

Navigation mobiler Roboter mit Laserscans

Jens-Steffen Gutmann und Bernhard Nebel

Universität Freiburg, Institut für Informatik
Am Flughafen 17, D-79110 Freiburg
{gutmann,nebel}@informatik.uni-freiburg.de

Zusammenfassung Es wird ein Verfahren zur Erstellung einer topologischen Karte aus Laserscandaten für die Navigation mobiler Roboter beschrieben. Aus einem Satz sich korrekt überdeckender 360° -Scans wird ein *Sichtbarkeitsgraph* erstellt, wobei Knoten Scanpositionen und Kanten die relative Anzahl gemeinsamer Scanpunkte (genannt *Sichtbarkeit*) repräsentieren. Aus der *Sichtbarkeit* und der Distanz der Scanpositionen wird eine subjektive Wahrscheinlichkeit für die Befahrbarkeit zwischen den Scanpositionen berechnet. Durch Annahme von Unabhängigkeit der berechneten Wahrscheinlichkeiten wird mittels uniformer Kostensuche ein möglichst kurzer und sicher befahrbarer Pfad bestimmt. Das Verfahren wurde auf einem Pioneer-1-Roboter mit SICK-Laserscanner implementiert und erprobt. Für die Navigation zu jedem Zwischenziel entlang des Pfades wurde ein gitterbasierter lokaler Wegeplaner verwendet. Dadurch konnte ein hoher Grad an Robustheit erlangt werden. Das System ist in der Lage unvorhergesehenen Hindernissen auszuweichen, nicht passierbare Wege zu erkennen und alternative Wege zu finden.

1 Einführung

Viele Verfahren zur Navigation mobiler Roboter benutzen ein Belegtheitsgitter für die Wegeplanung und verwenden beispielsweise Breitensuche [KS94] oder dynamisches Programmieren [TBB⁺97], um kollisionsfreie Wege zu berechnen. Belegtheitsgitter haben u.a. den Vorteil, daß sie einfach zu erstellen und zu verwalten sind und kürzeste Wege über sie bestimmt werden können. In großen Einsatzumgebungen benötigen Belegtheitsgitter jedoch viel Speicherplatz und die Wegeplanung wird wegen des entstehenden großen Suchraumes ineffizient, sofern keine Parallelrechner zur Verfügung stehen. Weiterhin wird zur Korrektur von Positionsungenauigkeiten des Roboters meist noch eine weitere Karte benötigt, wie z.B. ein Satz von Referenzscans [EW95,GS96,Gut96].

Topologische Karten dagegen haben den Vorteil, daß sie planungseffizient sind und wenig Speicherplatz benötigen. Außerdem wurde in [TB96] festgestellt, daß die Wegeplanung auf topologischen Karten nicht unbedingt wesentlich längere Wege bestimmt als die gitterbasierte Wegeplanung. Die Problematik topologischer Karten ist jedoch ihre automatische Erstellung aus Sensorinformation.

Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren zur Erstellung einer topologischen Navigationskarte, die aus einem Satz sich korrekt überdeckender 360° -Scans er-

stellt wird. Die Laserscans werden gleichzeitig als Referenzscans für die Selbstlokalisierung des Roboters benutzt, so daß keine weitere Karte für die Positionsbestimmung benötigt wird. Für die Navigation zu den berechneten Zwischenzielen wird ein gitterbasierter lokaler Wegeplaner verwendet, welcher in der Lage ist, Hindernissen dynamisch auszuweichen und nicht befahrbare Wege zu erkennen. Hierdurch wird ein hoher Grad an Robustheit erlangt.

Diese Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Der nächste Abschnitt beschreibt den *Projektionsfilter*, der zur Bestimmung gemeinsamer Punkte zweier Scans benutzt und im Abschnitt 3 für die Erstellung der topologischen Karte eingesetzt wird. In Abschnitt 4 werden Experimente mit einem Pioneer 1 Roboter mit SICK Laserscanner präsentiert. Abschnitte 5 und 6 diskutieren den gewählten Ansatz und vergleichen ihn mit verwandten Arbeiten. Der letzte Abschnitt faßt die Arbeit zusammen und stellt weitere Arbeitspunkte vor.

2 Projektionsfilter

In [Lu95] wird der Begriff *Projection* eingeführt, welcher die Koordinatentransformation eines Scans auf die Aufnahmeposition eines anderen Scans beschreibt. Durch wechselseitiges Projizieren zweier Scans können wir so die gemeinsamen Punkte beider Scans bestimmen. Dieses Verfahren wird im folgenden *Projektionsfilter* genannt und anhand des Beispiels aus Abbildung 1a beschrieben.

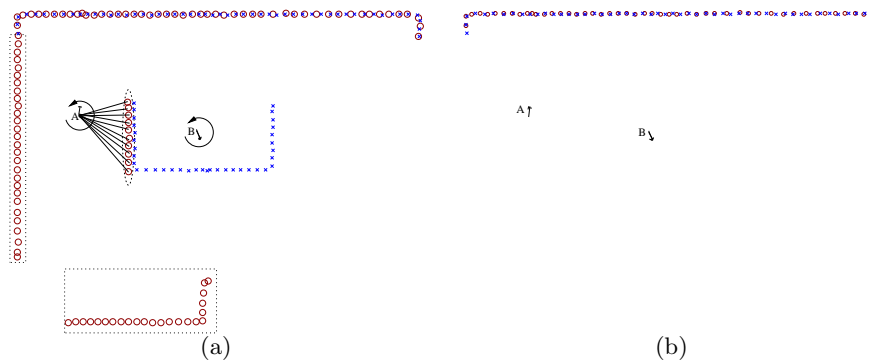


Abbildung 1. Scan A (kleine Kreise) und B (kleine Kreuze) vor (a) und nach Anwendung des Projektionsfilters (b).

Beide Scans werden auf die Aufnahmeposition des jeweiligen anderen Scans projiziert. Dabei werden in 2 Schritten alle Scanpunkte entfernt, die von der anderen Aufnahmeposition aus nicht sichtbar sind.

Im 1. Schritt wird die Tatsache ausgenutzt, daß Scanpunkte immer mit zunehmenden Aufnahmewinkel vorliegen. Daher können die Punkte von Scan A innerhalb der gepunktet gezeichneten Ellipse von Position B aus nicht sichtbar

sein, da diese von dort aus gesehen mit abnehmenden Winkel vorliegen. Diese Punkte werden deshalb als nicht sichtbar markiert.

Im 2. Schritt werden alle Punkte als nicht sichtbar markiert, die aus der Perspektive der jeweiligen anderen Aufnahme-position durch andere Scanpunkte beider Scans verdeckt sind. In Abbildung 1a sind daher die Punkte innerhalb der gepunktet gezeichneten Rechtecke von Position B aus nicht sichtbar.

Werden beide Scans auf die jeweils andere Aufnahme-position projiziert und alle als nicht sichtbar markierten Scanpunkte entfernt, so bleiben die Punkte von Abbildung 1b übrig. Dies sind alle Punkte, die von beiden Aufnahme-positionen aus gleichzeitig sichtbar sind.

3 Sichtbarkeitsgraph

Im folgenden wird angenommen, daß das Robotersystem in einem initialen Explorations-schritt die gesamte Einsatzumgebung befahren und einen Satz von 360° -Laserscans gesammelt hat. Die Aufnahme-positionen der Scans sollen möglichst gleichverteilt über die Umgebung sein. Abbildung 2a zeigt einen solchen Satz von 10 simulierten Scans.

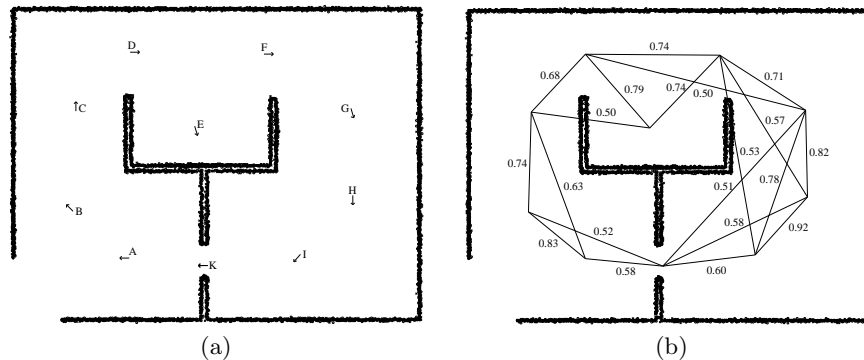


Abbildung 2. Simulierte Laserscans (a) und zugehöriger Sichtbarkeitsgraph (b).

Für alle Paare von Scans werden die gemeinsamen Scanpunkte durch Anwendung des Projektionsfilters bestimmt. Das Verhältnis der Anzahl gemeinsamer Punkte zur Gesamtanzahl Punkte zweier Scans wird *Sichtbarkeit* genannt.

Eine hohe Sichtbarkeit zweier Scans bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit, von einer Position zur anderen mittels einem lokalem Manöver fahren zu können, hoch ist. Dies begründet sich durch die folgende Überlegung. Falls zwei Scans einen gemeinsamen Punkt besitzen, so existiert für einen punktförmigen Roboter ein Weg von der einen Aufnahme-position zur anderen über den gemeinsamen Punkt. Für nicht-punktförmige Roboter wird jedoch ein entsprechend breiter Durchgang zwischen den Aufnahme-positionen benötigt, welcher umso wahrscheinlicher ist, je mehr gemeinsame Scanpunkte vorliegen.

Aus den berechneten Sichtbarkeiten wird ein ungerichteter Graph gebildet, dessen Knoten die Scanpositionen und die Kanten die zugehörigen Sichtbarkeiten sind. Um die Anzahl der Kanten möglichst klein zu halten, werden nur Sichtbarkeiten eingetragen, die größer als ein vorher definierter Mindestwert sind. Abbildung 2b zeigt den für die 10 simulierten Scans so entstandenen Graph mit einer Mindestsichtbarkeit von 50 Prozent.

Für jede Kante i mit Sichtbarkeit v_i wird die Wahrscheinlichkeit p_i , von der einen Scanposition zur anderen mit einem lokalen Manöver fahren zu können, durch $p_i = v_i^{kd_i}$ abgeschätzt, wobei d_i der euklidische Abstand der Scanpositionen und k eine Konstante zur Normalisierung ist.

Bei gegebener Start- und Zielposition sucht der Wegeplaner nun den Pfad mit maximaler Gesamtwahrscheinlichkeit. Nimmt man an, daß alle Einzelwahrscheinlichkeiten voneinander unabhängig sind, so wird der Pfad so gelegt, daß das Produkt

$$\prod_i p_i = \prod_i v_i^{kd_i}$$

über alle beteiligten Kanten maximal wird. Die Bestimmung eines solchen Pfades kann durch Verwendung von uniformer Kostensuche effizient implementiert werden und ist unabhängig von k .

Die verwendete Schätzung der Wahrscheinlichkeiten bewirkt, daß der Planer z.B. für den Weg von Position C zu Position E nicht den direkten Weg sondern den Umweg über Position D wählt. Gleichzeitig werden jedoch auch unnötig lange Pfade vermieden, z.B. legt der Planer bei der Aufgabe von Position A zu Position I zu fahren, den Weg nicht über die Positionen B, C, D, F, G, H, sondern wählt den wesentlich kürzeren Weg über Position K.

Stellt sich während der Planausführung heraus, daß der gewählte Weg nicht befahrbar ist, z.B. wenn der schmale Durchgang an Position K durch ein Hindernis blockiert ist, so wird die nicht befahrbare Kante entfernt und ein neuer Pfad ausgehend von der zuletzt besuchten Position erstellt.

3.1 Entfernung unnötiger Kanten

Durch eine einfache Überlegung kann die Anzahl der Kanten im Sichtbarkeitsgraph verkleinert werden. Für jedes Knotentripel, das räumlich nahe genug beieinander liegt, wird der zugehörige Teilgraph untersucht (siehe Beispiel in Abbildung 3a). Eine Kante wird entfernt, wenn die zugehörige Wahrscheinlichkeit kleiner als das Produkt der Wahrscheinlichkeiten der beiden anderen Kanten ist, da in diesem Fall der Wegeplaner immer den längeren Weg wählt. Die Kante mit geringer Wahrscheinlichkeit käme nur in Betracht, wenn eine der beiden anderen Kanten durch ein Hindernis blockiert ist und eine Neuplanung stattfinden muß. Da nur Knotentripel betrachtet werden, die genügend nahe zusammen liegen, würde der lokale Wegeplaner aber für diese Kante keine neuen Wege finden. Daher kann die Kante \overline{CE} in Abbildung 3a entfernt werden.

Werden alle mit dieser Methode bestimmten unnötigen Kanten entfernt, so entsteht der Graph aus Abbildung 3b, welcher *Wegegraph* genannt wird.

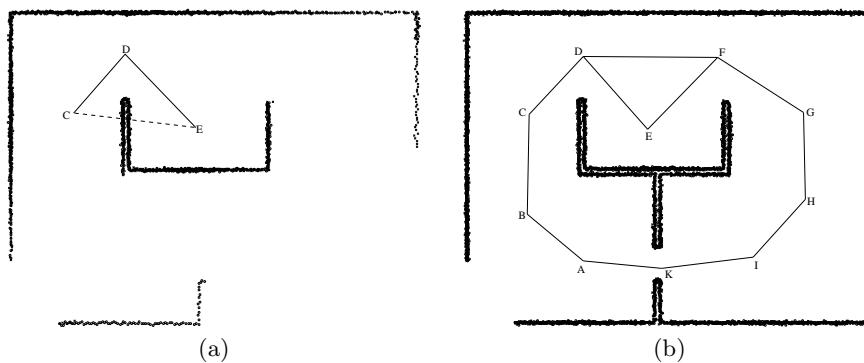


Abbildung 3. Entfernung unnötiger Kanten aus dem Sichtbarkeitsgraph. Betrachtung eines Knotentripels (a) und entstandener Weggraph (b).

4 Ergebnisse

Das Verfahren wurde auf einem Roboter des Typs Pioneer 1, auf den ein SICK PLS 200 Laserscanner montiert wurde, implementiert und getestet. Das Fahrzeug und ein CAD-Modell der 24 auf 13 Meter großen Einsatzumgebung sind in Abbildung 4 zu sehen.

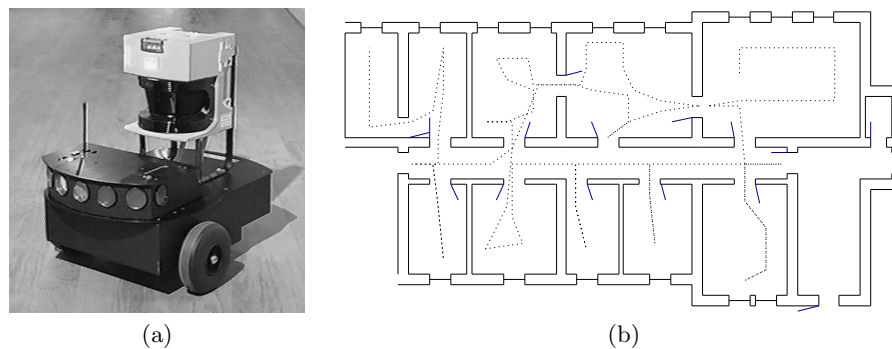


Abbildung 4. Pioneer Roboter mit SICK Laserscanner (a) und CAD Modell der Einsatzumgebung mit Explorationspfad (b).

Roboter und Laserscanner sind über je ein Modem mit einer Sparc Ultra 1 Station verbunden, die das Fahrzeug über die Saphira-Umgebung [KMRS97] steuert.

Das Fahrzeug verfügt über zwei einzeln angetriebene Vorderräder, die mit je einer Odometrie zur inkrementellen Positionsbestimmung bestückt sind. Das Fahrzeug ist in der Lage auf der Stelle zu drehen.

Der Laserscanner hat eine Entfernungsauflösung von 50mm und eine Winkelauflösung von 0.5° . Bei einem Blickfeld von 180° werden pro Scan 361 Meß-

werte innerhalb $40ms$ bestimmt. Durch die relativ langsame Funkübertragung von 38400 baud können jedoch nur ca. 3 Scans pro Sekunde übertragen werden.

Das Fahrzeug wurde in einer Explorationsfahrt ausgehend vom rechten oberen Raum durch die gesamte Einsatzumgebung bewegt (siehe Abbildung 4b). An mehreren Stellen entlang der Fahrt wurden Scans aufgenommen. Da das Blickfeld des Scanners nur 180° beträgt, wurde der Roboter an den Aufnahmestellen in mehreren Schritten um 360° gedreht, damit die aufgenommenen Scans später zu vollen 360° -Scans zusammengesetzt werden können. Abbildung 5 zeigt alle 912 in der Explorationsfahrt aufgenommenen 180° -Scans.



Abbildung 5. Während der Explorationsfahrt aufgenommene Scans.

Da für die Positionsbestimmung der Aufnahmepositionen nur Odometriedaten benutzt wurden, enthält die aufgenommene Karte grobe Positionsfehler. Durch eine Erweiterung des Verfahrens aus [Lu95,LM97] können die Aufnahmepositionen der Scans jedoch nachträglich korrigiert werden. Das Originalverfahren wurde hierfür um die Verarbeitung von Nicht- 360° -Scans, den Einsatz des kombinierten Scanüberdeckers aus [GS96,Gut96], und einen zusätzlichen Vorverarbeitungsschritt zur Bestimmung verbesserter Ausgangspositionen erweitert.

Nach Korrektur aller Aufnahmepositionen wurden Scans, deren Aufnahmepositionen dicht beieinander lagen, zu einem neuen Scan zusammengefaßt und Scans mit weniger als 360° -Sichtfeld entfernt. Der so entstandene Satz von 85 Scans und der daraus berechnete Wegegraph mit 123 Kanten sind in Abbildung 6 dargestellt.

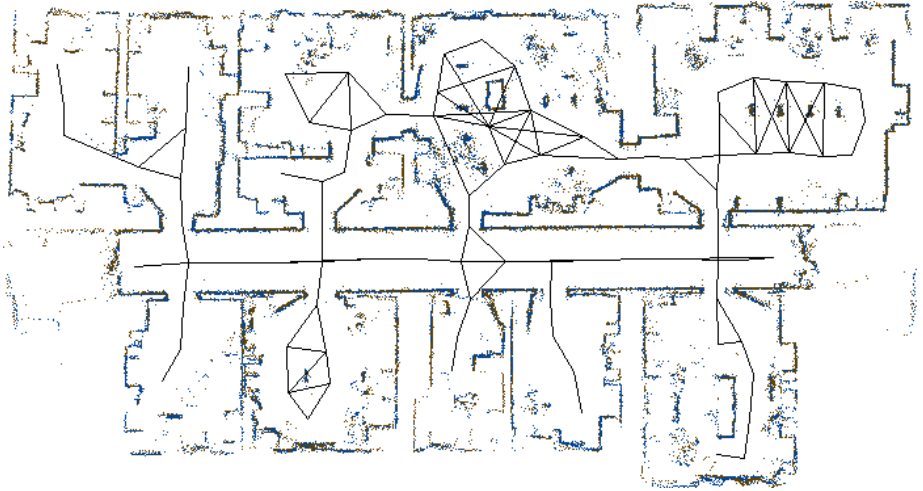


Abbildung 6. Korrigierte Karte von Scans mit Wegegraph

4.1 Realisierung

Dem Robotersystem wird die Karte von 360°-Scans, der Wegegraph und die initiale Fahrzeugposition als Vorabinformation übergeben. Das System führt einmal pro Sekunde eine Selbstlokalisierung durch Überdecken des aktuellen Scans mit dem am nächsten zur aktuellen Position liegenden 360°-Scan durch. Durch Verwendung von 360°-Scans als Referenzscans wird sichergestellt, daß die zu überdeckenden Scans immer einen genügend großen gemeinsamen Sichtbereich haben. Für die Überdeckung der Scans wurde der kombinierte Scanüberdecker aus [GS96,Gut96] verwendet, der sowohl in polygonalen als auch nicht-polygonalen Umgebungen einsetzbar ist.

Wird dem System eine Zielposition übergeben, so wird von der aktuellen Position aus ein Pfad im Wegegraph gesucht und die einzelnen Zwischenpositionen einem lokalen Wegeplaner übergeben. Der lokale Wegeplaner benutzt ein lokales Belegtheitsgitter hoher Auflösung, dessen Größe je nach Entfernung der anzufahrenden Position dynamisch gewählt wird. Für die Zellgröße wurde eine relativ kleine Kantenlänge von $50mm$ gewählt. Das Gitter wird durch Eintragen der letzten 5 aufgenommenen Scans vorbelegt. Für die lokale Wegeplanung kam der Algorithmus mit Breitensuche aus [KS94] zum Einsatz. Durch die geringe Größe des Gitters erfolgt die lokale Wegeplanung in Echtzeit. Treten Hindernisse während der Fahrt auf, so werden diese nach Eintragen in das Belegtheitsgitter erkannt und eine Neuplanung lenkt den Roboter um das Hindernis herum. Stellt der lokale Wegeplaner nach Absuchen des gesamten Gitters fest, daß innerhalb des lokalen Bereichs kein Weg vorhanden ist, so bricht er ab. Der globale Planer entfernt dann temporär die nicht befahrbare Kante und führt von der zuletzt besuchten Position aus eine Neuplanung durch.

4.2 Beispielfahrt

Das System wurde im rechten oberen Raum (Praktikumsraum) gestartet und die Aufgabe gegeben, an eine Position im links davon liegenden Büro zu fahren. Zuvor wurde die direkte Verbindungstür geschlossen, die Tür vom Gang zum Büro durch ein Hindernis blockiert und alle anderen Türen geöffnet (siehe Abbildung 7).

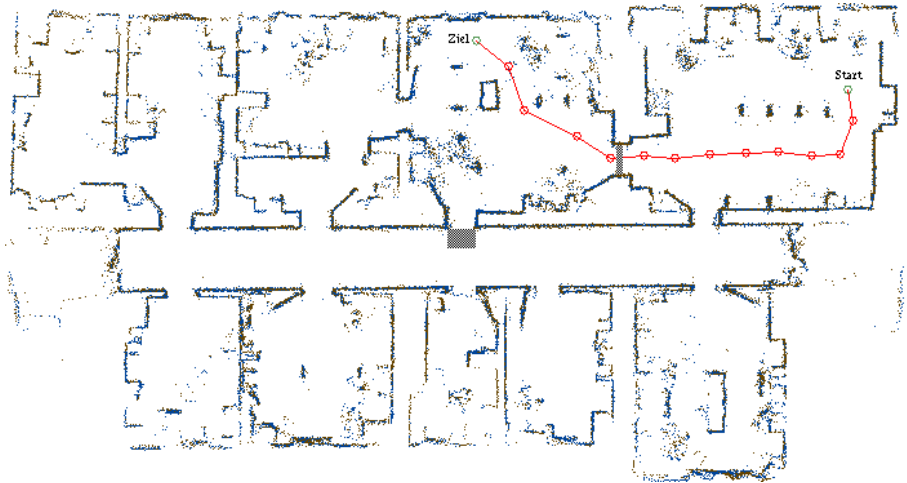


Abbildung7. Wegeplan vom Praktikumsraum ins Büro

Der Roboter wählte zunächst den direkten Weg durch die Tür zum Büro, stellte fest daß der Weg durch die Tür nicht befahrbar war, und plante einen neuen Weg über die Tür vom Gang zum Büro (Abbildung 8).

Vor der Tür auf dem Gang angekommen versuchte der Roboter die rechte, schräg verlaufende Kante durch das Hindernis abzufahren. Wieder brach der lokale Planer ab und der globale Planer bestimmte einen neuen Weg über die etwas weiter links liegende Kante. Nach Erreichen der Startposition dieser Kante stellte der lokale Planer durch die Vorbelegung des Gitters mit den letzten 5 Scans sofort fest, daß auch dieser Weg nicht befahrbar ist. Eine erneute globale Neuplanung schließlich lenkte den Roboter über das links vom Büro liegenden Sekretariat zur Zielposition (Abbildung 9). Dieser Pfad war durch keine weiteren Hindernisse belegt und der Roboter konnte das Ziel erreichen.

5 Diskussion

Das vorgestellte Robotersystem wurde in weiteren Beispielfahrten erfolgreich erprobt. Durch das Zusammenspiel des lokalen reaktiven Wegeplaners mit dem hier vorgestellten globalen Wegeplaner wird ein hoher Grad an Robustheit erlangt.

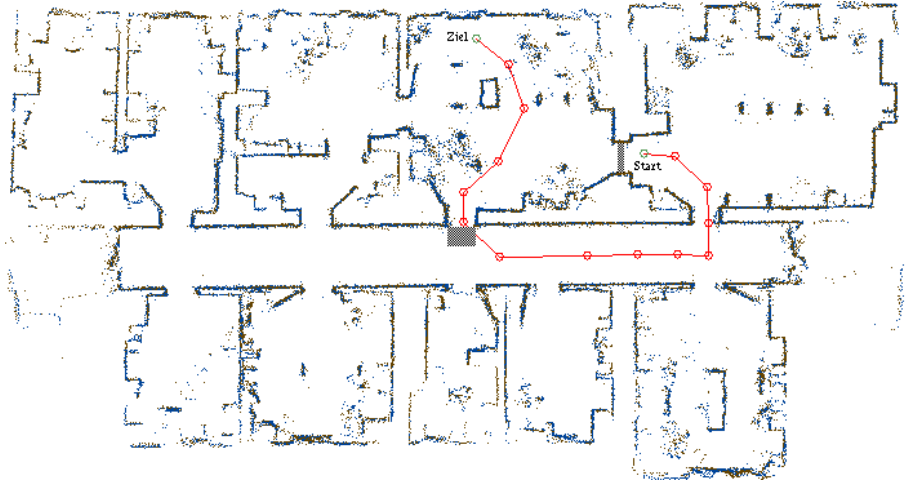


Abbildung8. Neuer Plan vom Praktikumsraum über den Gang ins Büro

Weiterhin wird durch Verwenden von Scanüberdeckung zur Selbstlokalisierung eine zuverlässige Methode der Positionsbestimmung realisiert, die kleine Änderungen in der Einsatzumgebung erlaubt.¹

Durch Verwendung eines globalen Planers auf dem Wegegraph werden in der Regel keine kürzesten Wege gefunden, da einerseits eine Diskretisierung auf eine kleine Menge von Positionen stattfindet und andererseits Wege so gewählt werden, daß die Gesamtwahrscheinlichkeit für die Befahrbarkeit des geplanten Weges maximal wird.

In [TB96] wurde festgestellt, daß der dort beschriebene topologische Planer im Mittel nur unwesentlich längere Wege berechnet als ein gitterbasierter Wegeplaner. Dies bestärkt uns in der Annahme, daß auch der hier vorgestellte globale Wegeplaner keine wesentlich längeren Wege erzeugt, was auch in den realen Experimenten Bestätigung fand.

Ein Problem des vorgestellten Verfahrens tritt auf, wenn eine zu besuchende Zwischenposition durch ein Hindernis blockiert ist, der lokale Planer also nicht direkt zu dem Zwischenziel fahren kann. Dieses Problem wird vermieden, indem um das eigentliche Zwischenziel ein relativ großer Kreis gelegt wird und es hinreichend ist, wenn der lokale Wegeplaner einen Weg zu einer Gitterzelle innerhalb des Kreises findet.

Ein vermeintlicher Nachteil des Planens auf dem Wegegraph scheint die Tatsache zu sein, daß nur die im Graph vorhandenen Positionen angefahren werden können. Zum einen kann aber für eine beliebige Zielposition der im Graph am

¹ Selbst wenn die Änderungen zu groß werden, muß die Positionsbestimmung nicht unbedingt fehlschlagen, da normalerweise in diesen Fällen der Scanüberdecker eine zu große Diskrepanz vorfindet und die Positionsbestimmung der Odometrie allein überlassen wird.

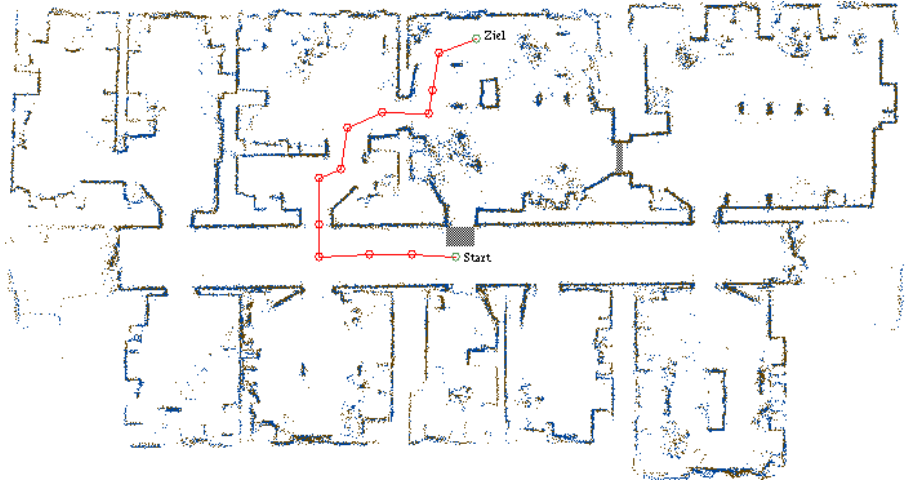


Abbildung9. Neuer Plan vom Gang über das Sekretariat ins Büro

nächsten liegende Knoten angefahren und von dort aus mit dem lokalen Wegeplaner das Ziel erreicht werden, zum anderen kann der Sichtbarkeitsgraph um einen Knoten an der Zielposition erweitert werden, indem alle Scans im näheren Umfeld auf diese Position projiziert werden und der Graph um die zugehörigen Sichtbarkeiten erweitert wird.

6 Verwandte Arbeiten

In [EW95] wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt. Das dort vorgestellte Robotersystem exploriert die Einsatzumgebung autonom durch Auswertung von 360°-Laserscans, die während der Fahrt aufgenommen werden. Zu jedem Scan werden genügend breite Passagen bestimmt, in welche weitere Zielpositionen für die Exploration gelegt werden. Zwischen den Scanpositionen wird ein Mindestabstand eingehalten, der eine gleichmäßige Verteilung der Aufnahmepositionen sichert. Liegt der Aufnahmeort eines Scans in einer genügend breiten Passage eines anderen Scans, so wird eine Verbindungskante zwischen den Scans angelegt. Auf diese Weise entsteht eine topologische Navigationskarte, auf der mittels A*-Algorithmus Wege geplant werden.

Das Verfahren exploriert die Umgebung inkrementell, daher werden auch die Positionen der Scans inkrementell bestimmt, was zu Problemen führt, wenn die zu explorierende Umgebung einen Zyklus enthält. Unser Verfahren dagegen korrigiert die Aufnahmepositionen aller Scans nach der Explorationsphase und kann daher mit Zyklen in der Umgebung umgehen (siehe z.B. in den Abbildungen 5 und 6 das Schließen des Zyklus zwischen dem rechten oberen und dem links davon liegenden Raum). Unsere Exploration ist jedoch bisher nicht autonom.

Die Erstellung der topologischen Karte in [EW95] basiert auf der direkten Auswertung der beteiligten Scans. Ist während der Aufnahme dieser Scans ein

störendes Hindernis vorhanden, so wird möglicherweise keine genügend breite Passage zu einem benachbarten Scan gefunden und in der topologischen Karte kann zwischen den Scans keine Kante eingefügt werden. Weiterhin kann keine Kante eingetragen werden, wenn sich direkt zwischen den Scans ein kleines stationäres Hindernis befindet. Unser Verfahren benutzt die Sichtbarkeit, um Kanten zwischen zwei Scans zu legen. Dies hat den Vorteil, daß selbst wenn Hindernisse direkt zwischen den Scans liegen, die Sichtbarkeit immer noch groß ist. Die eigentliche Wegeplanung zwischen den Scans geschieht erst zur Laufzeit durch Einsatz des lokalen Wegeplaners, welcher Hindernissen dynamisch ausweicht. Ein Nachteil unseres Verfahrens ist, daß eventuell Kanten im Wegegraph vorhanden sind, die nie befahrbar sind, z.B. Kanten zwischen zwei Positionen, die durch ein Gitter abgetrennt sind, durch das der Laserscanner stellenweise „hindurchsieht“.

Der in [EW95] verwendete Scanüberdecker, welcher auf Korrelation von Histogrammen beruht, kann nur in polygonalen Umgebungen eingesetzt werden. Der von uns verwendete kombinierte Scanüberdecker ist dagegen in der Lage, in nicht-polygonalen Umgebungen aufgenommene Scans zu überdecken und liefert zusätzlich ein Gütemaß für die Zuverlässigkeit der berechneten Überdeckung.

Ein weiterer Vorteil unseres Verfahrens ist die Möglichkeit des Neuplanens. Ist eine Kante nicht befahrbar, so wird dies vom lokalen Wegeplaner erkannt und eine globale Neuplanung im Wegegraph eingeleitet.

In [TB96,TBB⁺97] wird ein weiteres Verfahren zur Erstellung topologischer Karten beschrieben. Dort wird ein globales Belegtheitsgitter über die gesamte Umgebung gelegt und durch Auswerten des zugehörigen Voronoi-Diagrammes die topologische Karte erstellt. Auch hier muß die Umgebung bei der Kartenerstellung statisch sein. Kleine Hindernisse bei der Aufnahme würden sonst zu Veränderungen in der topologischen Karte führen. Der Ansatz hat aber den Vorteil, daß die gesamte Umgebung in Bereiche unterteilt wird und eine eher räumliche Beschreibung entsteht.

In [Röf95] wird in einer Simulation die Erstellung einer topologischen Karte mit eindimensionalen 360°-Farbbildern vorgestellt. Farbbilder sind jedoch stark von der Beleuchtung abhängig und kleine Änderungen in der Umgebung können starke Änderungen in der Korrelation zweier Bilder bewirken. Daher scheint dieser Ansatz nicht praktikabel zu sein.

Ein weiterer Ansatz wird in [Zim96] vorgestellt. Hier wird ein Roboter mit taktilen und lichtempfindlichen Sensoren eingesetzt und mittels einem erweiterten Kohonenmodell eine topologische Karte erstellt. Die entstehende Karte enthält jedoch relativ viele Knoten und scheint daher für größere Umgebungen ungeeignet zu sein.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein neues Verfahren zur Erstellung einer topologischen Karte aus Laserscans vorgestellt. Das Verfahren basiert auf der Auswertung der Sichtbarkeit zwischen Scans, um Wege mit maximaler Wahrscheinlichkeit für die Befahrbarkeit zu bestimmen. Zusammen mit einem lokalen gitterbasierten Wegeplaner wird

ein hoher Grad an Robustheit erlangt. Unvorhergesehenen Hindernissen wird dynamisch ausgewichen, nicht passierbare Wege werden erkannt und alternative Wege gefunden. Das Verfahren wurde auf einem realen Roboter implementiert und erfolgreich getestet.

Weitere Arbeiten werden sich mit der autonomen Exploration einer unbekanntem Umgebung beschäftigen. Insbesondere soll die Aufgabe bewältigt werden, autonom einen Satz von Scans aufzunehmen, deren Aufnahmepositionen möglichst gleichverteilt über den gesamten Einsatzbereich sind, wobei die Umgebung auch Zyklen enthalten darf.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Thilo Weigel für die Implementierung von Teilen des vorgestellten Systems bedanken.

Literatur

- [EW95] T. Edlinger und G. Weiss. *Exploration, Navigation and Self-Localization in an Autonomous Mobile Robot*. In: *Autonome Mobile Systeme*, Seiten 142–151. Springer Verlag, 1995.
- [GS96] J-S. Gutmann und C. Schlegel. *AMOS: Comparison of Scan Matching Approaches for Self-Localization in Indoor Environments*. In: *Proceedings of the 1st Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots*, Seiten 61–67. IEEE Computer Society Press, 1996.
- [Gut96] J-S. Gutmann. *Vergleich von Algorithmen zur Selbstlokalisierung eines mobilen Roboters*. Diplomarbeit, Universität Ulm, 1996.
- [KMRS97] K. Konolige, K. Myers, E. Ruspini und A. Saffiotti. *The Saphira Architecture: A Design for Autonomy*. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 9:215–235, 1997.
- [KS94] M. Knick und C. Schlegel. *AMOS: Active Perception of an Autonomous System*. In: *Proc. IEEE/RSJ Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Seiten 281–289, September 1994.
- [LM97] F. Lu und E.E. Milios. *Globally Consistent Range Scan Alignment for Environment Mapping*. *Autonomous Robots*, 4(4), 1997.
- [Lu95] Feng Lu. *Shape Registration using Optimization for Mobile Robot Navigation*. Doktorarbeit, University of Toronto, 1995.
- [Röf95] T. Röfer. *Navigation mit eindimensionalen 360°-Bildern*. In: *Autonome Mobile Systeme*, Seiten 193–202. Springer Verlag, 1995.
- [TB96] S. Thrun und A. Bücken. *Integrating Grid-Based and Topological Maps for Mobile Robot Navigation*. In: *Proceedings 13th National Conference on Artificial Intelligence AAAI*, August 1996.
- [TBB⁺97] S. Thrun, A. Bücken, W. Burgard, D. Fox, T. Frölinghaus, D. Henning, T. Hoffmann, M. Krell und T. Schmidt. *Map Learning and High-Speed Navigation in RHINO*. In: *AI-based Mobile Robots: Case studies of successful robot systems*. MIT Press (to appear), 1997.
- [Zim96] U.R. Zimmer. *Robust World-Modelling and Navigation in a Real World*. *NeuroComputing*, 12, 1996.