



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Seminarbericht

Ilona B. Blanck

Bahnplanung eines autonomen Fahrzeugs am stationären Hindernis

*Fakultät Technik und Informatik
Department Informatik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Computer Science*

Ilona B. Blanck

Bahnplanung eines autonomen Fahrzeugs
am stationären Hindernis

Ausarbeitung eingereicht im Rahmen der Seminar-Ring – Vorlesung
im Masterstudiengang Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. rer. nat. Stephan Pareigis
Gutachter : Prof. Dr. rer. nat. Kai von Luck

Abgegeben am 11. März 2009

Ilona B. Blanck

Thema des Seminarberichts

Bahnplanung eines autonomen Fahrzeugs am stationären Hindernis

Stichworte

Bahnplanung, Hinderniserkennung, Hindernisvermeidung, VFH, Potentialfeld-Methode, Bézier-Kurve, Roboter, Carolo-Cup

Kurzzusammenfassung

Es wird ein Konzept zur Bahnplanung eines autonomen Fahrzeugs am stationären Hindernis vorgestellt. Das Fahrzeug befindet sich auf einer fahrbahnähnlichen Strecke und soll automatisch an Hindernissen vorbeifahren, ohne – soweit möglich – dabei die Fahrbahn zu verlassen, oder das Hindernis zu berühren. Die hierfür benötigten Verfahren zur Fahrbahn- und Hinderniserkennung werden kurz vorgestellt. Sind Hindernisse erkannt worden, denen ausgewichen werden muss, so erfolgt eine Bahnplanung um diese Hindernisse. Die Planung soll durch verschiedene Sensoren und einer Karte der Umgebung unterstützt werden. Das Hilfsmittel Karte erlaubt es bei Rundstrecken ein Wissen über den durch ein Hindernis verdeckten Bereich zu erhalten. Die hier vorgestellten Verfahren sind die Potentialfeld-Methode, Vector Field Histogramm-Methode und Bézier-Spline-Kurven.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1
2 VORBEREITUNGEN ZUR BAHNPLANUNG.....	2
2.1 FAHRBAHNERKENNUNG.....	2
2.2 HINDERNISERKENNUNG.....	3
2.3 HINDERNISBEWERTUNG.....	5
2.4 VERFOLGEN VON HINDERNISSEN.....	6
2.5 KARTE ZUR DARSTELLUNG DER UMGEBUNG.....	6
3 BAHNPLANUNG.....	7
3.1 POTENZIALFELD-METHODE.....	9
3.2 „VECTOR FIELD HISTOGRAM“ - METHODE.....	10
3.3 BEWEGUNGSSEGMENT.....	11
3.4 BÉZIER-SPLINE-KURVE.....	11
4 PROTOTYPISCHE ENTWICKLUNG & AUSSICHT AUF DIE MASTERARBEIT.....	12
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	13
LITERATURVERZEICHNIS.....	14

1 Einleitung

Damit Fahrzeuge sinnvoll autonom fahren können, benötigen sie, neben den technischen Voraussetzungen wie einem Fahrwerk und diversen Sensoren zur Wahrnehmung der Umgebung und des eigenen Systemzustands, vorgegebene Aufgaben. Solche Aufgaben können sein, dass Erkunden einer Umgebung, das Folgen einer vorgegebenen Spur oder Gegenstände von einem Startort zu einem Zielort zu transportieren. Je nach Aufgabe, sind unterschiedliche Rahmenbedingungen an die Bahnplanung gegeben.

Stellt man sich das Szenario einer automatisierten Lagerhalle vor, so ist die Umgebung statisch. Die Lagerhalle ist genau bekannt, es gibt exakte Lagepläne, und vordefinierte Wege, die der Roboter befahren kann. Es können Hilfsmittel, wie eine Magnetspur im Boden, oder spezielle Markierungen an der Decke, dem Boden oder den Wänden angebracht werden, die der Roboter zur Navigation nutzen kann, um seine Aufgabe zu erfüllen.

Ist die Umgebung jedoch nicht exakt bekannt, oder dynamisch, müssen andere Verfahren herangezogen werden, um die Aufgabe zu erfüllen. Stellt man sich die Erkundung des Mars vor, so ist die Umgebung gänzlich unbekannt, und es existieren keine künstlich erzeugten Landmarken zur Orientierung darüber, wo der Roboter sich befindet.

Ein bekanntes Szenario für eine dynamische Umgebung ist die autonome Fahrt auf Straßen. Straßen besitzen in den meisten Fällen Fahrbahnmarkierungen in Form von weißen Linien. Fehlen Straßenmarkierungen, oder sind sie verschmutzt, so ist in der Regel immer noch eine Fahrbahn zu erkennen. Straßen sind meistens seitlich durch Bordsteine, Wände oder Gräben beschränkt. Das Folgen einer Fahrbahn kann durch Faktoren, wie z.B. Hindernissen auf der Fahrbahn oder verdeckte Fahrbahnmarkierungen, erschwert werden.

Mit diesen Problematiken beschäftigen sich auch die Aufgabenstellungen des Carolo-Cups. Der Carolo-Cup ist ein von der TU Braunschweig veranstalteter Wettbewerb, in dem alltägliche Situationen im Straßenverkehr simuliert werden. Es werden vereinfacht drei wesentliche Aspekte der autonomen Fahrt im Straßenverkehr abgefordert. Die erste Disziplin ist das Folgen einer Fahrspur. Bei der zweiten Disziplin werden Hindernisse auf die Fahrbahn gestellt, denen ausgewichen werden muss. Zusätzlich muss an Kreuzungen angehalten werden. Die dritte Disziplin ist das parallele Einparken.

Um das Umfeld einfach zu gestalten, sind alle Fahrbahnmarkierungen deutlich von der Fahrbahn zu unterscheiden. Die Fahrbahnmarkierungen sind, bis auf einige kurze Strecken, durchgehend existent. Weiterhin haben die Fahrbahnmarkierungen und die Fahrspuren eine definierte Breite, so dass die Validation einer Fahrbahnmarkierung vereinfacht wird. Das Fahrfeld befindet sich auf einer Ebene ohne Hügel und Täler. Zur Verminderung der Komplexität beim Ausweichen von Hindernissen habe diese alle dieselbe definierte Form und bleiben, ein Mal aufgestellt, an ihrem Platz stehen. (vgl. Regelwerk Carolo-Cup 2009)

In diesem Bericht wird ein Konzept zur „Bahnplanung eines autonomen Fahrzeugs am stationären Hindernis“ vorgestellt.

2 Vorbereitungen zur Bahnplanung

Ziel der Bahnplanung ist es, in einer bekannten Umgebung einen optimalen Weg von einem Start- zu einem Zielpunkt zu finden. Ein optimaler Weg im Carolo-Cup ist der schnellste Weg durch den Parcours, ohne die Fahrspur zu verlassen oder Hindernisse zu berühren. Um keine Hindernisse zu berühren muss ihnen ausgewichen werden. Die Bahnplanung für einen Ausweichvorgang an einem stationären Hindernis ist das Thema dieser Arbeit. In den folgenden Abschnitten wird beschrieben wie die, für eine akkurate Bahnplanung, benötigten Informationen beschafft werden können.

2.1 Fahrbahnerkennung

Um eine Bahnplanung durchzuführen, muss im ersten Schritt eine Fahrbahn erkannt werden. Hierfür eignet sich der Einsatz einer Kamera. Durch eine Kantendetektion per Bildverarbeitung, können Linien erkannt und weiterverarbeitet werden. Um einen möglichst großen Bereich der Fahrbahn erfassen zu können, bietet sich eine Weitwinkelkamera an. Bei Kameras, gerade bei Weitwinkelkameras kommt es zu einer Linsenverzerrung, vergleiche Abbildung 1, wodurch gerade Strecken als Kurve dargestellt werden. Dies muss auch bei der in Kapitel 2.2 beschriebenen Hinderniserkennung berücksichtigt werden.

Die Extraktion der Fahrbahndaten aus dem Kamerabild muss in Echtzeit erfolgen, da die Bilddaten zur laufenden Fahrt benötigt werden. Um den Rechen- und Zeitaufwand zu minimieren, ist eine schwarz/weiß Kamera mit einer geringen Bildauflösung (von 480x752) geeignet. Beim Carolo-Cup 2009 kam eine CCD – Kamera (UI-1226LE-M-GL von iDS vgl.[1], siehe Abbildung 2) zum Einsatz, die diesen Voraussetzungen gerecht wird.



Abbildung 1: Kamerabild mit Linsenverzerrung



Abbildung 2: CCD-Kamera (iDS UI-1226LE-M-GL)



Abbildung 3: Polaris ROIs

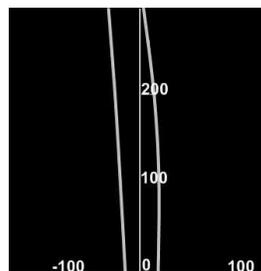


Abbildung 4: Polaris Polynome



Abbildung 5: Kamerabild der Fahrbahn

Das im Projekt verwendete Verfahren ist das von Eike Jenning entwickelte POLARIS (Polynomial Lane Recognition System, vgl. [2]). Bei diesem Verfahren werden an ausgewählten Bereichen im Kamerabild (den „Region Of Interest“, im Folgenden ROI genannt) mit Hilfe des Sobeloperators Linienpunkte erkannt. Anhand der erkannten Punkte werden mit Hilfe eines Polynoms 3. Grades die Außen- und Mittellinie der befahrenen Fahrspur approximiert und in ein Fahrzeugkoordinatensystem eingetragen (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Die Außenlinie der Nebenfahrspur wird bislang noch nicht approximiert, da

bei Linkskurven zu wenig Informationen über die Fahrspur vorliegen (siehe Abbildung 5). Jedoch kann diese anhand der gegebenen Polynome und der definierten Fahrbahnbreite berechnet werden.

2.2 Hinderniserkennung

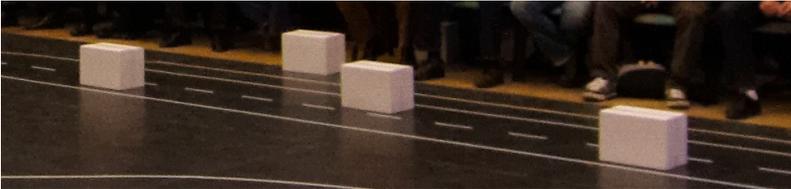


Abbildung 6: Hindernisse im Carolo-Cup 2009

Im Carolo-Cup werden parkende Fahrzeuge durch weiße Kartons simuliert, die auf und neben dem Rundkurs verteilt sind. Diese Hindernisse müssen unter Umständen ausgewichen werden. Sie können sich auf der linken und rechten Fahrspur befinden, es ist jedoch in den Regeln verankert, dass diese mindestens 1m voneinander entfernt stehen (vgl. [3] Regel 5.2.4, siehe Abbildung 6).

Hindernisse lassen sich durch Abstandsmesssensoren detektieren. Zur Auswahl der genutzten Sensoren sind zwei Rahmenbedingungen zu beachten:

- die genutzte Fahrzeugplattform ist Modellfahrzeug im Verhältnis 1:10, die auf eine maximale Höhe von 40 Zentimetern beschränkt ist (vgl. [3] Regel 3.3).
- die Positionierung der Hindernisse werden zur Erstellung einer Karte genutzt, daher sollte die Positionsbestimmung möglichst exakt sein.

Zwei für die Entfernungsmessung im Nahbereich (5cm – 2m) geeignete Sensorarten sind Ultraschall- und Infrarotsensoren. Einem durch einen Ultraschall erkannten Objekt kann eine sehr genaue Entfernung zum Sensor ermittelt werden. Aufgrund des kegelförmigen Messbereichs des Sensors, kann jedoch die Position des Hindernisses auf einer, in der gemessenen Entfernung liegenden, Kreisbahn nicht zugewiesen werden. Da Infrarotsensoren eine geringere Streuung haben, ist die Positionierung der erkannten Hindernisse im Vergleich zu Ultraschallsensoren genauer, jedoch werden nur in einem Bereich von 30-100 cm Daten mit einem ausreichend kleinen Fehler ermittelt. Gleichzeitig soll der gesamte Vorderbereich des Fahrzeugs durch die Sensoren erfasst werden können. Dazu müssten mehrere Sensoren an der Front angebracht werden. Dies würde jedoch dem Entwicklungsziel, eine hohe Energieeffizienz zu erreichen, widersprechen.

Eine Alternative zu diesen Sensoren bietet die Kombination eines Linienlasers und einer Kamera. Sie bietet eine hochpräzise Entfernung und Winkelrichtung der Hindernisse relativ zum Fahrzeug. Ein Linienlaser wird so an das Fahrzeug angebracht, dass die Laserlinie parallel zum Boden strahlt. Dadurch erhalten Hindernisse eine helle Linie, die im Kamerabild extrahiert werden kann (siehe Abbildung 7). Da die Fahrbahn in einer Ebene liegt, werden nur Hindernisse von der Linie angestrahlt. Damit eine aktive Triangulation durchgeführt werden kann, wird die Kamera auf einer erhöhten Position angebracht (siehe Abbildung 8). In Abbildung 9 ist die Funktionsweise der aktiven Triangulation schematisch

dargestellt. Durch die Kenntnis der Lage von Linienlaser und Kamera zueinander, kann auf die Entfernung des im Bild erkannten Hindernisses geschlossen werden.

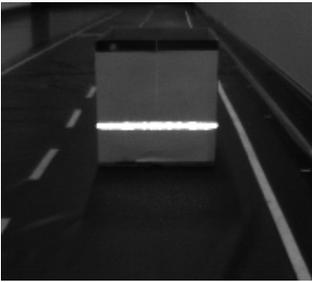


Abbildung 7: Linie auf einem Hindernis



Abbildung 8: Onyx, Laser- und Kameraposition

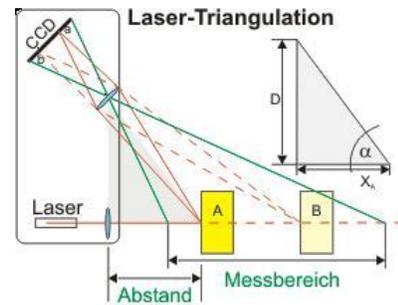


Abbildung 9: aktive Triangulation

Wie bei Ultraschall- und Infrarotsensoren, ist auch bei der Triangulation die Qualität der Messung abhängig von der Oberflächengestaltung und Farbe der Hindernisse. Je nachdem wie das Licht reflektiert und von der Kamera eingefangen wird, ist die Darstellung im Bild unterschiedlich hell. Laut dem Regelwerk des Carolo-Cups haben alle Hindernisse die selbe Form, Farbe und Oberfläche, so dass dieser Fehlerfaktor außer Acht gelassen werden kann (vgl. [3] Regel 5.2.4).

Zur Minimierung der Rechenzeit, wird das Kamerabild in ROIs unterteilt (siehe Abbildung 10). Um einen möglichst großen Fahrbahnbereich erfassen zu können, ist die Kamera auf dem Dach des Fahrzeugs in einem Winkel von ca. 75° zur Fahrbahn angebracht. Durch diesen Aufbau wird der Fahrbahnabschnitt unmittelbar vor dem Fahrzeug durch die Motorhaube verdeckt, so dass dort keine Hindernisse erkannt werden können. Aus diesem Grund ist dieser Bereich für die Hinderniserkennung nicht von Bedeutung. Der obere Bildabschnitt (vergleiche Abbildung 11) kann für die Hinderniserkennung nicht genutzt werden, da in diesem Bereich die Messfehler zu hoch sind. Zur weiteren Bearbeitung des Kamerabildes muss lediglich der nicht markierte Bereich, ca. die Hälfte des Bildes, untersucht werden.

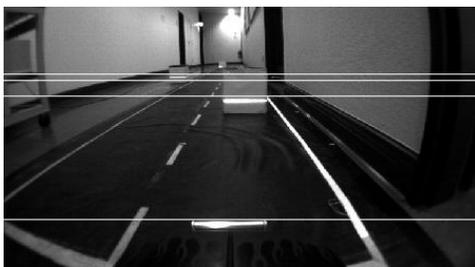


Abbildung 10: Kamerabild mit ROIs



Abbildung 11: bewertete ROIs

Die weitere Aufteilung des Bildes hat den Hintergrund, dass die Farben im Bildverlauf nach oben hin vergrauen. Je weiter oben im Bild ein Pixel betrachtet wird, desto größer weichen diese in ihren Grauwerten voneinander ab. Durch die Einteilung in die ROIs können pro ROI die Schwellwerte so eingestellt werden, dass eine eindeutige Zuweisung von Fahrbahnlinie und Laserlinie sichergestellt ist. Eine Alternative hierzu wäre, das Kamerabild durch ein zusätzliches Hardwaremodul ausgleichen zu lassen.

Da zur Zeit nur eine Kamera zur Verfügung steht, muss diese den Lichtverhältnissen entsprechend so eingestellt werden, dass ein deutlicher Unterschied zwischen der Laserlinie (helles weiß) und der Fahrbahnlinie (etwas dunkleres weiß) und der Fahrbahn (schwarz) erkennbar ist. Denkbar ist der Einsatz von 2 Kameras eine, die nur für die Erkennung der Fahrbahnlinien eingestellt werden muss und eine, die für die Laserlinie eingestellt werden kann. Dieser zweiten Kamera könnte ein optischer Filter vorgebaut werden, der das spezifische Lichtspektrum des genutzten Linienlasers durchlässt.

Durch den momentanen Aufbau des Linienlasers (siehe Abbildung 8), kann die Position von Hindernisse direkt vor dem Fahrzeug ab einer Entfernung vom 20cm bis zu einer Entfernung von ca. 2m cm-genau errechnet werden. Durch eine größere Neigung der Kamera, und eine höhere Position von Kamera und Linienlaser, kann die Genauigkeit gesteigert werden. Je höher die Laserlinie ist, desto näher am Fahrzeug kann sie erkannt werden, da sie später von der Motorhaube verdeckt wird.

2.3 Hindernisbewertung

Nachdem ein Hindernis erkannt wurde, muss überprüft werden, ob dieses für die Bahnplanung eine Relevanz hat. Für die Bahnplanung relevante Hindernisse befinden sich auf der befahrenen Fahrspur in Ausweichnähe zum Fahrzeug. Hindernisse die sich auf der Nebenfahrspur befinden sind relevant, wenn sie sich in der Nähe von Hindernissen auf der befahrenen Fahrspur befinden. Damit eine Aussage über die erkannten Hindernisse getroffen werden kann, muss eine Verbindung zur Fahrbahn hergestellt werden.

Wie unter 2.1 beschrieben, wird die aktuelle Fahrspur in Form von zwei Polynomen angegeben. Durch die in 2.2 beschriebene Hinderniserkennung, ist die Entfernung und Querausrichtung der Hindernisse relativ zum Fahrzeug bekannt. Die Informationen über die Hindernisse und Polynome liegen beide jeweils in einem Fahrzeugkoordinatensystem vor. Die Entfernung der Hindernisse kann demnach direkt in die Polynome eingesetzt werden um die Querausrichtung der Fahrbahnmarkierungen zu erhalten. Durch diese Informationen kann die Position der Hindernisse zu beiden Fahrbahnbegrenzungen verglichen werden.

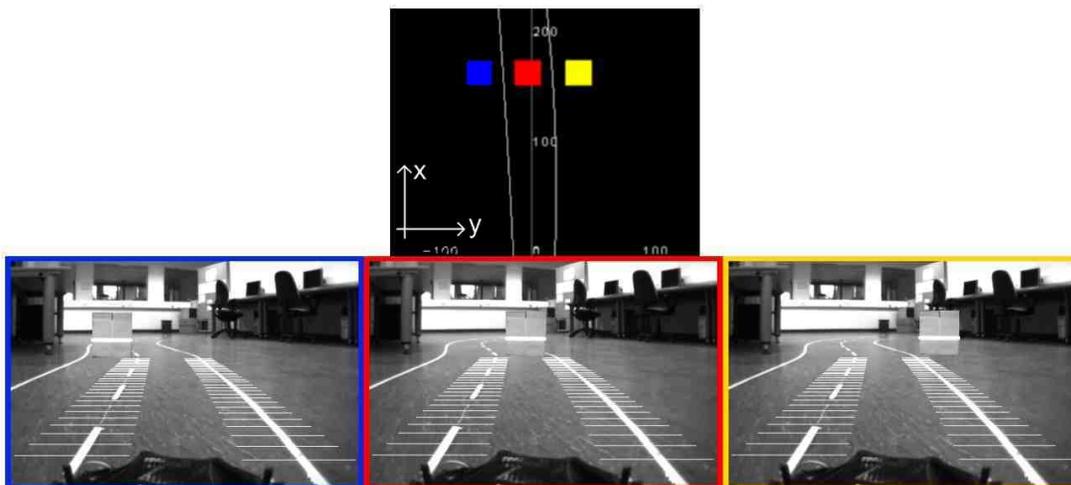


Abbildung 12: Hindernisplatzierung auf Fahrbahn

Abbildung 12 zeigt eine Fahrt der Autos auf der rechten Fahrspur und stellt drei verschiedene Situationen der Hindernispositionierung dar. Das obere Bild zeigt die Polynome der Fahrbahnmarkierungen im Fahrzeugkoordinatensystem, wobei x die Entfernung zum Fahrzeug ist.

Befinden sich die Koordinaten des Hindernisses zwischen denen der beiden Polynome, wie in Abbildung 12 in rot dargestellt, so muss dem Hindernis ab einer definierten Entfernung ausgewichen werden. Befindet sich das Hindernis außerhalb der Fahrbahn, wie in Abbildung 12 in gelb dargestellt, ist es für die Steuerung des Fahrzeugs nicht relevant. Dies ändert sich jedoch, wenn das Fahrzeug fehlerhaft die Strecke verlassen hat. Befindet sich das Hindernis auf der Nebenspur, wie beim blau umrandeten Bild in Abbildung 12 dargestellt, so darf es nur dann nicht beachtet werden, wenn sich kein Hindernis auf der gerade zu befahrenden Spur befindet.

Bei diesem Verfahren könnten zwei Fehlerquellen dazu führen, dass die Hindernisse doch nicht der korrekten Position zugeordnet werden:

- eine fehlerhafte Berechnung der Polynome aufgrund der Approximation, gerade bei Entfernungen über 1,5m,
- und eine fehlerhafte Positionsbestimmung der Hindernisse durch Nickbewegungen des Fahrzeugs.

2.4 Verfolgen von Hindernissen

Eine nur punktuelle Überprüfung der Hindernisse kann zu Fehlern führen. Zum einen kann die Position der Hindernisse zur Fahrbahn falsch ermittelt worden sein, zum anderen können sich neben dem Fahrzeug befindliche Hindernisse durch die Bildverarbeitung nicht mehr erkannt werden. Abbildung 13 zeigt eine Situation, in der ein punktuell, rein bild-

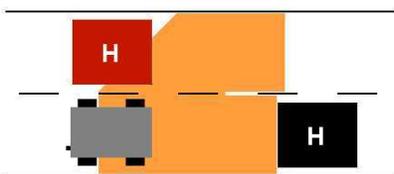


Abbildung 13: Hindernisverfolgung

verarbeitungstechnisches Verfahren, ohne Verfolgung der Hindernisse, zu einem falschen Fahrverhalten führen kann. Das Fahrzeug erkennt das schwarze Hindernis und startet den Ausweichvorgang. Das rote Hindernis wird nicht mehr erkannt, und zwangsläufig berührt. Mit einer Hindernisverfolgung, würde der Ausweichvorgang später gestartet und so eine Kollision vermieden werden.

Die Verfolgung von Hindernissen kann mittels einer Karte implementiert werden. In ihr können die angenommenen Positionen der Umgebung, wie Hindernisse, Haltelinien und Fahrbahnmarkierungen eingetragen und für einen späteren Zugriff bereitgestellt werden. Eine Karte bietet den Vorteil, dass bei einer wiederholten Fahrt auf derselben Strecke bereits Informationen über die Fahrbahnabschnitte vorhanden sind. Ein eventuell zuvor verdeckter Bereich ist beim zweiten Durchlauf bekannt. Die Bahnplanung um ein bekanntes Hindernis kann dementsprechend angepasst werden.

2.5 Karte zur Darstellung der Umgebung

Eine Karte stellt den angenommenen Zustand der Umgebung dar. Um diesen Zustand zu erfassen, werden eine Reihe von Sensoren benötigt. Andrej Rull und Michael Ebert haben

in ihren Bachelorarbeiten dieses Thema näher untersucht (vgl. [4] und [5]). Die dabei entstandene Karte ist an dem „Occupancy Grid“ angelehnt und besteht aus einem Raster, in dem Objekte eingetragen werden können.

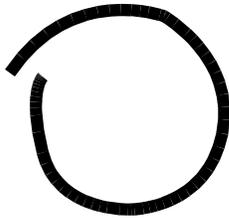


Abbildung 14: Fehlerhafter Rundkurs

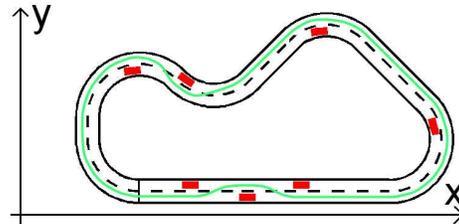


Abbildung 15: Karte eines Rundkurses

Durch Messungenauigkeiten und dem SLAM – Problem (Simultaneous Localisation And Mapping) kann es dazu kommen, dass eine gefahrene Runde in der Karte als offenes Gebilde eingetragen wird (siehe Abbildung 14). Um zu Erkennen, dass eine Runde komplett gefahren ist, können spezielle, ortsfeste Gegebenheiten der Umgebung, wie Start-/ Ziellinie, Kreuzungen, Kurven und stationäre Hindernisse, dazu genutzt werden die Kartenabschnitte zu synchronisieren.

Eine Karte vom Rundkurs des Carolo-Cups könnte wie in Abbildung 15 aussehen. Die roten Kästchen stellen Hindernisse dar. Die grüne Linie beschreibt die Ideallinie durch den Parcours. Die Informationen der Ideallinie könnten aus der jeweiligen Fahrzeugausrichtung und -Geschwindigkeit bestehen. Diese Ideallinie wird durch die Bahnplanung errechnet.

3 Bahnplanung

Bahnplanung ist nach Jean-Claude Latombe (vgl. [6]):

„Given a robot A moving in a workspace W amidst a collection of fixed rigid obstacles B , and a start placement s and goal placement g for A , find a continuous path P for A from s to g avoiding contact with B .“

Demnach ist Bahnplanung das Finden eines kontinuierlichen Weges durch einen Arbeitsraum von einem Start- zu einem Zielpunkt ohne Kontakt mit ortsfesten, rigiden Hindernissen. Der Arbeitsraum ist die Menge aller Punkte, die der Roboter im Raum erreichen kann.

Bei der Bahnplanung gibt es im Wesentlichen zwei Problemfelder:

- Planung eines Weges durch ein bekanntes Gebiet
- Planung eines Weges durch ein teilweise oder gänzlich unbekanntes Gebiet.

Die Bahnplanung im Rahmen des Carolo-Cup stellt ein Problem aus dem zweiten Problemfeld dar. Bei der ersten Runde durch den Parcours sind die Hindernisse noch gänzlich unbekannt. Auch bei den folgenden Runden kann ein und dasselbe Hindernis aufgrund von Messungenauigkeiten an unterschiedlichen Positionen in der Karte eingetragen werden.

Um bei den einzelnen Berechnungen die Größe des Fahrzeugs nicht jedes Mal mit einrechnen zu müssen, kann die Abbildung der Umgebung von einem Arbeitsraum in einen

Konfigurationsraum umgewandelt werden. Der Arbeitsraum stellt den Roboter mit der Menge aller Punkte, die der Roboter im R^3 erreichen kann, dar. Dabei bilden Hindernisse eine Begrenzung des erreichbaren Raumes. Soll in diesem Raum eine Wegplanung durchgeführt werden, so müssen Sicherheitsabstände zu den Hindernissen eingehalten werden. Zur Vermeidung der Berechnung, die bei einer Kontrolle des Sicherheitsabstandes nötig wären, können Konfigurationsräume eingesetzt werden. In Konfigurationsräumen wird das Fahrzeug als Punkt dargestellt. Der Raum in dem sich dieser Punkt bewegt, entspricht der Menge aller Konfigurationen, die das Fahrzeug einnehmen kann. Unter einer Konfiguration versteht man die Position und Orientierung jedes Teils des Fahrzeugs.

Die Dimension des Konfigurationsraums ergibt sich aus den Freiheitsgraden des Roboters. Ein autonomes Fahrzeug besitzt drei Freiheitsgrade. Da sich in diesen Betrachtungen das Fahrzeug auf einer planaren Fläche bewegt, sind hierdurch 2 Freiheitsgrade (x- und y-Richtung) gegeben. Dadurch, dass das Fahrzeug sich um einen Referenzpunkt drehen kann, kann es auch seine Orientierung θ ändern. So ergeben sich die drei Freiheitsgrade: x, y, θ .

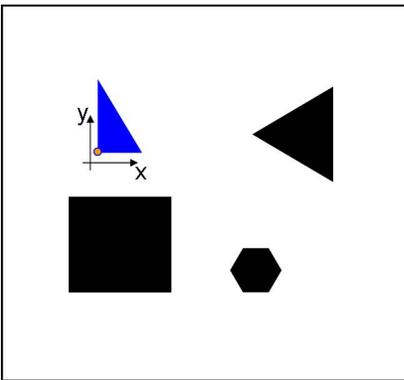


Abbildung 16: Arbeitsraum

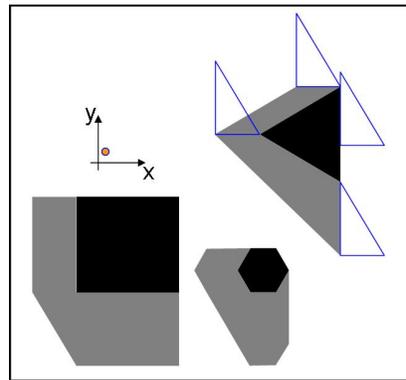


Abbildung 17: Konfigurationsraum

Um die Vorteile der Konfigurationsräume darstellen zu können, wird in folgendem Beispiel von einem Fahrzeug ausgegangen, dass seine Orientierung nicht ändern kann. Dadurch müssen nur zwei Freiheitsgrade, nämlich die x- und y-Richtung betrachtet werden. Gegeben sind der Arbeitsraum und Form des Fahrzeugs (blaues Dreieck) in Abbildung 16. Um einen Arbeitsraum in einen Konfigurationsraum transformieren zu können, muss das Fahrzeug als Punkt (Orangener Punkt in Abbildung 17), und die Hindernisse als Konfigurationshindernisse (Zusammenfassung der schwarzen und grauen Bereiche aus Abbildung 17) dargestellt werden. Konfigurationshindernisse sind um den Raum erweiterte Hindernisse, der benötigt wird, damit das Fahrzeug (ausgehend von einem Bezugspunkt) sie ohne Kollision umfahren kann. Den Bezugspunkt stellt, in dem in Abbildung 16 abgebildeten Beispiel, die linke untere Ecke des blauen Fahrzeugs dar.

Bei einem Fahrzeug mit drei Freiheitsgraden, muss der eben beschriebene Konfigurationsraum um eine dritte Dimension erweitert werden. Zu jeder Position im 2D-Konfigurationsraum muss noch jede mögliche Orientierung des Fahrzeugs hinzugefügt werden.

3.1 Potenzialfeld-Methode

Bei der Potentialfeldmethode wird dem Fahrzeug in jedem Punkt des Konfigurationsraumes eine Richtung und Geschwindigkeit zugewiesen. Diese errechnen sich durch eine Aufsummierung der Anziehungs- und Abstoßungskräfte, die das Ziel und die Hindernisse auf das Fahrzeug ausüben. Bildlich Vorstellen kann man sich dieses Verfahren als seine Kugel, die durch das Ziel in Form einer Senke angezogen und durch Hindernisse in Form von Erhebungen abgestoßen wird (siehe Abbildung 18). Dadurch ist die Potentialfeldmethode geeignet, um für ein Fahrzeug eine Bahn um starre Hindernisse herum errechnen zu können.

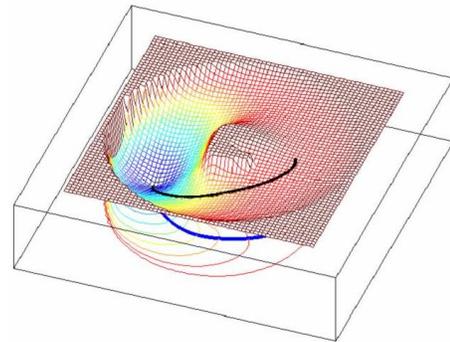


Abbildung 18: Potentialfeldmethode [7]

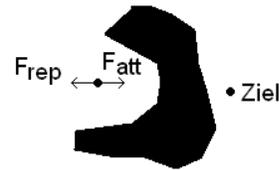


Abbildung 19: Potentialfeldmethode: lokales Minimum

Trotz ihrer Effizienz, welche sich durch die schnelle Berechnung der Richtung und Geschwindigkeit ergibt, ist die Potentialfeldmethode, durch einige der Methode inhärente Probleme, durchaus kritisch zu betrachten. So kann es bei hufeisenförmigen Hindernissen zu dem Phänomen kommen, dass ein Fahrzeug sich in das Hindernis hinein bewegt aber dort lokale Minima ein Lösen vom Hindernis unmöglich machen. Ein lokales Minimum entsteht, wenn sich (wie in Abbildung 19 skizziert) die anziehende Kraft F_{att} des Ziels und die Abstoßende Kraft F_{rep} des Hindernisses aufheben.

Eine zusätzliche Problematik sind oszillierende Bewegungen während Fahrten an Hindernissen entlang oder durch enge Korridore. Abbildung 20 zeigt zwei Korridor Szenen, bei denen eine plötzliche Verengung das Fahrzeug zu einer Ausweichbewegung bringt. In Abbildung 20a passt sich das Fahrzeug der engeren Situation problemlos an. In Abbildung 20b führt die Verengung des Korridors zu einer, sich aufschaukelnden, Schlingerbewegung. Da das Fahrzeug durch die plötzliche Verengung näher an der linken Wand fährt, führen die Abstoßungskräfte dazu, dass das Fahrzeug sich in Richtung Korridormitte bewegt. Die Kraft ist jedoch so groß, dass es über die Mitte hinausfährt und nun unter Einfluss der Abstoßungskräfte der rechten Wand gerät. Dies wiederholt sich und verstärkt sich immer mehr bis das Fahrzeug ins Schlingern kommt.

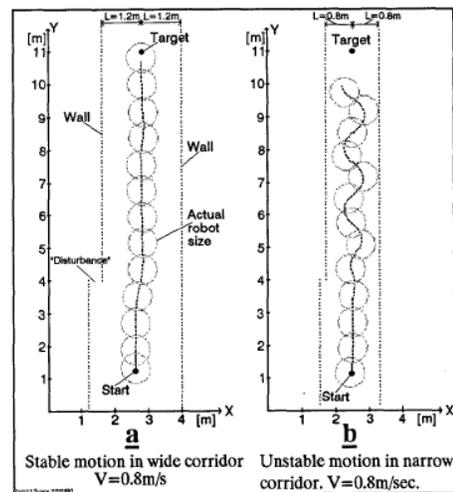


Abbildung 20: Potentialfeldmethode in Korridoren [9]

Beim Anwendungsszenario des Carolo-Cups kann es unter Umständen zu einem solchen Phänomän kommen. Die Abstoßungskräfte der Fahrbahnmarkierungen drängen das Fahrzeug in die jeweilige Fahrspurmitte. Diese Kräfte könnten so eingestellt werden, dass sie zu einer ruhigen Fahrt führen. Ist jedoch ein Hindernis in der Nähe, so muss dessen

Abstoßungskraft so groß sein, dass das Fahrzeug über die Mittellinie getrieben wird, aber so gering, dass es nicht über die andere Fahrspur hinaus fährt. Ob eine Kräfteverteilung, die zu einem ruhigen Ausweichmanöver führt möglich ist, muss noch untersucht werden.

3.2 „Vector Field Histogram“ - Methode

Eine Erweiterung der Potentialfeldmethode ist die „Vector Field Histogram“-Methode (im folgenden VFH genannt). Diese wurde 1990 von Johann Borenstein und Yoram Koren ausgehend von der „virtual force field“-Methode entwickelt. Die VFH bietet gegenüber der Potentialfeldmethode den Vorteil, dass das Fahrzeug durch enge Passagen und Korridore mit hoher Geschwindigkeit und ohne Schlingern hindurch fahren kann.

Die VFH besteht aus drei verschiedenen Abstraktionsebenen. Die Ebene, mit der geringsten Abstraktion, ist eine Karte, die Wahrscheinlichkeitswerte von Hindernissen enthält. Um den Rechenaufwand gering zu halten, ist die Karte absolut zum Fahrzeug gehalten und für die weiteren Betrachtungsschritte wird nur ein Teilausschnitt der Karte (die sogenannte „Active Region“) betrachtet. Der Teilausschnitt entspricht der jeweiligen Umgebung relativ zum Fahrzeug.

Diese „Active Region“ wird in Richtungssektoren unterteilt. Die Unterteilung des Raumes wird in Abhängigkeit von der Ausrichtung des Fahrzeugs vorgenommen. Das Ergebnis ist ein Polar-Histogramm (siehe Abbildung 21b), welches in Abhängigkeit zum Sektor k die Dichte $h^k(q_t)$ der Hindernisse aufzeigt und die zweite Abstraktionsebene darstellt.

Die Spitzen im Histogramm zeigen Richtungen mit einer hohen Dichte von Hindernissen. Täler zeigen Richtungen mit einer geringen Dichte von Hindernissen. Es werden diejenigen Richtungen ausgewählt, die zum einen unter einem vorgegebenen Grenzwert (Threshold) liegen und zum anderen am nächsten zur Zielrichtung liegen. Der Grenzwert muss so gewählt werden, dass kleine Hindernisse berücksichtigt werden (er darf demnach nicht zu hoch sein). Gleichzeitig muss er so eingestellt sein, dass enge, aber durchaus befahrbare Passagen genutzt werden können (hier darf der Grenzwert nicht zu niedrig angesetzt sein). Die gewählten Richtungen sind in Abbildung 21a als „Selected set of directions“ gekennzeichnet. Die Richtungs- und Geschwindigkeitsangabe ist die höchste Abstraktionsebene.

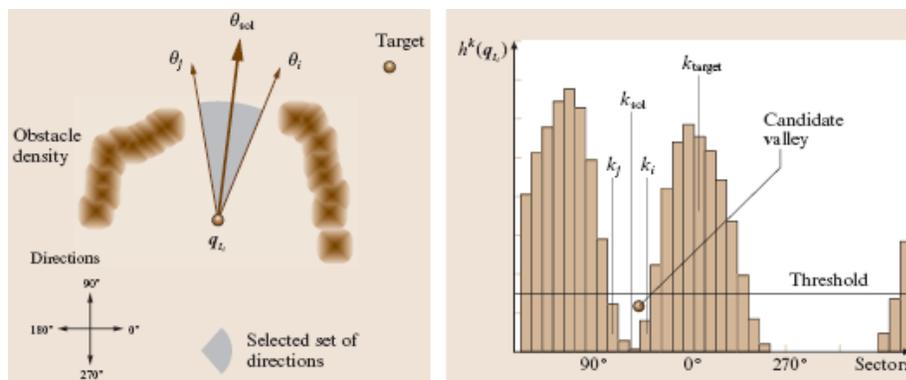


Abbildung 21: VFH: (a) Umgebungskarte (b) Polar Histogramm 4

3.3 Bewegungssegment

Für eine Bahnplanung mittels Bewegungssegmenten wird der Arbeitsraum zur Hilfe genommen. Um von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt im Arbeitsraum zu gelangen werden Geraden und Kurven stückweise zusammengesetzt (siehe Abbildung 22).

Der Radius der Kreise wird maßgeblich durch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs vorgegeben. Je schneller das Fahrzeug ist, desto größer muss der Radius gewählt werden. Der minimale Radius der Kreise wird bei einem Vierrädigen Fahrzeug mit Vorderradlenkung zusätzlich durch den maximalen Lenkausschlag vorgegeben.

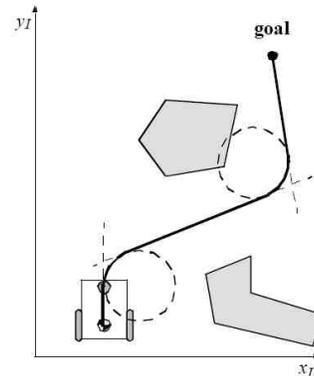


Abbildung 22: Bewegungssegmente

Schneidet ein Abschnitt der errechneten Bahnsegmente ein Hindernis, so muss ein neues Kreissegment eingefügt werden. Diese Kreisbahn wird so um ein Hindernis gelegt, dass das Fahrzeug das Hindernis nicht berührt. Der Radius der Kreisbahn erhält eine zusätzliche Beschränkung, durch die Ausmaße des Fahrzeugs, seiner Minimalgröße.

3.4 Bézier-Spline-Kurve

Die Bézier-Kurve ist ein Approximationsverfahren indem eine Kurve durch die Bestimmung von Stützstellen berechnet wird. Das Verfahren wurde von Pierre Étienne Bézier (1962, bei Renault) und Paul de Casteljau (1959, bei Citroën) entwickelt. Eine Bézier-Spline-Kurve setzt sich stückweise aus Bézier-Kurven zusammen, die zweimal stetig differenzierbar aneinander schließen.

Bézier-Kurve der Ordnung n (mit $n+1$ Stützstellen), wobei b_j die Stützstellen darstellt:

$$P(v) = \sum_{j=0}^n B_j^n(v) b_j \quad v \in [0,1], b_j \in \mathbb{R}^2 \text{ oder } b_j \in \mathbb{R}^3.$$

Die Basisfunktion B wird durch ein Bernsteinpolynom n -ten Grades erzeugt:

$$B_j^n(v) = \binom{n}{j} (1-v)^{n-j} v^j, \quad j = 0(1)n$$

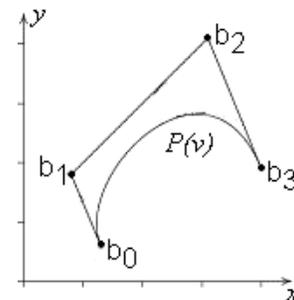


Abbildung 23: kubischer Bézier-Kurve

Abbildung 23 zeigt eine Bézier-Kurve 3. Grades. Eine solche Kurve wird als kubische Bézier-Kurve bezeichnet.

Die Vorteile einer Bézier-Kurve liegen darin, dass für die Erstellung der Kurve lediglich die Stützstellen angegeben werden müssen. Anhand der Stützstellen kann die ungefähre Form der Kurve erkannt werden. Die Kurve befindet sich innerhalb der konvexen Hülle des Bézier-Polygons, das von den Stützstellen vorgegebenen ist. Dadurch dass die Kurve durch den Anfangs- und Endpunkt interpoliert wird, sind dessen exakte Position bekannt.

Durch die Verschiebung eines oder mehrerer Stützstellen, kann die Bézier-Kurve der Umgebung angepasst werden. Die Verschiebung einer Stützstelle verändert jedoch die gesamte Form der Kurve. Die Bildung von Bézier-Spline-Kurven wirkt diesem Verhalten entgegen. Werden Stützstellen innerhalb eines Bézier-Kurven-Segmentes verändert, so bleiben alle umliegenden Segmente von der Veränderung unberührt.

Da die Endpunkte eine C^2 -Stetigkeit aufweisen, können mehrere Bézier-Kurven glatt aneinandergereiht werden. Eine C^2 -Stetigkeit in Bezug auf ein Fahrzeug bedeutet, dass es stetig gegenüber der Geschwindigkeit und Beschleunigung ist. Ein Nachteil an Bézier-Kurven ist jedoch, dass der Rechenaufwand abhängig von den Stützstellen ist.

4 Prototypische Entwicklung & Aussicht auf die Masterarbeit

Für einen Einstieg in die Masterarbeit wurde im Rahmen der Projekt-Veranstaltung des 3. Mastersemesters Informatik an der HAW Hamburg, ein Sensor-gesteuertes Ausweichverfahren für das Carolo-Cup Fahrzeug FAUST:oxy (vgl. [11]) entwickelt und implementiert. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die, während der Projektphase implementierten Teile eingegangen. Eine genaue Beschreibung des Projektes und der umgesetzten Themen wird vom Autor in "Bahnplanung eines autonomen Fahrzeugs am stationären Hindernis – im Szenario Carolo-Cup" (vgl. [13]) gegeben.

Die in Kapitel 2.2 und 2.3 beschriebenen Verfahren zur Erkennung und Bewertung von Hindernissen wurden in so weit implementiert, dass Hindernisse auf Geraden erkannt und korrekt der Positionierung zur Fahrbahn zugewiesen werden können. Aufgrund einer fehlenden Verifikation der Korrektheit der Fahrbahnpolynome ist die Detektion der Hindernisse in Fahrbahnkurven zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit noch nicht vollständig validiert.

Eine Bahnplanung wie in Kapitel 3 vorgestellt, wurde noch nicht implementiert. Der Spurwechsel am Hindernis erfolgt durch eine Soll-Wert Änderung des Querreglers. Das Fahrzeug erhält vom Start an eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben und der Querregler sorgt dafür, dass die Fahrspur nicht verlassen wird. Dabei orientiert sich der Querregler an den durch POLARIS vorgegebenen Fahrbahnpolynomen, welche die linke Fahrspur verfolgen. Beim Ausweichvorgang wird POLARIS auf die rechte Fahrspur umgelenkt, womit sich auch der Soll-Wert der Querregelung verschiebt.

In der Masterarbeit soll die Verwendung der VFH-Methode und Bézier-Kurven genauer untersucht werden. Die VFH-Methode bietet den Vorteil, dass die sowohl die Bahnplanung eines längeren Abschnitts ermöglicht, als auch rein punktuell arbeiten kann. Gegenüber der Potentialfeldmethode sie den Vorteil, dass ein Festhängen in lokalen Minima nicht vorkommt. Durch die Verwendung von Bézier-Kurven erhofft sich der Autor eine gleichmäßigere Kurvenfahrt in der Bahnplanung implementieren zu können.

Eine Verfolgung der Hindernisse ist bislang nur in soweit umgesetzt, dass die an der Seite des Fahrzeugs befindlichen Infrarotsensoren zur Überprüfung, ob die Fahrbahn frei ist, genutzt werden. Eine Karte wurde in das Verfahren noch nicht integriert, da sie zur Verfügung stehende Karte zu ungenau ist. An einer Weiterentwicklung der Karte wird gearbeitet (vgl. [12]).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kamerabild mit Linsenverzeichnung.....	2
Abbildung 2: CCD-Kamera (iDS UI-1226LE-M-GL).....	2
Abbildung 3: Polaris ROIs.....	2
Abbildung 4: Polaris Polynome.....	2
Abbildung 5: Kamerabild der Fahrbahn.....	2
Abbildung 6: Hindernisse im Carolo-Cup 2009.....	3
Abbildung 7: Linie auf einem Hindernis.....	4
Abbildung 8: Onyx, Laser- und Kameraposition.....	4
Abbildung 9: aktive Triangulation.....	4
Abbildung 10: Kamerabild mit ROIs.....	4
Abbildung 11: bewertete ROIs.....	4
Abbildung 12: Hindernisplatzierung auf Fahrbahn.....	5
Abbildung 13: Hindernisverfolgung.....	6
Abbildung 14: Fehlerhafter Rundkurs.....	7
Abbildung 15: Karte eines Rundkurses.....	7
Abbildung 16: Arbeitsraum.....	8
Abbildung 17: Konfigurationsraum.....	8
Abbildung 18: Potentialfeldmethode [7].....	9
Abbildung 19: Potentialfeldmethode: lokales Minimum.....	9
Abbildung 20: Potentialfeldmethode in Korridoren [9].....	9
Abbildung 21: VFH: (a) Umgebungskarte (b) Polar Histogramm [10].....	10
Abbildung 22: Bewegungssegmente.....	11
Abbildung 23: kubischer Bézier-Kurve.....	11

Literaturverzeichnis

- [1] "UI-1226LE-M-GL" Kamera von iDS
http://www.ids-imaging.de/frontend/catalog_detail.php?pID=656&form_KatTable=menue3 &form_KatID=49
- [2] „Systemidentifikation eines autonomen Fahrzeugs mit einer robusten, kamerabasierten Fahrspurerkennung in Echtzeit“, Eike Jenning, Masterarbeit 2008 HAW Hamburg
- [3] " 'Carolo-Cup' Regelwerk 2009", TU Braunschweig
<http://www.carolo-cup.de/wettbewerb/2009/regelwerk/>
- [4] „Sensorbasierte Umgebungskartierung mit lokaler Positionskorrektur für autonome Fahrzeuge“, Andrej Rull, Bachelorarbeit 2008, HAW Hamburg
- [5] „Aktives Mapping und Positionsbestimmung eines autonomen Modellfahrzeuges“, Michael Ebert, Bachelorarbeit 2008, HAW Hamburg
- [6] "Robot Motion Planning", Jean-Claude Latombe, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [7] "Robot Path Planning", Kakos Bros Solutions
http://www.kakos.com.gr/page_1145700674781.html
- [8] "The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots", J.Borenstein und Y.Koren, IEEE Journal of Robotics and Automation Vol 7, No 3, June 1991, pp. 278-288.
- [9] "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation", J.Borenstein und Y.Koren, IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 1991, pp. 1398-1404
- [10] "Handbook of Robotics", Siciliano, Khatib (Eds.), Springer 2008, ISBN: 978-3-540-23957-4
used Article: "Motion Planning and Obstacle Avoidance", J. Minguez, F. Lamiroux, J.-P. Laumond, Chapter 35, pp.827-852
- [11] "FAUST:onyx", <http://www.informatik.haw-hamburg.de/2141.html>
- [12] "Fahrspur- und Odometrie-basierte Selbstlokalisierung und Kartierung (SLAM)", Andrej Rull, Anwendungen 1 Ausarbeitung 2008, HAW Hamburg
- [13] „Bahnplanung eines autonomen Fahrzeugs – im Szenario Carolo-Cup“, Ilona Blanck, Projektbericht 2009. HAW Hamburg