

DISS. ETH NO. 19260

**AUTONOMOUS VEHICLE NAVIGATION IN DYNAMIC URBAN
ENVIRONMENTS FOR INCREASED TRAFFIC SAFETY**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

KRISTIJAN MAČEK

M.Sc., University of Zagreb

03 December 1975

citizen of Slovenia and Croatia

accepted on the recommendation of

Professor Roland Siegwart, Principal Supervisor
Professor Urbano Nunes, Co-Examiner
Professor Ivan Petrović, Co-Examiner
Doctor Thierry Fraichard, Co-Examiner

2010

Abstract

In recent years, there has been an extensive amount of research done on various aspects of general vehicle traffic. It has been recognized both by industry manufacturers and research units that introducing intelligent driver assistance systems on-board vehicles and enhancing the road infrastructure with additional networked sensory information has an important impact on future of transportation. On one side, these systems can greatly improve both traffic flow, reduce energy consumption and emissions and on the other size they can enhance driver comfort and safety of all the traffic participants.

This thesis addresses in particular the safety aspect of urban traffic by exploring the potentials of autonomous vehicle navigation using on-board proprio- and exteroceptive sensors and actuators that are used in a closed-loop fashion from dynamic scene analysis to decision making based on hierarchical planning techniques. An autonomous vehicle navigation framework implicitly enables three principal driver mitigation levels: in the passive mode it can provide an informative scene interpretation and a warning signal in critical situations, in the semi-autonomous mode it can act as an overriding copilot in order to prevent accidents potentially provoked by driver misjudgement or fatigue and in the fully autonomous mode it enables a situation adaptable driving mode in which respecting the traffic participants safety and regulations can be explicitly embedded in the system.

The development of autonomous navigation framework in this work follows the categorization of the vehicle environment both from perceptual and motion planning problem into static and dynamic ones. Static environments may include a-priori unknown static obstacles or slowly moving ones where the underlying assumption is the that the environment representation and motion planning can be based on instantaneous sensory information or the frozen world assumption. Since the full information about obstacle configurations is not known a-priori, a success-

ful autonomous navigation scheme requires both a global on-line path planning capability for objective deliberation and a reactive obstacle avoidance layer for safety. The contribution for these types of environments is in a novel hierarchical navigation structure that combines different available global path planning and path following schemes with obstacle avoidance methods for an occupancy grid based environment representation. Experimental results are provided for a vehicle platform under real-world conditions. Alternative formulations to obstacle avoidance via a probabilistic Bayesian inference and to motion planning problem using optimization techniques were also studied.

The frozen world assumption is violated in highly dynamic environments, therefore the timing constraints arising from the dynamic object perception, motion planning and execution have to be explicitly accounted for. Two distinct motion planning approaches were proposed in the presence of dynamic objects, in transformed state space and in trajectory space of vehicle and obstacle motion. The key component is the partial motion planning module, where potentially feasible vehicle trajectories are explored within a given decision time limit. The trajectory exploration phase is directed both by attaining the goal configuration as well as exploring the free space in order to avoid collision with static and dynamic obstacles. Moreover, the safety aspect of motion planning in dynamic environments is a critical issue, due to the inherent uncertainty about future obstacle motion, sensory limitations and real time planning requirements. Two safety levels are distinguished, namely the passive safety where the ego-vehicle is guaranteed to come to a stop before any future potential collision could occur beyond the prediction horizon and the passive friendly safety, where other dynamic objects are allowed to come to a stop if they follow a particular breaking policy.

In order to close the loop from perception to motion planning, the dynamic scene analysis was performed, where the road networked structure was described via lane detection. The potential dynamic object candidates were extracted by building an incremental locally consistent environmental map based on on-line

sensory data and detection of temporal differences in map occupancy evidence.

The ultimate goal pursued in this thesis was to develop a navigation architecture that would allow for safe autonomous vehicle navigation in dynamic urban scenarios. In order to successfully navigate in such environments, a planning hierarchy must be established from the strategic mission plan, global waypoints route planning followed by a tactical behavioral level which triggers different vehicle behavior modes according to the given traffic situation and rules, further down to the operational level which must generate feasible trajectories for the vehicle to be executed. In this respect, a hierarchical navigation scheme is proposed and verified in simulation given various dynamic urban scenarios.

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden verschiedene Aspekte von allgemeinem Fahrzeugverkehr zunehmend gründlich recherchiert. Industrielle Hersteller sowie auch Forschungszentren sind zur Schlussfolgerung gekommen, dass die Einführung intelligenter Fahrzeugassistenzsystemen auf Bord Fahrzeugen und die Erweiterung der Strasseninfrastruktur durch zusätzliche vernetzte sensorielle Informationsstellen einen erheblichen Einfluss auf das zukünftige Transportwesen haben werden. Auf einer Seite können solche Systeme den Verkehrsdurchfluss deutlich verbessern, den Energieverbrauch und Emission reduzieren, auf anderer Seite aber auch den Fahrkomfort und die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer steigern.

Diese Doktorarbeit befasst sich in besonderem mit dem Sicherheitsaspekt des städtischen Strassenverkehrs durch die Erforschung des Potenzials autonomes Fahrzeugfahrens. Es wurden propriozeptive und exterozeptive Sensoren und Aktuatoren auf Bord des Fahrzeuges angewendet. Die Rückführung wurde von Erfassung und Analyse dynamischer Umgebungen bis zur hierarchischen Bewegungsplanung geschlossen. Ein autonomes Fahrzeugnavigationssystem ermöglicht impliziterweise drei hauptsächliche Fahrerassistenzstufen: im passiven Modus ermöglicht das System eine informative Umgebungsanalyse dass einen Warnsignal in kritischen Situationen generieren kann, im semi-autonomen Modus agiert das System als ein übergeordneter Kopilot dass die Verkehrsunfällen vermeiden lässt, die durch die falsche Situationseinschätzung oder Müdigkeit des Fahrers potenziell entstehen können und im autonomen Modus adaptiert das System die Fahrweise automatisch situationsgemäss so dass sich die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer und die Verkehrsregeln explizit miteinbeziehen lassen.

In dieser Arbeit basiert die Entwicklung eines autonomen Navigationssystems mittels Kategorisierung der Fahrzeugumgebung in statische und dynamische Typen. Diese Kategorisierung ist bei Umgebungserfassung- sowie bei Bewegungsplanungsproblemen angewendet worden. Die statische Fahrzeugumgebung kann de-

mentsprechend statische oder langsam bewegliche Hindernisse enthalten die im Voraus nicht bekannt sind. Die grundlegende Annahme besteht somit darin, dass die Umgebungsbeschreibung und Bewegungsplanung nur auf unmittelbarer sensorischer Information basieren, der sogenannten gefrorenen Welt Annahme. Da die umfassende Information über die Umgebungshindernisse zunächst nicht vorhanden ist, muss ein erfolgreiches autonomes Navigationssystem eine globale on-line Pfadplanungsfunktionalität für Zielstellung enthalten sowie eine reaktive Kollisionsvermeidungsschicht die für Sicherheit verantwortlich ist. Der Beitrag zur Navigation in statischen Fahrzeugumgebungen ist eine neuartige hierarchische Navigationsstruktur die verschiedene vorhandene globale Pfadfindungs- und Pfadverfolgungsschemata mit Kollisionsvermeidungsschicht kombiniert wobei die Umgebungsbeschreibung durch eine Griddarstellungsstruktur konstruiert wird. Ergebnisse experimenteller Testversuchen an einer Fahrzeugtestplattform unter realen Bedingungen sind präsentiert worden. Eine alternative Problemformulierung zur Kollisionsvermeidung durch bayesische Inferenz und die Anwendung Optimierungstechniken zur Bewegungsplanung wurden auch analysiert.

Die Annahme zur sogenannten gefrorenen Welt ist in intensiv dynamischen Umgebungen nicht mehr gültig. Die zeitlichen Beschränkungen die durch die Umgebungserfassung- Bewegungsplanung- und Bewegungsausführungsproblemen entstehen, müssen explizit in Berechnung genommen werden. Zwei verschiedene Ansätze zur Bewegungsplanung in Umgebungen mit dynamischen Hindernissen wurden vorgeschlagen, nämlich die Bewegungsplanung im transformierten Zustandsraum und die Bewegungsplanung im Trajektorienraum der Fahrzeug- und Hindernissenbewegung. Eine der wichtigsten Komponenten ist der Partielle-Bewegungsplanungmodul wodurch potenziell ausführbare und zulässige Trajektorien während der Dauer der vorgegebenen zeitlichen Entscheidungsgrenzwert gesucht werden. Die Trajektorien-Suchphase wird durch Zielorientierung wie auch durch die Suche im freien Raum gelenkt, damit die statischen und dynamischen Hindernisse vermieden werden können. Überdies ist die Sicherheit der Be-

wegungsplanung in dynamischen Umgebungen ein kritischer Aspekt wegen der inhärenten Ungewissheit über zukünftige Hindernissenbewegungen, Sensoreinschränkungen und Anspruch auf Echtzeit Bewegungsplanung. Zwei Sicherheitsstufen wurden hier differenziert. Die erste ist die passive Sicherheit wodurch garantiert wird, dass das Eigenfahrzeug zum Stillstand gebremst werden kann eher eine zukünftige Kollision jenseits des Vorhersage-Horizonts auftreten könnte. Die zweite ist die passiv-freundliche Sicherheit wodurch garantiert wird, dass neben dem Eigenfahrzeug auch die dynamischen Objekten zum Stillstand gebremst werden können, falls sie gewisse Bremsmanöver ausführen.

Damit die Rückführung von Umgebungserfassung bis zur Bewegungsplanung geschlossen werden kann wurde die Analyse und Beschreibung der dynamischen Fahrzeugumgebung durchgeführt. Die Strassenstruktur wurde durch Strassenkanten-Erkennung beschrieben. Die on-line vorhandenen sensorischen Daten wurden in einer inkrementaler, lokalerweise konsistenter Umgebungsmappe fusioniert. Die potenziellen dynamischen Objekten-Kandidaten wurden danach anhand zeitlicher Differenz des Belegungsgrads der Umgebungsmappe extrahiert.

Das Endziel dieser Doktorarbeit war die Entwicklung einer Navigationsarchitektur dass eine sichere autonome Fahrzeugnavigation in dynamischen städtischen Umgebungen ermöglichen würde. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, muss eine Bewegungsplanung-Hierarchie aufgesetzt werden. Diese Bewegungsplanung-Hierarchie fängt mit einer strategischen Zielsetzung und Planung der globalen Wegpunkten-Fahrstrecke an. Es wird von einer taktischen Verhaltensebene gefolgt, wo gemäss der gegebenen Verkehrssituation verschiedene Fahrzeugverhaltensmodi aufrufbar sind. Eine weitere operative Navigationsebene ist für die Generierung und Ausführung einer zulässigen Fahrzeugtrajektorie verantwortlich. Im Sinne der erwähnten Navigationsebenen wurde ein hierarchisches Navigationsschema vorgeschlagen und durch Simulation verschiedener dynamischen städtischen Szenarien verifiziert.