.

Die beiden Algorithmen bieten eine gute Grundlage für die lokale Koordination. Wobei der erste die Kommunikationsabläufe beschreibt und der zweite eine mögliche Strategie für die Routenplanung.

Zusätzlich behandeln die Algorithmen nur holonome Fahrzeuge, welche sich in alle Richtungen bewegen können. Dieses ist aber für die Fahrzeuge in dieser Ausarbeitung nicht der Fall.

### **4 Zusammenfassung**

Es wurde gezeigt, dass sich diverse Projekte und Forschungsgruppen mit dem autonomen Betrieb von Fahrzeugen beschäftigen. Viele der Algorithmen und Ansätze sind auf die Bedingungen, welche das Thema der Ausarbeitung mit sich bringen, anwenden lassen. Einen Ansatz der allgemeingültig ist gibt es nicht und ist auch nicht möglich. Dennoch ist es möglich Strategien für eine kooperative Koordination von autonomen Fahrzeugen zu entwickeln. Die Grundlagen sind vorhanden, was noch fehlt ist die Zusammenführung diverser Ansätze.

## Literatur

- c2ccc 2007** : *CAR 2 CAR Communication Consortium*. Website. 2007. – URL <http://www.car-to-car.org>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- cog 2009** : *Cognitive Automobiles*. Website. 2009. – URL <http://www.kognimobil.org/>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- ek 2009** : *E&K Automation*. Website. 2009. – URL <http://www.ek-automation.com/>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- frog 2009** : *Frog AGV Systems GmbH*. Website. 2009. – URL <http://www.frog.nl/>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- forum-vw 2009** : *FTS beim Automobilhersteller VW*. Website. 2009. – URL <http://www.forum-fts.de/index.php/fts-anwendungen/fts-beim-vw>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- prevent 2009** : *PReVeNT*. Website. 2009. – URL <http://www.prevent-ip.org/>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- still 2009** : *STILL GmbH*. Website. 2009. – URL <http://www.still.de>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- Azarm und Schmidt 1997** AZARM, K. ; SCHMIDT, G.: Conflict-free motion of multiple mobile robots based on decentralized motion planning and negotiation, Apr 1997, S. 3526–3533 vol.4
- Barth und Franke 2008** BARTH, A. ; FRANKE, U.: Where will the oncoming vehicle be the next second?, June 2008, S. 1068–1073. – ISSN 1931-0587
- Benmimoun u. a. 2005** BENMIMOUN, A. ; CHEN, J. ; NEUNZIG, D. ; SUZUKI, T. ; KATO, Y.: *Communication-based intersection assistance*. June 2005
- Boban u. a. 2008** BOBAN, M. ; MISEK, G. ; TONGUZ, O.K.: *What is the Best Achievable QoS for Unicast Routing in VANETs?* 30 2008-Dec. 4 2008
- Cheng u. a. 2008** CHENG, Y. ; JIANG, P. ; HU, Y.F.: A distributed snake algorithm for mobile robots path planning with curvature constraints, Oct. 2008, S. 2056–2062. – ISSN 1062-922X
- Choi u. a. 2008** CHOI, JinHyeock ; KHALED, Y. ; TSUKADA, M. ; ERNST, T.: *IPv6 support for VANET with geographical routing*. Oct. 2008
- Clark u. a. 2003** CLARK, Christopher ; ROCK, Stephen M. ; LATOMBE, Jean-Claude: Motion Planning for Multiple Mobile Robot Systems using Dynamic Networks. (2003), S. 4222–4227

- Davison u. a. 2007** DAVISON, A.J. ; REID, I.D. ; MOLTON, N.D. ; STASSE, O.: MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 29 (2007), June, Nr. 6, S. 1052–1067. – ISSN 0162-8828
- Doh u. a. 2003** DOH, Nakju ; CHOSET, H. ; CHUNG, Wan K.: Accurate relative localization using odometry, Sept. 2003, S. 1606–1612 vol.2. – ISSN 1050-4729
- Festag u. a. 2008** FESTAG, A. ; NOECKER, G. ; STRASSBERGER, M. ; LUEBKE, A. ; BOCHOW, B. ; SCHNAUFER, Sascha ; TORRENT-MORENO, M. ; EIGNER, R. ; CATRINESCU, C. ; KUNISCH, J.: Network on Wheels: Project Objectives, Technology and Achievements. In: *Proc. of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2008)*. Hamburg, Germany, 03 2008
- Fuchs 2005** FUCHS, Dr E.: Overview on ProFusion1 and 2 / University of Passau, Germany. URL [http://prevent.ertico.webhouse.net/download/Events/20051012\\_SEFS\\_Goteborg/PR-15000-SLI-051012-v11-ProFusion1\\_and\\_2.pdf](http://prevent.ertico.webhouse.net/download/Events/20051012_SEFS_Goteborg/PR-15000-SLI-051012-v11-ProFusion1_and_2.pdf). – Zugriffsdatum: 2009.06.18, 10 2005. – Prsentation
- Fujimura 1996** FUJIMURA, K.: Path planning with multiple objectives. In: *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 3 (1996), Mar, Nr. 1, S. 33–38. – ISSN 1070-9932
- Gehrig u. a. 2003** GEHRIG, S.K. ; WAGNER, S. ; FRANKE, U.: System architecture for an intersection assistant fusing image, map, and GPS information, June 2003, S. 144–149
- Harsch u. a. 2007** HARSCH, C. ; FESTAG, A. ; PAPADIMITRATOS, P.: Secure Position-Based Routing for VANETs, 30 2007-Oct. 3 2007, S. 26–30. – ISSN 1090-3038
- Kolushev und Bogdanov 2000** KOLUSHEV, Fedor A. ; BOGDANOV, Alexander A.: Multi-agent Optimal Path Planning for Mobile Robots in Environment with Obstacles. In: *PSI '99: Proceedings of the Third International Andrei Ershov Memorial Conference on Perspectives of System Informatics*. London, UK : Springer-Verlag, 2000, S. 503–510. – ISBN 3-540-67102-1
- Kosch 2006** KOSCH, T.: Car2Car Communication Concepts, March 2006, S. 253–262
- Lei und Ozguner 2001** LEI, Jia ; OZGUNER, U.: Decentralized hybrid intersection control, 2001, S. 1237–1242 vol.2
- Lumelsky und Harinarayan 1997** LUMELSKY, V.J. ; HARINARAYAN, K.R.: Decentralized Motion Planning for Multiple Mobile Robots: The Cocktail Party Model. In: *Autonomous Robots* 4 (1997), March, Nr. 1, S. 121–135. – URL <http://www.springerlink.com/content/162854230676w201/>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009. – ISSN 0929-5593 (Print) 1573-7527 (Online)

- Mei und Tie-jun 2005** MEI, Wang ; TIE-JUN, Wu: Cooperative co-evolution based distributed path planning of multiple mobile robots. In: *Journal of Zhejiang University - Science A* 6 (2005), July, Nr. 7, S. 697–706. – URL <http://www.springerlink.com/content/6224t46354742647/>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009. – ISSN 1673-565X (Print) 1862-1775 (Online)
- Naumann u. a. 1998** NAUMANN, R. ; RASCHE, R. ; TACKEN, J.: *Managing autonomous vehicles at intersections*. May/Jun 1998
- Naumann u. a. 1997** NAUMANN, R. ; RASCHE, R. ; TACKEN, J. ; TAHEDI, C.: *Validation and simulation of a decentralized intersection collision avoidance algorithm*. Nov 1997. – 818–823 S
- Nishi u. a. 2005** NISHI, T. ; ANDO, M. ; KONISHI, M.: Distributed route planning for multiple mobile robots using an augmented Lagrangian decomposition and coordination technique. In: *Robotics, IEEE Transactions on* 21 (2005), Dec., Nr. 6, S. 1191–1200. – ISSN 1552-3098
- und Paul Levi 2006** PAUL LEVI, Ralf R. und: *Kooperative Multi-Roboter-Wegplanung durch heuristische Prioritätenanpassung*. 2006. – URL <http://www.springerlink.com/content/x6p2627220352480/>. – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- Peasgood u. a. 2008** PEASGOOD, M. ; CLARK, C.M. ; MCPHEE, J.: A Complete and Scalable Strategy for Coordinating Multiple Robots Within Roadmaps. In: *Robotics, IEEE Transactions on* 24 (2008), April, Nr. 2, S. 283–292. – ISSN 1552-3098
- Pepy u. a. 2006** PEPY, R. ; LAMBERT, A. ; MOUNIER, H.: Reducing Navigation Errors by Planning with Realistic Vehicle Model, 0-0 2006, S. 300–307
- Regele und Levi 2006** REGELE, R. ; LEVI, P.: Cooperative Multi-Robot Path Planning by Heuristic Priority Adjustment, Oct. 2006, S. 5954–5959
- Rull 2008** RULL, Andrej: *Sensorbasierte Umgebungskartierung mit lokaler Positionskorrektur für autonome Fahrzeuge*, HAW Hamburg, Bachelorarbeit, 08 2008. – URL [http://users.informatik.haw-hamburg.de/~rull\\_a/Bachelorarbeit.pdf](http://users.informatik.haw-hamburg.de/~rull_a/Bachelorarbeit.pdf). – Zugriffsdatum: 21.06.2009
- Sharma 1992** SHARMA, R.: Locally efficient path planning in an uncertain, dynamic environment using a probabilistic model. In: *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 8 (1992), Feb, Nr. 1, S. 105–110. – ISSN 1042-296X
- Velupillai und Guvenc 2009** VELUPILLAI, S. ; GUVENC, L.: Laser Scanners for Driver-Assistance Systems in Intelligent Vehicles. In: *Control Systems Magazine, IEEE* 29 (2009), April, Nr. 2, S. 17–19. – ISSN 0272-1708



- Vigorito 2007** VIGORITO, Christopher M.: Distributed path planning for mobile robots using a swarm of interacting reinforcement learners. In: *AAMAS '07: Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. New York, NY, USA : ACM, 2007, S. 1–8. – ISBN 978-81-904262-7-5
- Walther u. a. 2003** WALTHER, M. ; STEINHAUS, P. ; DILLMANN, R.: A robot navigation approach based on 3D data fusion and real time path planning, July-1 Aug. 2003, S. 45–50
- Warren 1990** WARREN, C.W.: *Multiple robot path coordination using artificial potential fields*. May 1990
- Wender und Dietmayer 2008** WENDER, S. ; DIETMAYER, K.: 3D vehicle detection using a laser scanner and a video camera. In: *Intelligent Transport Systems, IET 2* (2008), June, Nr. 2, S. 105–112. – ISSN 1751-956X
- Zhao u. a. 2008** ZHAO, Huijing ; CUI, Jinshi ; ZHA, Hongbin ; KATABIRA, K. ; SHAO, Xiaowei ; SHIBASAKI, R.: Monitoring an intersection using a network of laser scanners, Oct. 2008, S. 428–433