

Selbstständige Erstellung einer abstrakten topologiebasierten Karte für die autonome Exploration

Kalle Kleinlützum, Tobias Luksch, Daniel Schmidt und Karsten Berns

Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Informatik, AG Robotersysteme,
luksch@informatik.uni-kl.de

Zusammenfassung. Mobile Roboter, die Tätigkeiten in einer Indoor-Umgebung ausführen sollen, benötigen zur Orientierung eine Karte ihrer Umgebung, die sie im besten Falle selbst erstellen sollten. Bei der Exploration unbekannter Umgebung hat sich die Verwendung topologiebasierter Karten als sinnvoll erwiesen, da diese die Lokalisierung und Navigation für mobile Roboter vereinfachen. Probleme gab es bisher häufig aufgrund ungünstiger Rasterung oder fehlender Autonomie. Der vorgestellte Ansatz legt schrittweise eine topologische Karte aus rechteckigen Räumen an, während sich der Roboter durch seine Umgebung bewegt, die mit Laserscannern erfasst wird. Die Leistung des Verfahrens wird in der Simulation und in ersten realen Testläufen untersucht.

1 Einleitung

Für mobile Roboter in strukturierter Umgebung wie Bürogebäuden, Krankenhäusern, Museen oder Fabrikgeländen sind eine Vielzahl von Tätigkeiten denkbar, zum Beispiel Transportaufgaben, interaktive Führungen oder Gebäudeüberwachung. Für diese Anwendungen ist es zumeist notwendig, dass der Roboter eine Karte der Umgebung besitzt, um sich zu orientieren, d.h. Lokalisation und Navigation durchführen zu können.

Soll dem Roboter zudem keine Karte der Umwelt vorgegeben werden und er sie stattdessen selbst erstellen, ist das Problem der autonomen Exploration zu lösen (*simultaneous localization and mapping*, *SLAM*). Die Wahl der Repräsentationsform spielt dabei eine entscheidende Rolle.

1.1 Kartierungsformen für die Exploration im Indoor-Bereich

Die in der Robotik verwendeten Kartierungsformen lassen sich grob in drei Gruppen einteilen: Rasterkarten (grid maps), geometrische Karten und topologische Karten.

In Grid Maps ist die Umgebung in gleichgroße Kacheln eingeteilt, die einen Belegungszustand besitzen. Hier gibt es bereits viele verschiedene Ansätze, die beispielsweise die gesamte Roboterumgebung in einer einzigen großen Karte erfassen [1] oder aus einer Grid Map eine topologische Karte generieren [2].

Darüber hinaus gibt es auch Möglichkeiten der Integration beider Kartentypen, um die Vorteile beider Verfahren zu nutzen [3].

Bei geometrischen Karten wird die Umwelt durch extrahierte geometrische Merkmale beschrieben, wie z.B. Polygonzüge. Auch hier gibt es in der Literatur vielfältige Bezeichnungen und Ausprägungen: Sie reichen von *Maps containing geometrical beacons* [4] über *Shape-based maps* [5] bis hin zu *Polygonal maps* [6].

In topologischen Repräsentationen ist die Karte zusätzlich in Regionen (Knoten) eingeteilt, die durch ihre Position und Konnektivität die topologische Struktur der Roboterumgebung wiedergeben. Existierende Ansätze, die topologische Karten bei der Exploration fortlaufend angelegen, generieren diese meist in festen Abständen [7][8]. Im vorgestellten Ansatz dagegen werden die einzelnen Räume (d.h. Regionen) der Topologie als Rechtecke modelliert und orientieren sich soweit wie möglich an den räumlichen Gegebenheiten; eine Darstellung, die sich z.B. in den Karten von [2] oder [9] findet und eher dem menschlichen Verständnis von Kartenelementen entspricht. Ein Grund für dieses vereinfachte Raummodell war die Intention, die Kartierung so abstrakt wie möglich zu halten und damit die Robustheit zu verbessern. Kleinere Strukturen der Umgebung, die in einer solchen Karte nicht verzeichnet sind, werden von der verhaltensbasierten Basissteuerung behandelt.

Die Lokalisierung mit derart vereinfachten Raummodellen wird in [9] und [10] untersucht. Dieses einfache Raummodell setzt allerdings restriktive Annahmen wie rechtwinklige Gebäudearchitektur voraus und ist lediglich in strukturierter Indoor-Umgebung einsetzbar, die man jedoch z.B. in Bürogebäuden häufig vorfindet.

2 Systemübersicht

Der Systemaufbau des vorgestellten Ansatzes gliedert sich in drei wesentliche Komponenten, die *Raumerkennung*, die *Kartenerstellung* und die *Lokalisierung* (siehe Abbildung 1), die in die vorhandene verhaltensbasierte Basisarchitektur eingebunden werden. Die schon umgesetzten Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

2.1 Raumerkennung

Die Raumerkennung extrahiert aus den Daten zweier planarer Laserscanner einen den Roboter umgebenden rechteckigen Raum. Die Raum-Extraktion wird in sechs Einzelschritten durchgeführt:

Zuerst werden die Rohdaten der Scanner (Abb. 3(a)) geglättet, dann werden Kanten mittels *recursive line splitting* extrahiert (Abb. 3(b)). In diesen Kanten werden nun Kandidaten für die vier Raumwände bestimmt (Abb. 2). Aufgrund des rechteckigen Raummodells wird dann ein Raum um den Roboter festgelegt (Abb. 3(c)). Im letzten Schritt werden Öffnungen und Verdeckungen des rechteckigen Raumumrisses bestimmt (Abb. 3(d)). Dazu werden die vier Raumwände in so genannte Segmente eingeteilt, die angeben, wie die extrahierten Scankanten

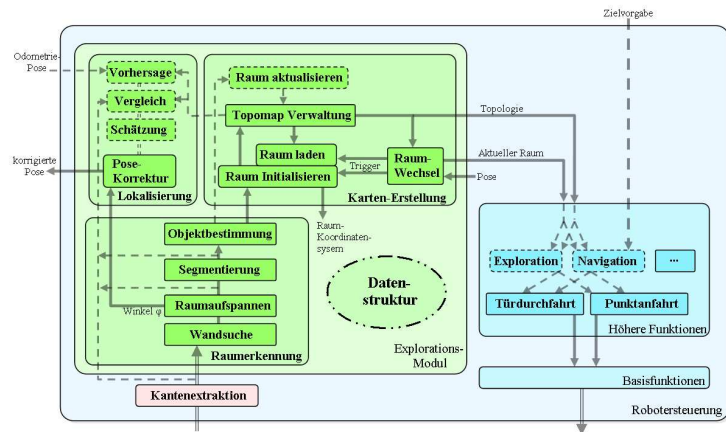


Abb. 1. Aufbau des (geplanten) Gesamtsystems

zu den aufgespannten Wänden liegen. Liegen Scankanten vom Roboter aus gesehen hinter der Wand, so werden an diesen Stellen Segmente vom Typ 'Öffnung' eingefügt. Ab einer gewissen Mindestgröße werden diese Öffnungen als Durchgänge (Türen) in die topologische Karte eingetragen. Umgekehrt werden Segmente vom Typ 'Verdeckt' eingesetzt, wenn Scankanten vor der Wand liegen. Das ist der Fall, wenn Teile der Wand durch Objekte verdeckt sind [11].

```

Eingabe aller realen Kanten k aus Kantenextraktion in Menge K
Aussortieren aller Kanten k mit Länge  $l(k) < l_{min}$  aus Menge K
FOR ALL  $k_i$  IN K DO
  Erzeuge leeren Wandkandidaten  $w_i$  mit Längenmaß  $L(w_i) = 0$  in Menge W
  FOR ALL  $k_j$  IN K DO
    IF  $k_j$  ELEMENT OF w-Umgebung von  $k_i$ 
      AND Winkelabweichung  $\alpha_{ij} < \alpha_{max}$ 
        Füge  $k_j$  dem von  $k_i$  aufgespannten Wandkandidaten  $w_i$  hinzu
        Addiere die Länge  $l(k_j)$  zu der Längenmaß  $L(w_i)$ 

```

Abb. 2. Algorithmus zur Bestimmung von Wandkandidaten

2.2 Raumaktualisierung

Zwei weitere wichtige Aspekte sind die Erweiterung und das Aktualisieren der bereits erkannten Räume. Die Aktualisierung ist besonders hinsichtlich dynamischer Türen interessant, da diese geöffnet und geschlossen werden können. Dazu werden alle Wandsegmente um einen Zuverlässigkeitswert erweitert, der angibt,

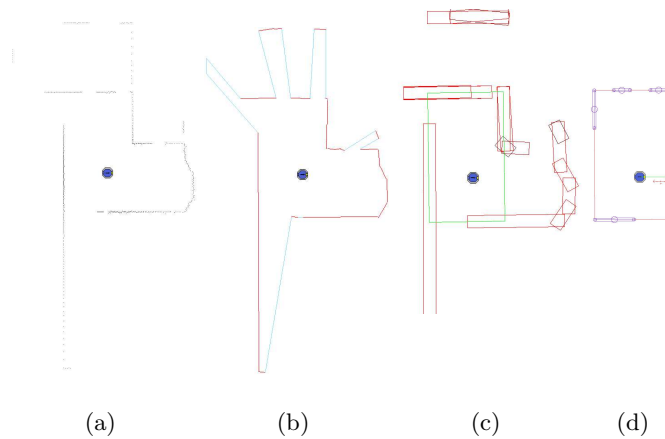


Abb. 3. (a) Die Rohdaten der Scanner, (b) Ergebnis der Kantenextraktion, (c) Aufgespannter Raum, (d) Türen semantisch erfasst und Raumkoordinaten festgelegt

wie sicher diese erkannt wurden. Bewegt sich der Roboter durch einen erkannten Raum, erzeugt er regelmäßig eine zweite Raumkarte, die er mit der bereits gespeicherten vergleicht. Wenn neue oder besser erkannte Segmente gefunden werden, so wird die vorhandene Karte aktualisiert. Abbildung 4(a) zeigt einen langen Gang direkt nach der Initialisierung, d.h. die Raumdimensionen wurden erstmals ermittelt und die vier Raumwände in die bereits genannten Segmente unterteilt und Türen ermittelt. Dabei wurden die rechten und linken Bereiche des Raumes noch relativ unzuverlässig erkannt. Bewegt sich der Roboter nun durch den Raum, werden nach und nach die unzuverlässigen Segmente durch besser erkannte Segmente ersetzt (Abb. 4(b)). Auf diese Weise erscheinen auch neue Türen, die in die topologische Karte eingetragen werden.

Neben der Aktualisierung ist noch die Erweiterung der Raumdimensionen notwendig: Mit zunehmender Entfernung werden die Laserscannerdaten unzuverlässig, weswegen in langen Gängen oder großen Räumen bei der hier vorgestellten Raumerkennung zuerst ein kleinerer Raum angelegt wird. Mit Hilfe der zweiten aktuellen Raumkarte kann der vorhandene Raum erweitert werden, wenn eine Wand undefiniert ist (d.h. die Scannerdaten in dieser Richtung zu schlecht waren) oder sie aus einer einzigen großen Öffnung besteht (Abb. 4(c)). Auf diese Weise können auch größere Räume vom Roboter erschlossen werden, die er nicht sicher mit einem Scan erfassen kann (Abb. 4(d)).

Bei dieser Aktualisierung können auch bereits erkannte Türen wieder aus der Raumkarte ausgetragen werden (wie beim Wechsel von Abb. 4(b) nach 4(c) unten links). Sie werden aber fest eingetragen, sobald sie vom Roboter durchfahren wurden. Auf diese Weise bleiben Türen in der topologischen Karte gespeichert, auch wenn sie zur Zeit geschlossen sind, der Roboter aber bereits hindurchgefahren ist.

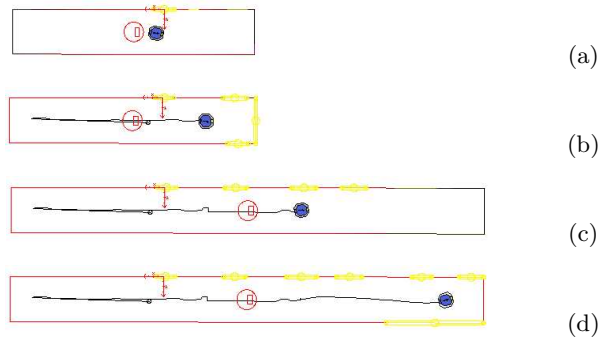


Abb. 4. (a) Raumdarstellung direkt nach der Initialisierung, (b) Aktualisierter Raum, (c) Erweiterter Raum, (d) Komplett erkannter Raum

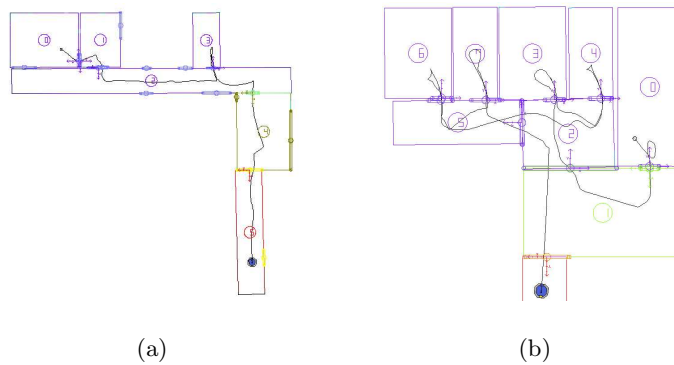


Abb. 5. (a) Kartenerstellung in langen Fluren, (b) Ablauf mit vielen Räumen

2.3 Kartenerstellung

Wenn sich der Roboter durch seine Umgebung bewegt, werden, ausgehend vom Startraum, neue, noch unbekannte rechteckige Räume zur topologischen Karte hinzugefügt. Abbildung 5(a) zeigt eine Beispielfahrt durch den Flur und einige benachbarte Räume sowie die geometrische Darstellung der dabei erstellten topologischen Karte aus der Simulation. Die Topologie selbst beschreibt die Verbindung einzelner Räume. Diese Verbindungen entsprechen den Türen, die, ausgehend vom jeweiligen Raum, angeben, in welchen weiteren Raum sie führen. Führt eine Tür in einen unbekanntem Raum, so wird beim Betreten ein neuer Raum entsprechend dem vorgestellten Verfahren angelegt und gespeichert. Ist der Raum hingegen bereits bekannt, wird er aus der topologischen Karte geladen. Dabei ist das Auftreten von Zyklen möglich, d.h. eine Tür führt in einen bereits bekannten Raum, den der Roboter jedoch durch eine andere Tür ver-

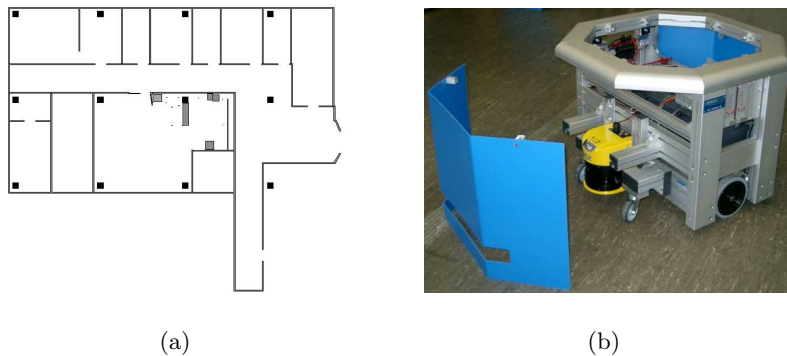


Abb. 6. (a) Simulierte Büroumgebung, (b) Roboter *Marvin* (offen)

lassen hat. Derartige Fälle werden bemerkt, indem für jede Tür des aktuellen Raumes überprüft wird, ob sie auf einer Wand eines Nachbarraumes liegt.

3 Ergebnisse

3.1 Simulationsergebnisse

Die Kartierung wurde in der Simulation getestet, in der keine Odometriefehler auftreten. Dazu wurden Abstandsdaten der Laserscanner entsprechend einer vorgegebenen Büroumgebung (Abb. 6(a)) generiert und mit Rauschen behaftet. Bei der Fahrt durch die simulierten Räumlichkeiten konnte das schrittweise Anlegen einer Karte überprüft werden (Abb. 5(b)). Da zur Zeit noch Explorations- und Navigationsstrategien fehlen, muss der Roboter manuell durch die Umgebung gefahren werden. Die topologische Karte wird aber ausschließlich anhand der vom Roboter gemessenen Umgebungsdaten erstellt und erweitert.

3.2 Der Roboter *Marvin*

Der Roboter *marvin* (**m**obile **a**utonomous **r**obotic **v**ehicle for **i**ndoor **n**avigation, Abb. 6(b)) ist eine AMR-Plattform mit Differentialantrieb, zwei SICK-Laserscannern und einer verhaltensbasierten Steuerungsarchitektur. Erste Versuche zeigen, dass der Ansatz mit dem realen Roboter vielversprechend ist und sich wie in der Simulation verhält, jedoch sind weitere Versuche über einen längeren Zeitraum nur mit einer vollständig umgesetzten Positionskorrektur sinnvoll.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Ansatz zur selbstständigen Erstellung einer Umgebungskarte für Indoor-Roboter vorgestellt. Da die lokale Navigation durch die verhaltensbasierte Basissteuerung durchgeführt wird, fiel die Entscheidung auf eine abstrakte,

topologiebasierte Repräsentationsform. Es konnte in der Simulation und eingeschränkt in der Realität gezeigt werden, dass der Roboter eine solche Karte während einer Explorationsfahrt in einer Umgebung mit rechtwinkligen Räumen autonom anlegen und erweitern kann. Die darin enthaltene ungefähre Position der Türen jedes Raumes reicht aus, um eine verhaltensbasierte Navigation von Raum zu Raum zu erlauben.

Nächste Schritte bei der Weiterentwicklung sind die Erweiterung der Positionsbestimmung des Roboters, die bislang nur zum Teil implementiert ist. Das folgende Ziel ist die autonome Exploration und Kartierung, die mittels einer verhaltensbasierten Steuerung realisiert werden soll. Dabei soll der Roboter nicht unbedingt den kürzesten, wohl aber den für ihn interessantesten Weg wählen. Weiterhin ist angedacht, innerhalb der lokalen Räume zusätzliche Detailinformationen zu sammeln und beispielsweise in Form von grid maps oder geometrischer Primitive einzufügen. Das ist besonders dann wichtig, wenn die Räume eine semantische Bedeutung erhalten und der Roboter verschiedene Punkte anfahren oder manipulieren soll. Dafür muss aber vor allem auch die Sensorik des Roboters erweitert werden. In zugestellten Räumen kann es bei dem planaren Laserscanner vorkommen, dass bei der Raumerkennung keine oder falsche Wände gefunden werden. Hier kann beispielsweise ein 3D-Laserscanner Abhilfe schaffen. In Zukunft ist auch eine Erweiterung des Raummodells denkbar, welches auch nicht-rechteckige Räume zulässt.

Literaturverzeichnis

1. Yamauchi E, Schultz A, Adams W: Mobile Robot Exploration and Map-Building with continuous Localization. IEEE/ICRA, 1998
2. Fabrizi E, Saffiotti A: Augmenting Topology-Based Maps with Geometric Information. Robotics and Autonomous Systems: 91–97, 2002
3. Thrun S: Learning Metric-Topological Maps for Indoor Mobile Robot Navigation. Artificial Intelligence, Bd. 1: 21–71, 1998
4. Althaus P, Christensen H I: Automatic Map Acquisition for Navigation in Domestic Environments. IEEE/ICRA: 1551–1556, 2003
5. Wolter D, Latecki L J, Lakämper R, Sun X: Shape-Based Robot Mapping. 27th German Conference on Artificial Intelligence: 439–452, 2004
6. Latecki L J, Lakämper R, Sun X, Wolter D: Building Polygonal Maps from Laser Range Data. ECAI International Cognitive Robotics Workshop, 2004
7. Bosse M, Newman P, Leonard J, et al.: An Atlas Framework for Scalable Mapping. IEEE/ICRA: 1899–1906, 2003
8. Yamauchi B, Langley P: Place learning in dynamic real-world environments. RoboLearn 96:, 123–129, 1996
9. Jensfelt P, Austin D. J., et al.: Feature Based Condensation for Mobile Robot Localization. IEEE/ICRA: 2531–2537, 2000
10. Jensfelt P, Christensen H. J.: Laser Based Pose Tracking. IEEE/ICRA: (4), 2994–2998, 1999
11. Kleinlützum K: Selbständige Kartierung mit einem autonomen Indoor-Roboter. Diplomarbeit, Technische Universität Kaiserslautern, 2005