



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Anwendungen 1 – Bericht

Ilona B. Blanck

Kartenerstellung und Navigation zur Positionsbestimmung autonomer Fahrzeuge

*Fakultät Technik und Informatik
Department Informatik*

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

Ilona B. Blanck

Kartenerstellung und Navigation

Zur Positionserkennung autonomer Fahrzeuge

Ausarbeitung eingereicht im Rahmen der Anwendungen I - Vorlesung
im Masterstudiengang Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. rer.nat. S. Pareigis
Gutachter : Prof. Dr. rer.nat. K. von Luck
Gutachter : Prof. Dr.-Ing. B.Schwarz

Abgegeben am 24. Juli 2008

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	4
1.1 Motivation.....	4
1.2 Aufgabenbeschreibung.....	5
1.3 Kurzvorstellung der Plattform.....	5
1.4 Kurzbeschreibung der Sensoren.....	6
2 Karten.....	6
2.1 Zweck von Karten.....	6
2.2 Allgemeines zu Karten bei autonomen Robotern.....	7
2.3 Arten von Weltmodellen.....	8
2.3.6 Geometrisches Weltmodell.....	8
2.3.7 Topologisches Weltmodell.....	9
2.3.8 Semantisches Weltmodell.....	10
2.4 Abgrenzung der Modellierungsarten.....	11
3 Selbstlokalisierung.....	11
4 Navigation.....	12
5 Zusammenfassung und Ausblick auf AW II.....	13
6 Anhang.....	14
I Darstellungsformen von geometrischen Weltmodellen.....	14
I.1 Rasterbasiert.....	14
I.2 Objektbasiert – geometrische Repräsentation.....	15
II Bilderverzeichnis.....	17
III Literaturverzeichnis.....	18

1 Einführung

1.1 Motivation

Autonome mobile Roboter gewinnen zunehmend an Bedeutung. Nicht nur in Gebieten der Forschung, sondern auch im alltäglichen Leben sind immer häufiger autonome Roboter zu finden.

Die Idee der autonomen mobilen Roboter ist nicht mehr nur die Unterstützung der Menschen in den für sie gefährlichen oder unzugänglichen Gebieten, wie planetarische Erkundungsfahrten, Erkundungen versunkener Schiffe oder auch Tiefkühlager, sondern autonome, mobile Roboter sind auch immer häufiger als Helfer bei alltäglichen Dingen in unserer Umgebung zu finden. Ein Beispiel hierfür sind die seit 1997 erhältlichen Staubsaugerroboter, die ein Zimmer eigenständig säubern. Momentan sind unter anderem autonome Roboter, die das beim Einkaufen helfen sollen, Gegenstand der aktuellen Forschung [TUILM]. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt in diesem Bereich ist die Automatisierung von Fahrzeugen, bzw. die Unterstützung der Fahrzeugführer mittels automatisch ablaufenden Fahrmanövern. Viele moderne Autos besitzen bereits Einparkhilfen, Geschwindigkeitsregulatoren, Abstandsmesser und intelligente Scheibenwischer Standard.

Neben den unterstützenden Systemen sind aktuell autonom fahrende Autos ein Entwicklungsschwerpunkt in der Forschung. In den USA organisiert die *DARPA* (Defense Advanced Research Projects Agency) zu diesem Forschungsschwerpunkt einen großen Wettbewerb, die „Grand Challenge“ [DARGC] an dem viele Universitäten der ganzen Welt teilnehmen. Dabei müssen die fahrerlosen Autos verschiedene Aufgaben erfüllen, wie z.B. das Verfolgen einer Fahrspur, Einfädeln in fließenden Verkehr, Einparken oder das Fahren über eine Kreuzung, erfüllen. In Deutschland gibt es zu diesem Themengebiet diverse Wettbewerbe in kleinerem Maßstab. Einer der regelmäßig stattfindenden Wettbewerbe ist der „Carolo-Cup“ [TUBCC] der Universität Braunschweig. Die Modelle treten in verschiedenen Wettkämpfen gegeneinander an. Es werden, unter anderem, vorgegebene Strecken mit Hindernissen abgefahren, und in eine Parklücke eingeparkt. Neben den Wettkämpfen der Modellautos (im Verhältnis 1:10), finden Vorträge im Rahmen der *AAET* (Automatisierungs-, Assistenz- und eingebettete Systeme für Transportmittel) [AAETa] zum Thema autonome mobile Fahrzeuge statt.

Die *HAW-Hamburg* nimmt seit 2008 am „Carolo-Cup“ teil. Bislang agiert das Fahrzeug ohne Karten. Dieses Fahrzeug ermittelt die Fahrspur durch einen Bildverarbeitungsalgorithmus, erkennt Hindernisse mit Hilfe eines Linienlasers, hat einen parallelen Einparkalgorithmus und eine einfache Fahrzeugsteuerung (Kapitel 1.4). Durch unglückliche Umgebungsverhältnisse kann es passieren, dass das Fahrzeug von der ihm vorgegebenen Spur kommt. Bis zum jetzigen Zeitpunkt ist es unsicher ob die Fahrspur wiedergefunden wird und wenn sie wiedergefunden wird, dann ist es Zufall wenn das Fahrzeug die korrekte Fahrtrichtung aufnimmt, und nicht den Weg wieder zurück fährt. Um diesem Missstand abhelfen zu verschaffen ist eine Karte hilfreich.

Diese Ausarbeitung beschäftigt sich damit eine Umgebungskarte zu erstellen, die Fahrzeugposition zu ermitteln und das Navigieren mit Hilfe einer Karte. In Kapitel 2 wird das Thema Karten analysiert und Verfahren zur kartographischen Erfassung der Umgebung vorgestellt. Im Kapitel 2.4 wird das Thema der Selbstlokalisierung behandelt. Im Kapitel 4 wird das Verwenden von Karten als Navigationshilfe genauer betrachtet. Am Ende gibt es noch eine kurze Zusammenfassung und einen Ausblick auf Anwendungen II (Kapitel 5).

1.2 Aufgabenbeschreibung

Wie in der Motivation erwähnt, fehlt dem „Carolo-Cup“ – Fahrzeug der *HAW-Hamburg* bislang eine Unterstützung der Navigation durch eine Karte. Wenn das Fahrzeug die Spur verliert, muss es sie wieder finden. Das Fahrzeug soll autonome Fahrentscheidungen treffen können, die das Finden der Fahrspur ermöglicht. Die üblichen Positionierungsverfahren, wie GPS, WLAN – Triangulation können hier nicht umgesetzt werden. GPS ist für eine zentimetergenaue Positionsermittlung nicht einsetzbar, da die Genauigkeit sich auf einige Meter beschränkt. Abgesehen davon ist GPS nur außerhalb von Gebäuden nutzbar, die Signalstärke ist zu schwach um korrekt durch Wände zu gelangen. WLAN – Triangulation kann nur innerhalb von Gebäuden statt finden. Dies könnte bei einer Verlegung des „Carolo-Cups“ nach draußen zu einer großen Ungenauigkeit führen, damit wäre ein solcher Ansatz nicht mehr verwendbar. Außerdem kann mit Hilfe der WLAN – Triangulation wiederum nur metergenau, und nicht zentimetergenau, die Position ermittelt werden, was bei dem Modellfahrzeugen im Verhältnis 1:10, zu ungenau wäre.

1.3 Kurzvorstellung der Plattform

Das Ziel ist es das System auf dem „Carolo-Cup“ Fahrzeug zu installieren. Zu Testzwecken, ist jedoch zunächst ein Pioneer als Plattform vorgesehen. Hier eine kurze Beschreibung der beiden Plattformen:

Pioneer 2 der Firma Active Media [AMROB]: Der Pioneer 2 ist eine robuste, mobile Roboter Plattform für den kostengünstigen Einsatz. Die allgemeine Robotersteuerung erfolgt über einen externen Rechner, der an eine serielle Verbindung an dem Roboter angeschlossen ist. Der Pioneer besitzt 2 Antriebsräder (Abbildung 1) und ein passives Hinterrad, welches dem Roboter ermöglicht, auf der Stelle zu drehen und auf engsten Räumen zu manövrieren. An den beiden Antriebsrädern ist jeweils ein Shaft-Encoder, ein Inkrementalgeber, montiert. Der Pioneer besitzt insgesamt 8 Sonar-Sensoren, wobei der vordere Sonarring aus sechs Einzelsensoren besteht und damit eine ausgezeichnete 180° Abdeckung für die Front liefert. Zu jeder Seite gibt es jeweils nur einen Sensor. Als Zusatz bekommt der Pioneer einen Laserscanner (PBS der Firma Hokuyo) aufgesetzt.



Abbildung 1: Pioneer

„Carolo-Cup“: Das Fahrzeug ist ein Leihfahrzeug der TU Braunschweig [TUBLF]. Bei den Fahrzeugen handelt es sich um einen Toureg im Maßstab 1:10 mit integrierter Sensorik, Mikrokontrollerboard, Nano-PC und Webcam. Die integrierte Sensorik beinhaltet: Ultraschall-Sensoren zu allen Seiten), Infrarot-Abstandsmesser (links und rechts), Inkrementalgeber an den Vordere Reifen und eine Webcam. Der Einbau weiterer Sensorik ist möglich. Die *HAW-Hamburg* hat das Modell durch einen Linienlaser und einen TFALDA („Three Feature Based Lane Detection Algorithm“, [TFALD]) hinzugefügt. Eine genauere Beschreibung der Sensoren wird im folgenden Abschnitt gegeben.



Abbildung 2: Carolo-Cup – Fahrzeug

1.4 Kurzbeschreibung der Sensoren

In diesem Abschnitt werden die zur Verfügung stehenden Sensoren erläutert. Es wird beschrieben, wie sie funktionieren und wozu sie auf den Plattformen im allgemeinen verwendet werden.

Inkrementalgeber: Er misst die Geschwindigkeit und Entfernung, die ein Rad zurückgelegt hat. Mit Hilfe dieser Daten kann die Position des Fahrzeugs ermittelt werden. Hiermit ist ein Teil (die Position) der odometrischen Daten ermittelt. Inkrementalgeber haben jedoch eine große Fehlerwahrscheinlichkeit. Fehlerquellen in der Interpretation der Messung können in unebenen oder schlüpfrigen Untergründen oder auch im Radspiel liegen. Um die Ausrichtung, ein weiterer Wert der odometrischen Daten, des Fahrzeugs zu ermitteln, wird beim Pioneer die Differenz der beiden Inkrementalgeber (je Rad einer) genutzt. [TUBLR][HAWHH]

Ultraschallsensoren: Sie dienen zur Abstandsmessung. Es wird ein Ultraschallsignal ausgesendet und die Zeit gemessen, bis es wieder zurück reflektiert worden ist. An glatten Oberflächen funktioniert dieses Verfahren gut, an groben Strukturen oder auch kleineren Rundungen, werden die Schallwellen jedoch diffus reflektiert und resultieren in falschen Werte. Der Ultraschallsensor des Pioneers misst in einem Winkel von 20° , und kann dabei Gegenstände in den Entfernungen zwischen 10cm und 5m wahrnehmen. [UNIUL] [AMROB]

TFALDA: Der “Three Feature Based Lane Detection Algorithm” ist ein System zur Fahrspurerkennung mittels einer Bildkamera. [TFALD]

Linienlaser: Projiziert eine Linie nach vorne, die durch die Kamera ermittelt werden kann, um so Hindernisse wahrnehmen zu können.

Hokuyo-Laser: Dieser Laserscanner, zur hochpräzisen Entfernungsmessung, ist ein kompakter Laserscanner der Firma Hokuyo. Er misst in einem Winkel von 180° in einer Entfernung von 6cm bis 3m. [HOKUYU]

2 Karten

Dieses Kapitel behandelt die Sicht auf die Umgebung und die Abspeicherung deren angenommenen Zustands. Um die Umweltkarten, die dem Roboter bereitgestellt werden könnten, oder die er sich selber erstellt. Im Abschnitt 2.1 wird zunächst genauer erläutert, wozu Karten dienen. Weitere allgemeine Informationen zu Karten in Verbindung mit autonomen mobilen Robotern befinden sich im Abschnitt 2.2. Der Abschnitt 2.3 handelt von den verschiedenen Weltmodellen, den Sichtweisen auf die Umwelt. Im Abschnitt I werden einige Implementationsvorschläge vorgestellt. Einige Modellkombinationen werden dann im Abschnitt 2.4 noch ein Mal zusammengefasst.

2.1 Zweck von Karten

Wie in der Motivation schon erwähnt, gibt es Situationen in der Navigation des Fahrzeugs, bei denen es nicht ausreicht zu reagieren. Es muss agiert werden. Abbildung 3 zeigt ein Fahrzeug, das von der Fahrbahn abgekommen ist. Der Wagen muss sich um 180° drehen, bis er die Fahrspur erkennen kann. Viel wahrscheinlicher ist jedoch, dass die Wand den

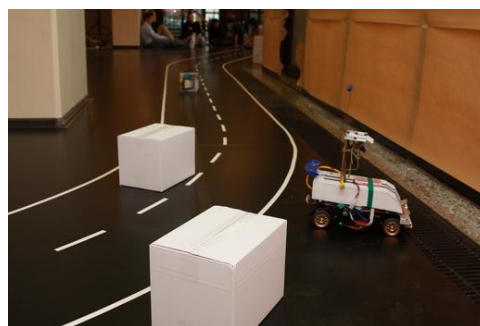


Abbildung 3: Fahrspurverlust

Wagen in die Irre führt, so dass er zunächst weiter geradeaus fahren würde. Nehmen wir einmal an, der Wagen dreht sich in die Richtung der Fahrspur und erkennt, dass er über eine durchgezogene weiße Linie fahren muss, die normalerweise als Grenzen dient. Nun steht das Fahrzeug vor dem nächsten Problem: In welche Richtung geht die Strecke weiter. Existiert keine Karte, so weiß das Fahrzeug nicht, aus welcher Richtung es gekommen ist, und wo es hin muss.

Es muss also eine zielgerichtete, geplante Aktion ausgeführt werden, hierfür ist jedoch ein Wissen über die Umgebung notwendig. Das Wissen über die Umgebung sind lediglich gespeicherte Informationen über eine Annahme der Umgebung, da sich die Umgebung verändern kann. Die Datenrepräsentationen der Summe der gespeicherten Informationen und Annahmen über den Zustand der Umwelt werden als Weltmodell bezeichnet.

Wie und welche Daten gespeichert werden hängt vom Einsatzgebiet des autonomen Roboters ab. Ein Roboter, der in einer Lagerhalle Kisten transportiert, kann beispielsweise mehr Daten speichern und größere Rechner tragen ein kleiner Spionageroboter in Fliegengröße. In dem

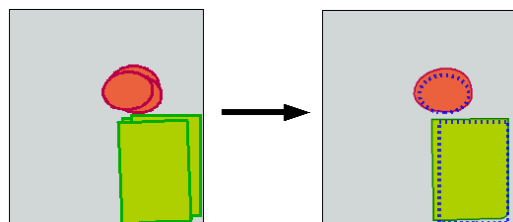


Abbildung 4: Kartenfusion

Szenario des „Carolo-Cups“ wird der Schwerpunkt auf eine effiziente Haltung der zur Selbstlokalisierung erforderlichen Daten und auf eine geeignete Grundlage zur Wegplanung gelegt. Welche Kartenmodelle es gibt und wie ein Kartenmodell für ein solches Szenario aussehen könnte wird im Abschnitt 2.3 beschrieben.

2.2 Allgemeines zu Karten bei autonomen Robotern

Ein Roboter besitzt mindestens zwei Kartentypen: die lokalen und globalen Karten. Die lokale Karte entspricht dem aktuellen Sichtbereich des Roboters (siehe Abbildung 5), wobei jeder Sensor eine eigene lokale Karte erstellt und diese zu einer gemeinsamen lokalen Karte fusioniert werden müssen. Bei der Fusionierung der verschiedenen lokalen Karten zu einer gemeinsamen, kommt es in der Regel zu einer Ungenauigkeit in der Darstellung. Jede einzelne lokale Karte hat eine gewisse Ungenauigkeit, die bei jeder Karte verschieden ausgeprägt ist (siehe Abbildung 4). Durch die verwendeten Fusionierungsverfahren, wie z.B. das „Occupancy Grid“ [TUWIN] [OCCGM] ist der entstehende Gesamtfehler kleiner als der jeder einzelnen Karte.

Weiterhin besitzt der Roboter eine globale Karte (Abbildung 6), die dem Weltmodell entspricht. Um nun herauszufinden, wo sich der Roboter innerhalb der globalen Karte befindet, muss die lokale Karte in Übereinstimmung mit einem Teil der globalen Karte kommen. Hierfür muss die lokale Karte gedreht werden, da die lokalen Karten in der Regel nur eine relative Positionierung des Roboters entspricht und somit nicht die selbe Ausrichtung wie die globale Karte besitzt. Auf die Selbstlokalisierung wird im Kapitel 2.4 genauer

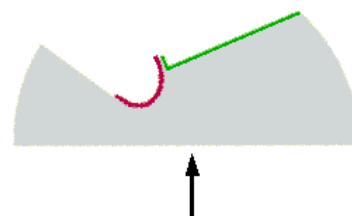


Abbildung 5: lokale Karte

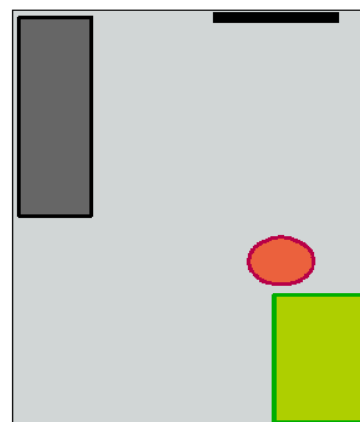


Abbildung 6: globale Karte

eingegangen. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die verschiedenen Arten der Weltmodelle dargestellt.

Die globale Karte dient noch einem anderen Zweck: der Navigation. Mit Hilfe der globalen Karte trifft der autonome Roboter Entscheidungen wie er von einer Position A zu der Position B gelangt. Das Thema Navigation wird im Kapitel 4 genauer beschrieben.

2.3 Arten von Weltmodellen

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Arten von Weltmodellen: geometrische, topologische und semantische (siehe Abbildung 7) Weltmodelle. Im Folgenden werden diese drei Modellarten kurz erläutert und auf ihren Verwendungszweck für die vorliegende Arbeit hin untersucht.

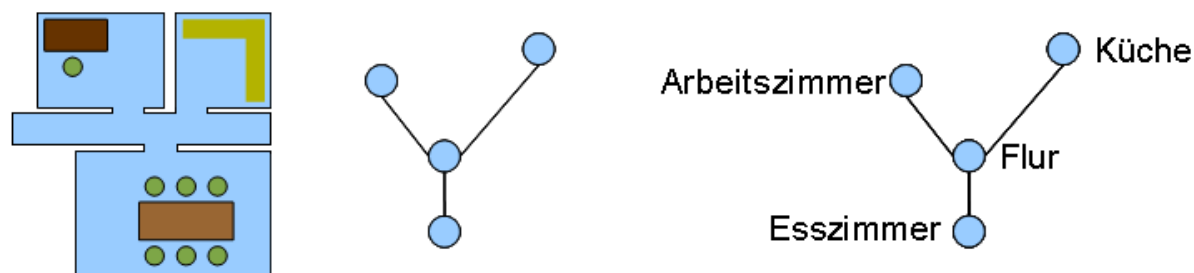


Abbildung 7 : (a) geometrische Karte (b) topologische Karte (c) semantische Karte

2.3.6 Geometrisches Weltmodell

Das geometrische Weltmodell ist die anschaulichste und technisch nahe liegendste Klasse von Umgebungsrepräsentationen. Es werden die Positionen von Umgebungsmerkmalen bezüglich eines gegebenen Koordinatensystems gespeichert. Die Positionen können direkt aus den Messwerten und der aktuellen Roboterposition ermittelt werden. Als Messwerte eignen sich Daten von Abstandsmesssensoren hervorragend.

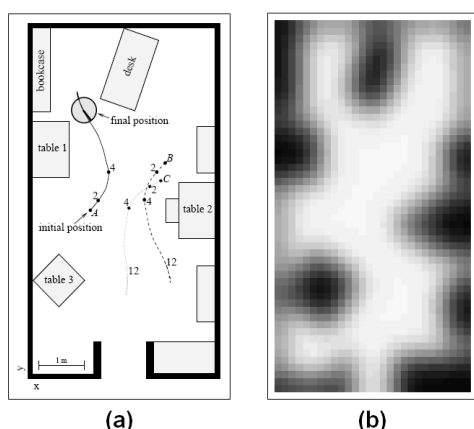


Abbildung 8: geometrisches Weltmodell [UNIBN]

Abbildung 8 (a) zeigt ein Büroraum (4x7m²), den ein Roboter erkunden und kartographieren soll. Der Roboter benutzt dazu Ultraschallsensoren. Die Daten wurden in eine „Grid Map“ (siehe Anhang I.1), eine Rasterkarte, eingetragen, wobei die Rastergröße 15x15cm beträgt. Der Abbildungsteil (b) stellt die Rasterkarte dar, wobei dunkle Stellen bedeuten, dass an dem Ort ein Hindernis ist, helle Stellen sind frei. Je nach dem, wie fein die Auflösung des Koordinatensystems gewählt wird, und wie genau die Sensoren Daten liefern, kann zentimetergenau die Position bestimmt, und Bewegungsplanungen durchgeführt werden.

Um die Umgebungsmerkmale darzustellen gibt es verschiedene Ansätze: rasterbasierte Karten oder Polygondarstellungen (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10). Dabei wird die Umwelt in Freiraum, Hindernis und/oder Unbekannt eingeteilt. Die intuitivere Kartendarstellung ist die Rasterkarte (Anhang I.1). In ihr werden alle gesammelten Informationen gespeichert, es wird über jedes Feld eine Aussage getroffen. Bei der objektbasierten Darstellung (Anhang I.2) werden relevante Objekte in Form geometrischer

Repräsentationen dargestellt. Es wird nicht jede Detail in die Karte aufgenommen, wodurch diese kompakter und speicherschonender ist. Mehr Informationen hierzu sind im Anhang I zu finden.

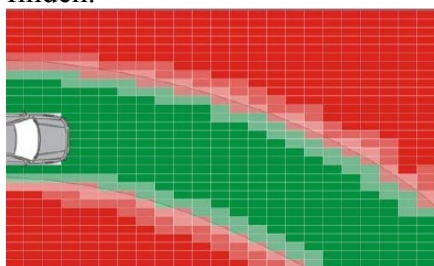


Abbildung 9: rasterbasierte Karte [AAETb]

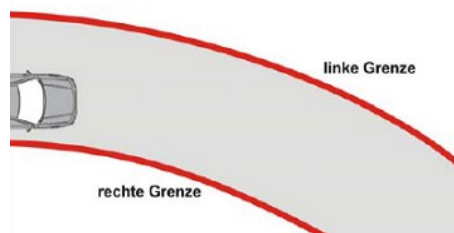


Abbildung 10: objektbasierte Karte [AAETb]

In vielen Anwendungsfeldern, wie in Fabrik- oder Lagerhallen stehen CAD-Darstellungen zur Verfügung. Hier sind geometrische Modelle eine gute Wahl. Die CAD-Darstellungen lassen sich leicht in das System integrieren. Ist keine Karte vorgegeben, bedeutet die manuelle Erstellung einer korrekten metrischen Karte einen unterschiedlich hohen Aufwand. Bei einer komplexen Umgebung wie einer Fabrikhalle mit Maschinen oder ein Museum mit Exponaten, ist der Aufwand der manuellen Erstellung sicherlich hoch. Sind weder eine Karte vorgegeben, noch kann eine Karte manuell erzeugt werden, dann muss der Roboter die Karte automatisch generieren. Bei der automatischen Generierung von Karten gibt es ein Problem, das SLAM (simultaneous localization and mapping). Dieses Problem wird im Kapitel 3 genauer dargestellt.

Wie schon erwähnt, lassen sich die Abstandsdaten direkt in eine Karte umsetzen, daher ist es sinnvoll das geometrische Modell für die Erstellung von den lokalen Karten zu benutzen. Ob auch die globale Karte als geometrische Karte gespeichert werden sollte, wird im späteren Verlauf noch geklärt. Siehe hierzu auch 2.4.

2.3.7 Topologisches Weltmodell

Das zweite Weltmodell, dass hier dargestellt wird, ist das Topologische Weltmodell. Topologische Weltmodelle sind Graphen, die nicht notwendig maßstabsgerechte Abbildungen der Umgebung sind. Der Graph besteht aus signifikanten Stellen (Knoten) und Transitionen (Kanten).

Beispiele für solche Karten sind Netzpläne der Eisenbahn (Bahnhöfe und Strecken, siehe Abbildung 11), Haltestellen und Buslinien eines städtischen Netzes, Autobahnnetz oder Elektroleitungen und Verbraucher in einem Gebäude. Abbildung 11 verdeutlicht das nicht maßstabsgerecht Verhalten, denn Bergedorf (o) liegt ca. 4 km östlicher als Mümmelmansberg (x). Auf dem Bahn-Netz liegt Bergedorf deutlich westlich von Mümmelmansberg.



Abbildung 11: Ausschnitt aus Bahn-Netz in Hamburg

Die Knoten des Graphen eines topologischen Weltmodells sind attribuierte Objekte. Rein topologische Karten enthalten jedoch keine metrischen Distanzinformationen. Die Kanten sind lediglich Verbindungswege zwischen Knoten und können als Attribute Aktions-

sequenzen, wie „rechts abbiegen und geradeaus fahren“, besitzen. Die Karte ist dementsprechend eine starke Vereinfachung der Umwelt. Es werden nur Nachbarschaftsbeziehungen abgebildet, nicht jedoch die präzisen geometrischen Verhältnisse.

Dies ist ein Grund, weshalb diese Art der Umweltrepräsentation gut geeignet ist, um eine Sensordatenfusion durchzuführen, da die Sensordaten unterschiedlicher Quellen einheitlich als Attribute von Knoten oder Kanten behandelt werden. Weiterhin sind topologische Karten aufgrund der Reduzierung der Umgebungsmerkmale auf „interessant“ Merkmale, gut skalierbar auf weiträumigen Umgebungen. Diese grobe Vereinfachung führt jedoch dazu, dass dieses Modell lediglich die Navigation zwischen, aber nicht innerhalb von Regionen erlaubt. Ein weiterer Nachteil bei der Abstrahierung ist es, dass relevante Umgebungsmerkmale verdeckt werden.

Das topologische Weltmodell ist folglich gut geeignet, um eine globale Karte zu erstellen. Da die globale Karte eine Hilfe für eine Navigation zwischen zwei entfernten Punkten ist, sind die Beziehungen zwischen den Punkten wichtig. Genau das, was ein topologisches Modell darstellt. Für die lokale Karte ist es jedoch nicht geeignet, da zu viel abstrahiert wird. Eine genauere Betrachtung für welche Karte dieses Modell geeignet ist, findet im Abschnitt 2.4 statt.

2.3.8 Semantisches Weltmodell

Das dritte und letzte hier dargestellte Weltmodell ist das semantische. Semantische Karten beinhalten weitere Umweltinformationen, sie klassifizieren Objekte. Diese Art von Karte wird zumeist manuell erzeugt, die automatische Erzeugung semantischer Karten steckt noch in den Kinderschuhen. Auf die automatische Generierung solcher semantischer Karten wird hier nicht weiter eingegangen. Genauere Informationen sind in [UNIFR] zu finden.

Ein Beispiel für eine semantische Karte in der Robotik ist die Abbildung 12. Abbildungsteil (a) zeigt eine geometrische Karte eines Korridorabschnitts, die im Teil (b) semantisch interpretiert worden, und in die Bereiche Raum (schwarz), Eingang (rot) und Flur (blau) eingeteilt ist. Abbildungsteil (c) zeigt die daraus entstandene semantische Karte.

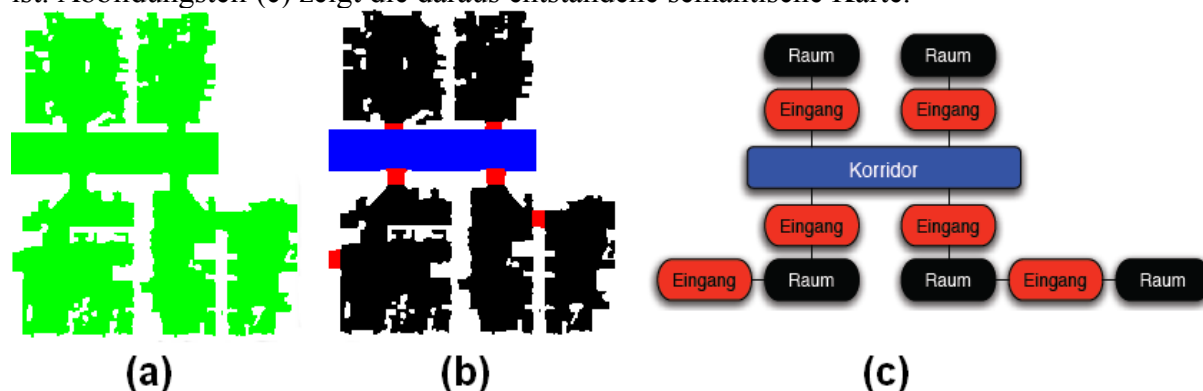


Abbildung 12: (c) semantisch topologische Karte: (a) geometrische Karte (b) geometrische Karte mit semantischer Hervorhebung [UNIFR]

Semantische Karten erhöhen das Abstraktionslevel. Es kann eine Wegplanung durchgeführt werden, die unabhängig von der geometrischen Struktur der Umgebung ist. Die semantischen Eigenschaften erleichtern die Schnittstelle zum Menschen hin umzusetzen.

2.4 Abgrenzung der Modellierungsarten

In diesem Abschnitt werden die vorgestellten Weltmodelle zusammengefasst und auf ihre Nützlichkeit in Hinblick auf lokale und globale Karte hin überprüft, und in welchen Situationen welcher Kartentyp hilfreicher ist.

Für eine lokale Karten sind geometrische Modelle sehr geeignet. Durch die direkte Abbildung der Messdaten in eine Rasterkarte, müssen keine zeitaufwändigen Umrechnungsverfahren durchgeführt werden. Beim Rastermodell kann die Umgebung komplex gestaltet sein, trotzdem kann über das gesamte Umfeld eine Aussage getroffen werden. Dynamik, wie z.B. andere Fahrzeuge oder sich bewegende Menschen, können mit dem rasterbasierten Modell jedoch nicht dargestellt werden. Um dieses Verhalten besser darstellen zu können wären objektbasierte Modelle besser geeignet. Objektbasierte Modelle abstrahieren jedoch die Umgebung, es werden nur relevante Ziele aufgenommen. Durch die Abstraktion ist das Objektmodell damit zum einen ressourcenschonender, zum anderen aber wir nicht über die gesamte Umgebung eine Aussage getroffen. Im „Carolo-Cup“ fahren jedoch keine Fahrzeuge gleichzeitig auf der Rennstrecke, daher kann die Dynamik zunächst in den Hintergrund geschoben werden. Für die weitere Arbeit sollten demzufolge die Verfahren der rasterbasierten geometrischen Weltmodelle für eine lokale Karte in den Fokus kommen. Das topologische Weltmodell eignet sich nicht für eine lokale Karte. Die lokale Karte ist zur Wahrnehmung der direkte Umgebung des Roboters, topologische Modelle abstrahieren die Umgebung soweit, dass sie Umgebungen als Knoten zusammen fasst und die Verbindungen zwischen den Knoten darstellt.

Für die globale Karte sind topologische sowie geometrische Modelle gleichermaßen sinnvoll. Die globale Karte hat zwei große Aufgaben, sie Hilft bei der Selbstlokalisierung und der Navigation. Für die Selbstlokalisierung sind geometrische Weltmodelle sinnvoll, da die lokalen Karten leichter mit gleichartigen Modellen verglichen werden können. Um eine grobe Wegplanung durchzuführen sind topologische Modelle sinnvoller, da für eine grobe Bestimmung des Weges von Punkt A zu Punkt B, nicht alle Details der Umgebung wichtig sind.

3 Selbstlokalisierung

In diesem Kapitel geht es um die Selbstlokalisierung, das Erfassen der eigenen Position. Man führt eine Selbstlokalisierung aus unterschiedlichen Gründen aus. Zum Beispiel um die fehlerbehaftete Standortposition im bekannten Raum zu verbessern, oder um überhaupt die Position im bekannten oder unbekannten Raum zu ermitteln.

Bei der Selbstlokalisierung gibt es zahlreiche Unsicherheiten. Der Roboter bekommt regelmäßig Sensordaten, die fehlerbehaftet sind, führt anhand von Steuerdaten regelmäßig Bewegungen durch, die nicht exakt den vorgegebenen Steuerdaten entsprechen. Aufgrund der

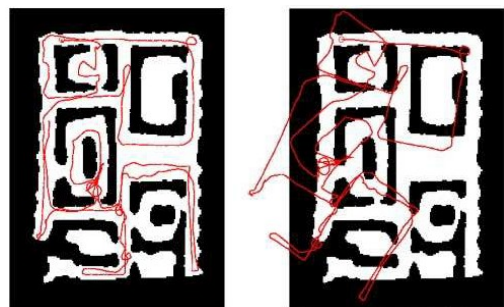


Abbildung 13: Odometrie-basierte Selbstlokalisierung

Sensor- und Steuerdaten schätzt der Roboter seine Position auf seiner Umgebungskarte, die wiederum ungenau ist. Abbildung 13 verdeutlicht, wie ungenau eine Selbstlokalisierung sein kann. Links ist in rot die tatsächlich gefahrene Strecke eines Roboters. Rechts ist die Strecke dargestellt, wie der Roboter die Sensor- und Steuerwerte interpretiert hat. Die

Positionsermittlung beruhte rein auf den odometrischen Daten. Der einzelne Fehler bei der Erfassung der odometrischen Daten, wie er durch Schlupf der Reifen oder Unebenheiten im Boden verursacht werden kann ist gering. Je länger jedoch die gefahrene Strecke ist, desto mehr Fehler treten auf und summieren sich. Die reine Erfassung der odometrischen Daten ist demzufolge keine ideale Lösung. In Kombination mit anderen Verfahren zur Positionserkennung ist sie jedoch hilfreich. Dadurch, dass die Erfassung auf kurzen Strecken relativ genau ist, können Suchgebiete von anderen Verfahren eingegrenzt werden. So beispielsweise im sogenannten „Scanmatching“. Beim „Scanmatching“ werden gemessene Abstandsprofile (z.B. von einem Laser aufgenommenen Scan) gegen eine metrische Karte abgeglichen. Mit Hilfe der odometrischen Karten, kann der Suchbereich für den Abgleich eingegrenzt werden. Ist die genaue Position ermittelt, können die Daten für die Odometrische Ermittlung korrigiert werden. Diese beiden Verfahren gemeinsam genutzt, sind genauer und im Gegensatz zum reinen „Scanmatching“. [HTWKGK]

Es gibt noch andere Verfahren zur Selbstlokalisierung die hier jedoch nur kurz erwähnt, nicht aber genauer beschrieben werden. Zur Verbesserung der Ermittlung mit Hilfe der odometrischen Daten gibt es die „Koppelnavigation“ (engl. „dead reckoning“). Hierbei die neue Position in Abhängigkeit zur alten berechnet. Die Selbstlokalisierung lässt sich mit Hilfe von Landmarken realisieren. Dabei können die Landmarken von künstlicher (z.B. Barcode- oder Reflexstreifen an der Umgebung) oder von natürlicher (z.B. Kanten und Ecken von Türöffnungen oder Oberflächenstrukturen) Herkunft sein. Es gibt auch Verfahren, welche die Fehler der Messung berücksichtigen, und den wahren unbekannten Zustand möglichst genau zu schätzen. Solche Verfahren sind der Kalman-Filter [KALMA], Markov-Lokalisierung [MARKL] und Monte-Carlo-Lokalisierung [MCLMR].

Ist keine Karte vorgegeben, muss gleichzeitig ein Aufbau einer Karte und die Bestimmung der eigenen Position statt finden. Dieses Problem wird SLAM (simultaneous localization and mapping) genannt. Beim Erstellen der Karte kann keine Korrektur anhand einer existierenden Karte statt finden, die wegen der Unsicherheiten durch die Ungenauigkeit der Sensoren auftreten. Durch kleine Fehler bei der Selbstlokalisierung werden die Abstandsmessungen an falscher Position und mit Orientierungsfehler in die Karte eingetragen, der Roboter befährt bei der Kartierung tatsächlich eine andere Strecke als er annimmt.

4 Navigation

In diesem Kapitel behandelt die zielgerichtete Bewegung des Roboters, die Navigation. Um eine Navigation durchzuführen, müssen zwei Arten der Navigation betrachtet werden. Die eine Navigationsart, ist die grobe Navigation. Die grobe Navigation hat das Aufgabe bekannte Sackgassen und Hindernisse zu vermeiden und so das Hauptziel zu verfolgen. Um eine grobe Navigation durchzuführen, wird eine globale Karte benötigt. Diese Karte kann von geometrischer oder auch objektorientierter Natur sein. Abbildung 14 zeigt eine globale Karte eines Flures und den geplanten Weg von einem Raum zu den Fahrstühlen. In der globalen Karte sind keine Hindernisse eingetragen, die ihre Position

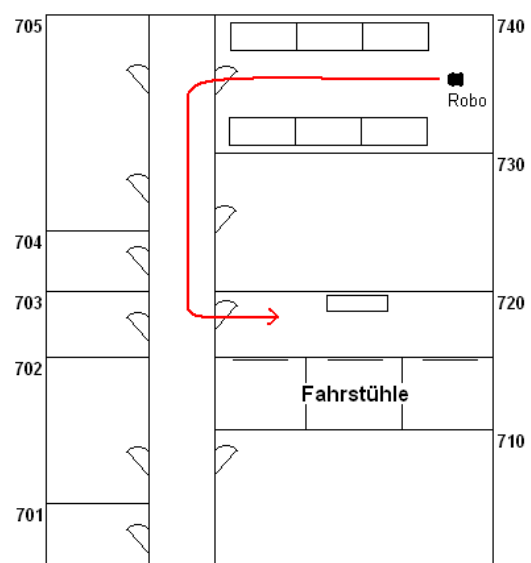


Abbildung 14: grobe Navigation

oft verändern, wie Stühle und Menschen. Um eine Kollision mit solchen Hindernissen zu vermeiden, wird eine lokale Navigation benötigt.

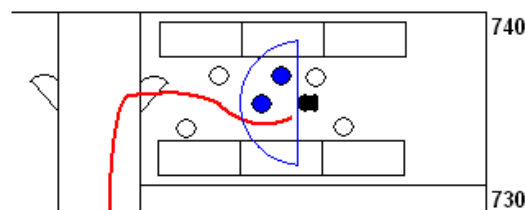


Abbildung 15: feine Navigation

Bei der lokalen Planung, wird die nahe Umgebung des Roboters berücksichtigt. Um diese Planung durchzuführen wird die lokale Karte genutzt und ein lokales Navigationsziel angestrebt. Dieses lokale Navigationsziel befindet sich auf der Wegstrecke der groben Planung. Hindernisse werden erkannt und bei der lokalen Planung mit einbezogen, so dass den Hindernissen ausgewichen werden kann (siehe Abbildung 15).

Durch die Verbindung der lokalen und globalen Navigation ist eine optimale Bewegung des Roboters möglich. Welche Verfahren zur Wegplanung eingesetzt werden hängt von den eingesetzten Karten ab. In topologischen Karten kann z.B. der Dijkstra – Algorithmus (oder der verbesserte A* – Algorithmus [HTWGK]) zur Wegfindung benutzt werden, da die topologische Karte ein Graph ist. Bei geometrischen Karten können Algorithmen wie „Sichtgraphen“ [UNIUL], „Potential Fields“ [UNIUL] oder „generalisierte Voronoi Diagram“ [MRNGV] eingesetzt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick auf AW II

In dieser Ausarbeitung wurde dargestellt, dass autonome Fahrzeuge in der Forschung immer mehr in den Fokus kommen. Die *HAW-Hamburg* nimmt mit einem eigenen autonomen Modellfahrzeug an dem Wettbewerb „*Carolo-Cup*“ teil. Dieses Navigation dieses Fahrzeug war bislang ohne Unterstützung einer Umgebungskarte ausgekommen. In dieser Ausarbeitung wurde gezeigt, warum eine Karte bei der Navigation autonomer Fahrzeuge von Vorteil sein kann. Dazu wurden Methoden zur Kartenerstellung vorgestellt und angedeutet, wie vielfältig Karten erstellt werden können und welche Schwierigkeiten es dabei gibt. Ist eine Karte vorhanden muss das autonome Fahrzeug seine Position innerhalb der Karte ermitteln können. Als letztes wurde das Thema der Navigation angeschnitten, es wurde verdeutlicht, dass es in diesem Teilbereich ebenfalls viele Umsetzungsmöglichkeiten gibt

In Hinblick auf Anwendungen II sind bei dem Thema Kartenerstellung und Navigation für autonome mobile Fahrzeuge einige Themenbereiche noch offen. Zum einen wurden die Verfahren zur Kartenerstellung nur oberflächlich beschrieben, ihre Implementierung jedoch noch nicht betrachtet. Weiterhin fehlt noch eine Analyse mit welchen Hilfsmitteln die Fusionierung von lokalen Karten unterschiedlicher Sensoren statt finden kann.

6 Anhang

I Darstellungsformen von geometrischen Weltmodellen

Karten lassen sich, wie im Abschnitt 2.3.6 erwähnt unterschiedlich darstellen. Es gibt zwei wesentlich unterscheidbare Methoden: rasterbasierte und objektbasierte Darstellung. Die intuitivste Kartendarstellung ist die Rasterkarte (Abschnitt I.1). In ihr werden alle gesammelten Informationen gespeichert, es wird über jedes Feld eine Aussage getroffen. Bei der objektbasierten Darstellung (siehe Abschnitt I.2) wird eine geringe Abstraktion vorgenommen. Die Hindernisse werden durch geometrische Repräsentationen dargestellt.

I.1 Rasterbasiert

Die Umgebung wird in ein Raster aufgeteilt. Jeder Zelle wird ein Wert zugewiesen. Dieser Wert kann unterschiedliche Bedeutungen haben, z.B. Feld ist belegt, oder Feld kann befahren werden. In Abbildung 16 ist eine Kurve einer Straße dargestellt. Die grüne Belegung der Zelle bedeutet, dass das Fahrzeug dort fahren darf. Außerhalb der Straße sind die Zellen rot markiert, hier darf das Fahrzeug nicht hin.

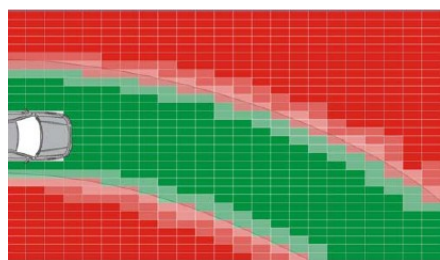
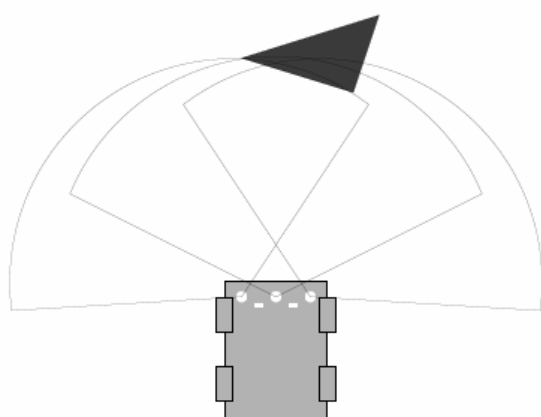


Abbildung 16: Rasterkarte [AAETb]

Es gibt verschiedene Möglichkeiten solche Rasterkarten abzubilden. Die einfachste Möglichkeit ist beispielsweise das „Occupancy Grid“ [OCCGM]. Die Felder haben eine definierte Größe. Jede Zelle entspricht z.B. 1x1cm. Die Werte der Zelle geben eine Wahrscheinlichkeit der Belegtheit des Feldes an. Es können Werte zwischen 0x0 (hexadezimal) und 0xff auftreten. Ein Wert 0x80 zeigt an, dass das Feld noch undefiniert ist. Der Wert 0xFF besagt, dass das Feld belegt ist. Abbildung 17 zeigt eine solche

Rasterkarte. Der Roboter hat vor sich mit mehreren Sensoren einen Gegenstand entdeckt (siehe Abbildung 17a). In Abbildung 17b sind die Sensordaten zu einer gemeinsamen Karte zusammengefasst. Es ist das Hindernis zu erkennen. Hinter dem Hindernis wurden die Zellen mit 0x80 belegt, da der Roboter noch nicht hinter das Hindernis gekommen ist.



(a) Obstacle in front of car

00	00	01	00	0B	0A	07	80	80	80	80	80	80	00	02	06	00
00	04	00	03	00	07	0A	FF	FF	FF	80	80	01	00	03	05	00
06	00	01	01	00	00	07	02	0D	00	FF	00	00	09	00	00	00
00	01	00	00	00	03	00	04	00	02	00	01	00	07	01	01	08
00	00	02	02	00	00	06	00	08	02	09	00	03	00	00	00	00
00	00	04	05	00	02	00	00	02	00	05	00	0A	00	00	00	06
03	05	00	00	01	02	00	01	01	00	02	00	00	02	04	02	06
02	00	00	04	01	00	00	01	01	00	01	00	00	00	00	00	00
00	00	02	00	00	02	00	00	00	00	00	01	02	01	05	01	02
00	06	00	00	00	00	02	00	00	00	00	01	00	00	00	01	00
80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80

(b) Representation in certainty grid

Abbildung 17: Occupancy Grid [TUWIN]

Wie man in Abbildung 16 sehen kann, sind Kurven und schräge Flächen (siehe auch Abbildung 17) nur sehr ungenau dargestellt. Das liegt an der fest vorgegebenen Rastergröße

der Zellen. Um bessere Aussagen über diese Grenzbereiche treffen zu können, kann ein Verfahren wie Quadtree helfen.

Ein Quadtree ist eine spezielle Baum-Struktur, in der jeder innere Knoten bis zu vier Kinder haben kann. Das Wort Quadtree leitet sich von der Zahl der Kinder eines inneren Knotens ab (quad (vier) + tree (Baum) = Quadtree). Es gibt verschiedene Ausprägungen des Quadtrees, diese haben jedoch folgende Eigenschaften gemein:

- es werden die Zellen in gleich große Zellen unterteilt
- jede Zelle hat eine max. Kapazität. Wenn diese erreicht ist, teilt sich die Zelle
- Das Verzeichnis des Baumes folgt der räumlichen Aufteilung des Quadtrees

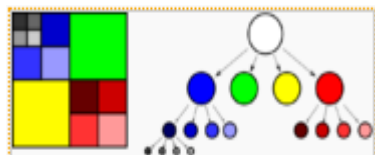


Abbildung 18: Quadtree [QTREE]

Eine Ausprägung des Quadtrees ist der „Region Quadtree“ (siehe Abbildung 18). Dieses Verfahren bildet eine Teilung des Raumes in 2 Dimensionen dar. Dabei werden die Regionen in vier gleich große Quadranten, Unterquadranten und so weiter zerlegt, wobei jeder Blattknoten die Daten zu einer speziellen Unterregion enthält. Jeder Knoten kann keine oder vier Kinder haben.

Um eine bessere Genauigkeit von Schrägen und Kurven zu erhalten, könnten die einzelnen Zellen der Rasterkarte einen Region Quadtree, mit einer maximalen Höhe, enthalten.

Abbildung 19 zeigt, dass eine Quadtreehöhe von drei eine deutliche Verbesserung darstellt. Das Bild A zeigt, wie eine Säule ganz korrekt in dem Raster wäre. Bild B zeigt, was in Occupancy Grid abgespeichert werden würde. Bild C zeigt, die Darstellung mit dem Region Quadtree. In Bild C ist der Kreis deutlicher zu erkennen als im Bild B. Wollte man die selbe Genauigkeit von Bild C mit dem Occupancy Grid erreichen, so müsste das gesamte Raster verkleinert werden und würde dann deutlich mehr Speicher verbrauchen.

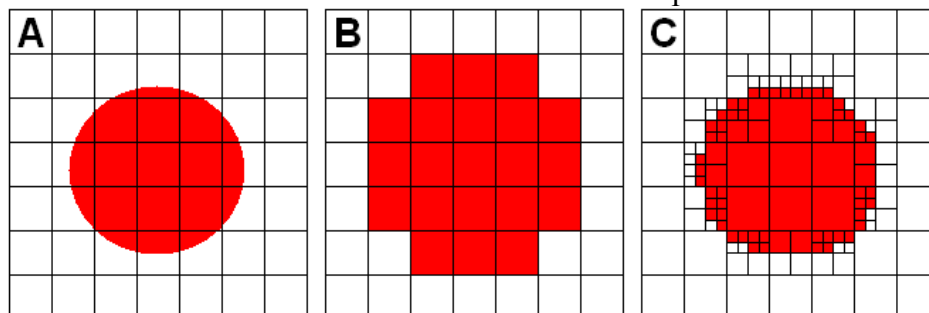


Abbildung 19: „Occupancy Grid“ gegen „Quadtree“

Zusammenfassend kann man sagen, dass die rasterbasierte Darstellungsform eine Aussage für das gesamte Umfeld gibt, dabei jedoch eine hohe Datenmenge und somit auch ein erhöhter Speicherzugriff auftritt. Da jedoch die Darstellung probabilistisch ist, und somit auch keine harte Existenzaussage nötig ist, kann die Umgebung recht präzise abgebildet werden.

1.2 Objektbasiert – geometrische Repräsentation

Bei objektbasierten Karten werden die Hindernisse durch geometrische Repräsentationen dargestellt. Hierbei werden eine Menge von Objekten jeweils mit Positionsangabe gespeichert. Die Positionsangabe ist hierbei jedoch nicht unbedingt an ein Raster gebunden. Die Objekte können neben ihrer geometrische Beschreibung auch weitere Informationen gespeichert

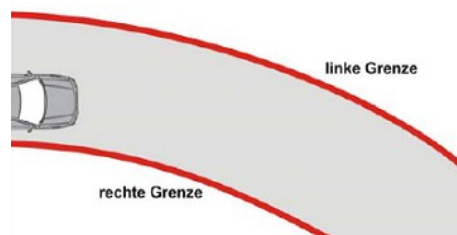


Abbildung 20: Objektkarte [AAETb]

haben. In Abbildung 20 ist der selbe Straßenausschnitt wie in Abbildung 16 dargestellt, hier jedoch als objektbasierte Darstellung.

In Abbildung 21 ist eine objektbasierte Karte (a) einem Occupancy Grid (b) gegenüber gestellt. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Karte kompakter ist, was zu einer geringeren Datenmenge führt. Die objektbasierte Karte stellt die schrägen Elemente exakter dar. Bewegt sich ein Objekt in der objektbasierten Karte, muss lediglich die Position des Objektes geändert werden, beim Occupancy Grid müsste unter anderem jeder Zelleneintrag der zum Objekt gehört verändert werden.

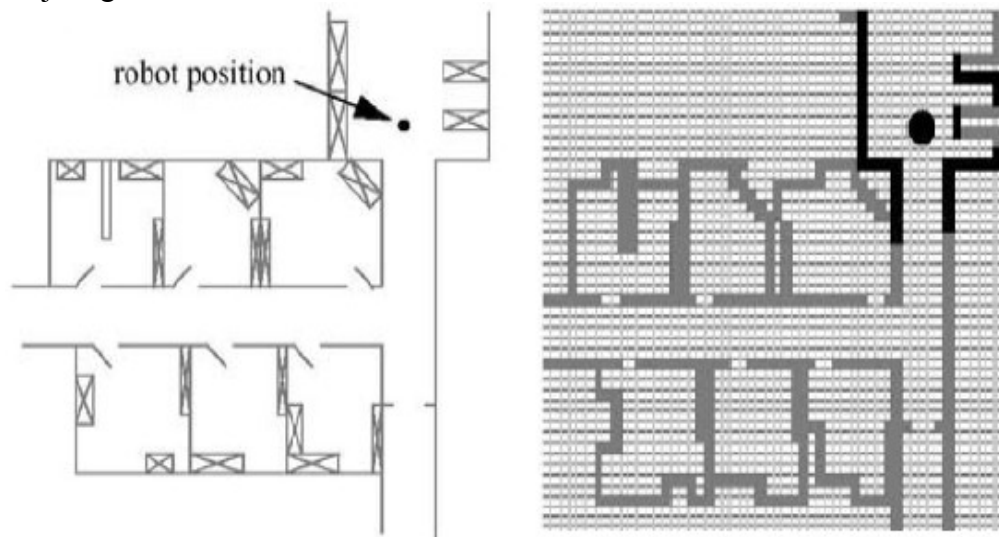


Abbildung 21: (a) objektbasiert (b) rasterbasiert [HTWGK]

Beim objektbasierten Karten, muss es eine eindeutige Existenzaussage geben, um die Objekte darstellen zu können. Diese ist jedoch oft nicht möglich. Weiterhin ist die Frage zu klären, was relevante Ziele sind, die gespeichert werden sollen. Durch Weglassen einiger Objekt und durch die Abstraktion der Objekte, ist das Weltmodell stark vereinfacht.

II Bilderverzeichnis

Abbildung 1: Pioneer.....	5
Abbildung 2: Carolo-Cup – Fahrzeug.....	5
Abbildung 3: Fahrspurverlust.....	6
Abbildung 4: Kartenfusion.....	7
Abbildung 5: lokale Karte.....	7
Abbildung 6: globale Karte.....	7
Abbildung 7 : (a) geometrische Karte (b) topologische Karte (c) semantische Karte.	8
Abbildung 8: geometrisches Weltmodell [UNIBN].....	8
Abbildung 9: rasterbasierte Karte [AAETb].....	9
Abbildung 10: objektbasiert Karte[AAETb].....	9
Abbildung 11: Ausschnitt aus Bahn-Netzes in Hamburg.....	9
Abbildung 12: (c) semantisch topologische Karte: (a) geometrische Karte (b) geometrische Karte mit semantischer Hervorhebung [UNIFR].....	10
Abbildung 13: Odometriebasierte Selbstlokalisierung.....	11
Abbildung 14: grobe Navigation.....	12
Abbildung 15: feine Navigation.....	13
Abbildung 16: Rasterkarte [AAETb].....	14
Abbildung 17: Occupancy Grid [TUWIN].....	14
Abbildung 18: Quadtree [QTREE].....	15
Abbildung 19: „Occupancy Grid“ gegen „Quadtree“.....	15
Abbildung 20: Objektkarte [AAETb].....	15
Abbildung 21: (a) objektbasiert (b) rasterbasiert [HTWKG].....	16

III Literaturverzeichnis

- [AAETa] Automatisierungs-, Assistenz- und eingebettete Systeme für Transportmittel
Fachtagung: veranstaltet durch das *Zentrum für Verkehr der TU Braunschweig* und das *Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig e.V.*
<http://www.gzvb.de/index.php?id=790>
- [AAETb] TU Braunschweig: „Tracking und Datenfusion im urbanen Fahrzeugumfeld“.
Vortrag im Rahmen der *AAET 2007*.
- [AMROB] Firma ActiveMedia Robotics, Hersteller des Pioneers
<http://www.activrobots.com/>
- [DARGC] DARPA: Grand Challenge / Urban Challenge.
Wettbewerb für unbemannte Landfahrzeuge
<http://www.darpa.mil/grandchallenge05/spectators.html>
- [HAWHH] J. Grawe, O. Groht: „Entwicklung und Realisierung eines Garbage-Collecting Serviceroboters für partiell bekannte Räume“.
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, HAW-Hamburg, Fakultät Technik und Informatik, Diplomarbeit 1999.
<http://users.informatik.haw-hamburg.de/~pioneer/Projekte/projekte.html>
- [HTWGK] Prof. Dr. Oliver Bittel. “Mobile Roboter”.
Hochschule Konstanz für Technik, Wirtschaft und Gestaltung, HTWG Konstanz, Vorlesung SS 2008
<http://www-home.fh-konstanz.de/~bittel/roboMSI/robo.htm>
- [HOKUY] Firma Hokuyo, Hersteller des Laserscanner PBS
<http://www.hokuyo-aut.jp/>
- [KALMA] G. Welch, G. Bishop. “Kalman-Filter”.
University of North Carolina at Chapel Hill, UNC Chapel Hill,
<http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/>

http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter
- [MARKL] D. Fox, W. Burgard, S. Thrun. Markov Localization for Mobile Robots in Dynamic Environments.
Journal of Artificial Intelligence Research, Volume 11: 391-427. 1999
- [MCLMR] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, S. Thrun. “Monte Carlo Localization for Mobile Robots”.
Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Volume 2: 1322-1328, 1999
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6243/16780/00772544.pdf?tp=&arnumber=772544&isnumber=16780>
- [MRNGV] H. Choset, I. Kanukseven, J.Burdick. „Mobile Robot Navigation: Issues in Implementating the Generalized Voronoi Graph in the Plane”.
Proceedings of the 1996 IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Pages: 241 - 248, 1996
- [OCCGM] A. Elfes. “Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation”.

IEEE – Computer, Volume 22, Issues 6: 46-57, 1989

- [TFALD] D.Berger. “Fahrspurerkennung mit Three Feature Based Lane Detection Algorithm (TFALDA)”.
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, HAW-Hamburg, Fakultät Technik und Informatik, Studienarbeit 2008
<http://www.informatik.haw-hamburg.de>
- [TUBCC] Carolo-Cup. TU Braunschweig, Hochschulwettbewerb
<http://www.carolo-cup.de/>
- [TUBLF] T. Müller. „Es können Wettbewerbsfahrzeuge für eigene Entwicklungen ausgeliehen werden“.
Carolo-Cup, Öffentlichkeitsarbeit, Neuigkeiten
<http://www.carolo-cup.de/oeffentlichkeitsarbeit/neuigkeiten/neuigkeiten-im-detail/article//es-koennen-m.html>
- [TUBLR] T. Lauk-Reineke. „Aufbau einer Versuchsplattform für die Implementierung und Erprobung von Fahrassistentensystemen auf Basis einer TriCore-CPU mit einem OSEK-Betriebssystem“.
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Diplomarbeit 2007
<http://www.carolo-cup.de/wettbewerb/2008/dokumente.html>
- [TUGRA] G. Kraschl. „Routenplanung für mobile Roboter“.
Technische Universität Graz, Institut für Navigation und Satellitengeodäsie, Magisterarbeit 2005
- [TUILM] Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Neuroinformatik
<http://wcms1.rz.tu-ilmenau.de/fakia/Home.4208.0.html?&L=1>
- [TUWIN] W. Elmenreich, L. Schneider, R. Kirner. “A Robust Certainty Grid Algorithm for Robotic Vision”.
6th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), pages 25-30, May 2001
<http://citeseer.ist.psu.edu/540868.html>
- [UNIBN] W. Burgard, D. Fox, D. Hennig, T. Schmidt. “Estimating the Absolute Position of a Mobile Robot – Using Position Probability Grids”.
Proc. of the 14th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96), Volume 2: 896-901, 1996
- [UNIFR] J.Fischer. “Probabilistic Smoothing Methods for Semantic Map Labeling”.
Universität Freiburg, Institut für Informatik, Studienarbeit 2006
<http://www.informatik.uni-freiburg.de/~omartine/teaching.html>
- [UNIUL] Dr. M. Oubbati. „Einführung in die Robotik“.
Universität Ulm, Institut für Neuroinformatik, Vorlesung: WS 2007/08
<http://www.informatik.uni-ulm.de/neuro/index.php?id=287&type=3>
- [QTREE] ”Quadtree”, Definition
<http://en.wikipedia.org/wiki/Quadtree>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Quadtree>