

INSTITUT FÜR INFORMATIK
AG WISSENSBASIERTE SYSTEME

Lokalisierung und Kartenbau mit mobilen Robotern

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (*Dr. rer. nat.*)
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Universität Osnabrück, Deutschland

vorgelegt von

Kai Lingemann

aus Münster

April 2014

Zusammenfassung

Die dreidimensionale Kartierung der Umgebung spielt speziell in der Robotik eine große Rolle und ist Grundlage für nahezu alle Aufgaben, die eine nicht rein reaktive Interaktion mit dieser Umgebung darstellen. Die vorliegende Arbeit beschreibt den Weg zu solchen Karten.

Angefangen bei der reinen (2D-)Lokalisierung eines mobilen Roboters, als erster, fundamentaler Schritt in Richtung autonomer Exploration und Kartierung, beschreibt der Text die Registrierung von Scans zur automatischen, effizienten Generierung von 3D-Karten und gleichzeitiger Lokalisierung in sechs Freiheitsgraden (SLAM-Problem). Es folgen Lösungsstrategien für den Umgang mit akkumulierten Fehlern gerade bei großen explorierten Gebieten: Eine GraphSLAM-Variante liefert global konsistente Karten, optional unterstützt durch eine echtzeitfähige Heuristik zur online-Schleifenoptimierung. Den Abschluss bildet ein alternativer Lokalisierungsansatz zur 3D-Kartierung mittels kooperativ agierenden Robotern.

Abstract

Three dimensional mapping plays a major role particularly in the field of robotics, and is the foundation of most tasks that require more than a purely reactive interaction with the environment. The text at hand describes a way to acquire such maps.

Starting with a first and fundamental step towards autonomous exploration and mapping, i.e., 2D localization of a mobile robot, the text describes the automatic, efficient registration of 3D scans for simultaneous mapping and localization in 6 degrees of freedom, thereby solving the SLAM problem. A solution for dealing with accumulated errors that occur especially in case of exploring large areas follows: A GraphSLAM variant yields globally consistent maps, optionally supported by a real-time capable heuristic for online loop optimization. An alternative strategy for 3D mapping by means of cooperatively operating robots concludes.

Inhaltsverzeichnis

1	Gliederung	7
2	Überblick über das Themengebiet	7
2.1	Aktuelle Entwicklungen	10
2.2	Offene Fragestellungen	11
3	Eigene Beiträge	13
3.1	2D-Lokalisierung	13
3.1.1	Einleitung	13
3.1.2	Zusammenfassung der Publikation	13
3.1.3	Eigener Beitrag an der Publikation	14
3.2	3D-Kartierung	15
3.2.1	Einleitung	15
3.2.2	Zusammenfassung der Publikation	15
3.2.3	Eigener Beitrag an der Publikation	16
3.3	Global konsistente Karten	17
3.3.1	Einleitung	17
3.3.2	Zusammenfassung der Publikation	17
3.3.3	Eigener Beitrag an der Publikation	18
3.4	Heuristisches Schleifenschließen	19
3.4.1	Einleitung	19
3.4.2	Zusammenfassung der Publikation	19
3.4.3	Eigener Beitrag an der Publikation	20
3.5	Alternative Selbstlokalisierung & Kartenbau	20
3.5.1	Einleitung	20
3.5.2	Zusammenfassung der Publikation	21
3.5.3	Eigener Beitrag an der Publikation	22
	Verzeichnis der Textbestandteile	23
	Literaturverzeichnis	25

1 Gliederung

Die vorliegende kumulative Dissertation betrachtet das Problem der Roboterlokalisierung und Kartierung mittels Laserscans in einer Entwicklung von aufeinander aufbauenden Arbeiten, und spiegelt damit auch den Verlauf meiner eigenen Forschungstätigkeit wider. Nach einem Überblick über das Themengebiet stelle ich ausgewählte eigene Publikationen daraus vor.

Den Anfang bildet eine reine zweidimensionale Lokalisierung eines Roboters unter besonderen Nebenbedingungen, denen Standard-Verfahren nicht gewachsen waren. Es folgt der Schritt in die dritte Dimension, die gleichzeitige Lokalisierung und Kartierung in 3D-Umgebungen. Um die Lösung eines bis dahin inhärent auftretenden Problems insbesondere bei der Kartierung größerer Regionen – global inkonsistente Karten – kümmert sich der nächste Abschnitt. Da die dort vorgestellte Lösung zwar beweisbar optimal, jedoch auch sehr rechenintensiv ist, folgt die Einführung eines heuristischen Schleifenschließens, welches für den online-Einsatz während der Exploration entwickelt wurde, aber auch die globale Optimierung in Fällen unterstützt, bei denen sie aufgrund von massiv fehlerhafter Initialschätzung inkorrekte Karten liefert. Abschließend stelle ich eine alternative Art von Selbstlokalisierung und Kartierung vor, basierend auf kooperativ agierenden Robotern, die auch in äußerst schwierigen oder sonst fast unmöglich zu kartierenden Umgebungen, beispielsweise sehr unstrukturierte oder hoch dynamische Szenarien, die sichere Erstellung von Karten ermöglicht.

Jeder Abschnitt liefert zunächst einen kurzen Einblick in das Themengebiet, stellt dann den Beitrag der Publikation dar, sowie meinen eigenen Anteil an der Veröffentlichung. Referenzen auf die vollständigen Textbeiträge sind auf Seite 23 zu finden. Die Angaben zur Anzahl von Zitaten einer Publikation stammen aus Google Scholar (Stand: 4. April 2014).

2 Überblick über das Themengebiet

„Wo bin ich? Und wie sieht meine Umgebung aus?“ Diese beiden grundlegenden Schlüsselfragen, die es in der Robotik zu lösen gilt, sind eng miteinander verzahnt. Wenn ein Roboter eine interne Repräsentation seiner Umgebung besitzt, ist es relativ leicht, sich in ihr zu lokalisieren. Wenn anders herum eine exakte Lokalisierung gegeben ist, reduziert sich der Aufbau einer (rudimentären) Umgebungskarte auf die simple Akkumulation der transformierten Messdaten¹. In der Praxis ist jedoch generell beides nicht gegeben.

¹ Natürlich kann auch dieser Schritt beliebig kompliziert werden. Je nach Repräsentationsform und Anforderungen an die Karte kann es notwendig sein, Dynamik in der Szene zu erkennen und explizit zu behandeln, ebenso Unsicherheiten in den Messdaten sowie der Lokalisierung, u.dgl. Mehr dazu am Ende dieses Überblicks.

Das Problem der Lokalisierung stellt bereits unabhängig vom Kartenbau eine Herausforderung dar, deren Lösung für wohl jegliche nicht-reaktive, planbasierte mobile Handlung eines Roboters notwendig ist. Lösungsansätze lassen sich in zwei große Kategorien einordnen: Zum einen die *monomodalen* Herangehensweisen, die zu jedem Zeitpunkt genau eine Schätzung der Roboterpose aufrecht erhalten. Darunter fallen zunächst einmal Scanmatching-Verfahren, welche Sensormessungen, die während der Fahrt aufgenommen werden, registrieren. Übliche Formen der paarweisen Scan-Registrierung sind punkt-basierte Ansätze wie ICP (*Iterative Closest Point*), IDC (*Iterative Dual Correspondence*) und deren Varianten [Lu u. Milios, 1997b], die wahrscheinlichkeitsbasierte NDT (*Normal Distribution Transform*) [Biber u. Straßer, 2003], ferner Zuordnungen von Punkten des aktuellen Scans gegen extrahierte Merkmale des Referenzscan, beispielsweise Linien wie in [Cox, 1991]. Heutzutage eher historischen Wert haben Histogramm-basierte Registrierungen, wie in [Weiß et al., 1994] beschrieben.

Andere Ansätze bedienen sich künstlicher oder natürlicher Landmarken, die über Triangulation eine Lokalisierung gewährleisten können. Beispiele dafür sind [Cauchois et al., 2003] respektive [Santiso et al., 2003]. Neben reiner Triangulation ermöglichen extrahierte und einander zugeordnete Landmarken mittels Einsatzes eines erweiterten Kalmanfilters eine wahrscheinlichkeitsbasierte Verortung, die beschränkte Aussagen über die Sicherheit in der Lokalisierung zulässt, vgl. [Thrun et al., 2005].

Dieser ersten Kategorie steht die Klasse der *multimodalen* Lokalisierungsverfahren gegenüber, die zu jedem Zeitpunkt mehrere Poseschätzungen – sei es in Form von diskretisierten Aufenthalts-Wahrscheinlichkeitsverteilungen, oder durch eine beschränkte Anzahl Partikel – aufrecht halten (siehe [Thrun et al., 2005]). Aus der Posebestimmung in a-priori gegebenen Karten vermittelt Markow- oder Monte-Carlo-Lokalisierung haben sich Ansätze entwickelt, die auch ohne Karte eine Partikel-basierte Lokalisierung realisieren, darunter der wohl bekannteste Vertreter FastSLAM [Hähnel et al., 2003].

All die bisher erwähnten Algorithmen benutzen 2D-Scans als Eingaben und liefern als Ausgabe die Roboter-Trajektorie, und darüber auch, zusammen mit den Eingabescans, eine 2D-Karte der Umgebung. Nachdem die reine Lokalisierung für beschränkte Domänen wie planare Gebäudeinnere damit recht stabil und zuverlässig realisierbar war, lag der Schritt zu 3D-Karten nahe. Die ersten Ansätze stützen sich dabei auf die bereits bekannte 2D-Lokalisierung über horizontal angebrachte Laserscanner, die 3D-Informationen wurden durch weitere, beispielsweise seitlich angebrachte, gedrehte 2D-Laserscanner akquiriert, welche nicht zur Lokalisierung benutzt wurden, sondern der reinen Datenaufnahme dienten. Beispiele dafür sind in [Früh u. Zakhor, 2001; Thrun et al., 2000; Zhao u. Shibasaki, 2001] zu finden. Eine erweiterte Form der gleichen Idee wird in [Thrun et al., 2006] benutzt, um aus statisch angebrachten 2D-Laserscans mit Hilfe einer externen 3D-Poseschätzung eine dreidimensionale Teilkarte der Umgebung auch auf unebenem Gelände zu erhalten. Einen ersten Ansatz, ganze Straßenzüge in 3D zu modellieren, verfolgte das AVENUE-Projekt. Hier wurden bereits 3D-Laserscans zur

Umgebungsmodellierung benutzt, das System benötigte jedoch bereits eine rudimentäre, a-priori gegebene Karte der Umgebung als Eingabe, um eine sichere Lokalisierung zu gewährleisten [Allen et al., 2001].

Mit dem Bau von mobilen 3D-Laserscannern kamen Algorithmen auf, die eine Lokalisierung des Roboters in allgemeinem Gelände in allen sechs Freiheitsgraden ermöglichen. Am verbreitetsten sind hierbei Erweiterungen der oben erwähnten Verfahren ICP und IDC, sowie die Alternative der 3D-NDT und Varianten [Magnusson et al., 2007; Stoyanov et al., 2012], bei denen keine einzelnen Punkte betrachtet und zugeordnet werden, sondern Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die lokal widerspiegeln, mit welcher Wahrscheinlichkeit an bestimmten Positionen Messpunkte vorhanden sein können.

Die neuen Möglichkeiten der 3D-Scans, die sehr viel reichhaltiger an Informationen als die bisherigen 2D-Scans waren, führten zur Exploration und Kartierung auch größerer Areale, und damit auch dazu, dass ein schon vorher vorhandenes Problem noch stärker in den Vordergrund trat: Kleine Fehler in der Registrierung von Scans machen sich tendenziell um so stärker bemerkbar, je länger die zurückgelegte Strecke ist. Ganz besonders Schleifen in der Trajektorie, also erneute Besuche eines bereits explorierten Gebietes, zeigen Diskrepanzen und Lokalisierungsfehler deutlich auf – sind aber auch eine Möglichkeit, derer Herr zu werden.

Ein erster, noch halbautonomer Ansatz, aus lokal (in der Regel paarweise) registrierten Scans eine global konsistente Karte zu generieren, wird in [Pulli, 1999] beschrieben. Zeitnah entstanden Verfahren wie [Benjemaa u. Schmitt, 1998] und [Eggert et al., 1996], die für bestimmte Einsatzgebiete sehr erfolgreich, aber nicht universell einsetzbar waren: Die Algorithmen waren für feste Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen optimiert, oder aber für die Fusionierung mehrerer Ansichten von Bauteilen entwickelt und setzten voraus, dass die Scans global grob konsistent liegen und nur noch feinjustiert werden müssen.

Nach diesen teils heuristischen Methoden entwickelten sich wiederum zwei Kategorien: Zum einen Algorithmen, die eine explizite und meist feste Zuordnung von Merkmalen benötigen, namentlich wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren auf Grundlage des erweiterten Kalmanfilters (EKF). Lösungsansätze für das hierbei auftretende Zuordnungsproblem sind in [Folkesson u. Christensen, 2007; Newman u. Ho, 2005] beschrieben. Dem gegenüber stehen GraphSLAM-Ansätze, denen eine Netzstruktur von Beziehungen zwischen Scans zu Grunde liegt, welche meist iterativ optimiert wird. Generell bestehen diese aus einem SLAM-*Backend*, dessen Aufgabe die Optimierung ist, und welches wiederum eines *Frontends* bedarf, das die eigentliche Zuordnung der Scans übernimmt. Letzteres besteht üblicherweise aus o.g. Ansätzen zur paarweisen Registrierung. Bekannte Varianten solcher Backends stellen die Arbeiten [Frese, 2007; Grisetti et al., 2009; Olson, 2008] dar. Allerdings sind diese beiden Kategorien nicht strikt getrennt, und es existieren auch GraphSLAM-Ansätze mit extrahierten Merkmalen, wie [Triebel u. Burgard, 2005].

2.1 Aktuelle Entwicklungen

Neuere Entwicklungen im Bereich der SLAM-Frontends konzentrieren sich primär auf unterschiedliche Darstellungsformen von 3D-Scans, die ihrerseits unterschiedliche Arten der Zuordnungen – und damit der affinen Registrierung – ermöglichen. Eine sehr intuitive Möglichkeit liegt in der Betrachtung von höherwertigen geometrischen Merkmalen, die helfen, die Sicherheit in der paarweisen Zuordnung zu verbessern. Im Dreidimensionalen sind hier zuvorderst Flächen/planare Polygone zu nennen, wie bereits in der Arbeit [Weingarten u. Siegwart, 2006] beschrieben, in der die Berechnung der optimalen Transformation mittels ICP stattfindet. Eine Erweiterung der Idee stellt das *Minimum Uncertainty Maximum Consensus* (MUMC) dar, bei dem direkt Flächen unter Berücksichtigung der Unsicherheit in ihrer Extraktion aus den Eingabedaten als zugehörig klassifiziert und registriert werden [Pathak et al., 2010].

Daneben existieren eine Reihe von Algorithmen, die ganz ohne explizite Merkmale auf neuen, nicht mehr punktbasierten Scan-Repräsentationen arbeiten, wie im Folgenden beschrieben. Einen Mittelweg stellen die *Fast Point Feature Histograms* (FPFH) dar, bei denen für jeden Punkt eine Hauptkomponentenanalyse seiner k nächsten Nachbarn innerhalb eines festen Radius durchgeführt wird. Die Informationen werden zu Histogrammen aggregiert, welche eine stabile Zuordnung ermöglichen [Rusu et al., 2009].

Noch weiter abstrahiert von den punktförmigen Eingabedaten ist eine Familie von Verfahren, die Scans gezielt in eine Spektral-basierte oder verwandte Darstellungsform transformiert, die nicht nur das Zuordnungsproblem durch eine stark reduzierte Anzahl von Merkmalen vereinfacht, sondern auch eine inhärente Entkopplung von Rotation und Translation liefert, die die Berechnung einer optimalen Transformation in geschlossener, nicht-iterativer Form ermöglicht. Beispiele solcher invarianten Darstellungsformen sind EGIs (*Extended Gaussian Images*), die Fourier-, Hough- sowie die Radon-Transformation, wie beschrieben in [Censi u. Carpin, 2009] (HSM3D). Makadia et al. liefern in [Makadia et al., 2006] einen Algorithmus, der mit Hilfe von EGIs die Scanregistrierung auch ohne initiale Poseschätzung erlaubt. Ähnlich wie schon in [Lucchese et al., 2002] wird hier allerdings ein nachgeschalteter ICP für die Feinregistrierung verwendet, insbesondere um Ungenauigkeiten durch Diskretisierung auszugleichen. Ganz ohne diesen finalen Schritt arbeitet die *Spectral Registration (with Multilayer Resampling)*, SRMR, die ebenfalls auf Korrelationen im Fourier-Frequenzspektrum basiert [Bülow, 2010; Bülow u. Birk, 2013]. Eine Übersicht und Kategorisierung unterschiedlicher Ansätze liefert die Arbeit [Frese et al., 2010].

Ebenso wie die Verfügbarkeit neuer Hardware den Schritt von 2D- zu 3D-Karten unterstützt hat, geht die Entwicklung auch heutzutage nicht nur Software-, sondern auch Hardware-getrieben weiter. Bestanden bislang die Karten in den meisten Fällen aus reinen 3D-Punktdateien, sind in der letzten Zeit zwei Tendenzen zu erkennen, die an sich keineswegs neu sind, durch die weite Verbreitung von 3D-Kameras jedoch stark an

Bedeutung gewinnen: Obwohl auch viele Laserscanner in der Lage sind, die gemessenen Punkte mit Remissionswerten zu versehen, die in Abhängigkeit des Materials ein Grauwertbild der Szene liefern, sind Verfahren, die diese Remissionswerte ausnutzen, selten. Neue Sensoren, die 3D-Punktwolken inklusive Farbinformationen liefern, haben zur Entwicklung und Verbreitung von Ansätzen wie RGB-D SLAM, [Endres et al., 2012], beigetragen.

Damit einher gingen neue Beiträge, die sich dem alten Problem der Evaluierung von SLAM-Verfahren widmeten: Für eine quantitative Aussage über die Güte einer Karte wird entweder eine *Ground-Truth*-Karte des gleichen Gebietes benötigt – und selbst dann ist der Vergleich nicht trivial durchzuführen, ja nicht einmal eindeutig zu definieren: Ist beispielsweise eine Karte als Ergebnis einer sehr exakten Lokalisierung mit nur einem einzelnen Winkelfehler zwischen zwei Scans (und damit großen euklidischen Fehlern aller nachfolgenden Punkte) besser oder schlechter als die Karte aus einer generell schlechteren, aber geometrisch im Mittel besseren Lokalisierung? Eine in der Praxis einfacher durchzuführende Weg führt über den Vergleich von Trajektorien aus Positionen bzw. Posen während der Datenaufnahme; aber auch dies löst nicht eindeutig die Frage nach einer Metrik auf SLAM-Resultaten, und auch hier ist Wissen über die *tatsächlich* gefahrene Strecke notwendig. Arbeiten, die praktische Lösungsvorschläge speziell für RGB-D SLAM (jedoch prinzipiell nicht darauf beschränkt) liefern, basierend auf externer optischer Bewegungserfassung, sind in [Endres et al., 2012; Sturm et al., 2012] zu finden. Einen Vergleich zwischen unterschiedlichen, aktuellen Repräsentationsformen von 3D-Karten liefert [Stoyanov et al., 2013].

Eine weitere Tendenz liegt in dem aufkommenden Interesse für höhere Darstellungsformen wie Polygonkarten. Hier sind es nicht mehr nur die reinen Punkte, die das finale Ergebnis darstellen, sondern weiter prozessierte Repräsentationen: Planar liegende Punkte werden aggregiert und durch flächige Polygonzüge ersetzt. Dies ermöglicht eine effizientere Handhabung der Karte und liefert den Grundstein für weiterführende Interpretationen der Szene [Wiemann, 2013; Wiemann et al., 2012].

2.2 Offene Fragestellungen

Trotz all der Entwicklungen der letzten Jahre bleiben weiterhin offene, bislang ungelöste Fragestellungen bestehen. Immer wieder treten Situationen auf, die nach einer Metrik auf Scan-Registrierungen rufen: Keiner der hier vorgestellten Algorithmen kann *garantieren*, dass das Ergebnis korrekt ist. Die verschiedenen Ansätze sind zwar unterschiedlich anfällig für lokale Minima, davor gefeit ist aber keiner. In eingeschränkten Domänen, z.B. mit Hintergrundwissen über die Struktur der Scans, beispielsweise der Abdeckung eines beschränkten Gebietes, der Art der paarweisen Überdeckung, o.ä., sind begrenzte Aussagen möglich; im Allgemeinen existiert jedoch noch keine Antwort auf die Frage, ob die ideale Ausrichtung gefunden worden ist, ja nicht einmal eine zuverlässige Ordnung auf

verschiedene Zuordnungen. Die erwähnten GraphSLAM-Verfahren bauen zwar auf einer groben Schätzung der Registrier-Kovarianzen auf, diese sind aber weit davon entfernt, zuverlässig zu sein.

Mit rapide steigender Größe der kartierten Areale treten Probleme in den Vordergrund, die zunehmend die verwandten Gebiete der Geodäsie und Vermessungskunde berühren: War das AVENUE-Projekt ein Vorläufer der Kartierung ganzer Straßenzüge, haben präziser gewordene Überflugdaten sowie auf Autos montierte Sensoren zu einer Reihe von Publikationen zu dieser Thematik geführt, beispielsweise [Bansal et al., 2011; Elseberg et al., 2012]. Damit gehen vornehmlich zwei Herausforderungen einher: Erstens der effiziente Umgang mit solch großen Datenmengen – insbesondere auf der Seite der Datenverarbeitung und Speicherung (hier wird auch zunehmend das Gebiet der Computergrafik relevant, ebenso wie die bereits erwähnten Polygonkarten), aber auch in der reinen Akquise statistisch relevanter Mengen von Datensätzen und deren Evaluation. Zweitens ein Problem, das als Langzeit- oder sogar „lebenslanges Mapping“ (*lifelong mapping*) bekannt geworden ist: Neben neuen Anforderungen an besonders robuste, möglichst wartungsfreie Hardware ist hier der Kernpunkt die Integration von Veränderungen der Umgebung. Dabei geht es nun nicht mehr nur um vergleichsweise schnelle Dynamik in der Szene, sondern ebenso auch um längerfristige, beispielsweise wetter- oder saisonbedingt Änderungen, bis hin zu zeitabhängigen Karten. Erste Ansätze und weiterführende Arbeiten sind in [Biber u. Duckett, 2005; Borrmann et al., 2010; Saariinen et al., 2013] beschrieben, das Feld liefert jedoch noch genügend offene Fragen für die Forschung.

Ein weiterer offener Punkt betrifft nicht-rigide Transformationen – eine Notwendigkeit, die immer dann zu Tage tritt, wenn bereits die einkommenden 3D-Scans nicht in sich konsistent sind, beispielsweise aufgrund von Bewegung des Sensors von außen. Erste Schritte zur Lösung sind in [Borrmann u. Elseberg, 2009] zu finden. Ein aktueller Ansatz zu semi-rigiden Transformationen wird in [Elseberg et al., 2013] beschrieben, eine Arbeit auf dem Gebiet des *mobile scannings*, die damit auch wiederum für die Aufgabenstellung des letzten Absatzes relevant ist: Die Aufnahme von Messdaten *während* der Bewegung setzt eine extrem genaue Schätzung der Poseänderungen während der Datenakquise voraus, um die Scans für oben beschriebene Algorithmen zugänglich zu machen. Ist dies nicht oder nicht hinreichend gegeben, müssen nicht nur die einzelnen Scans gegeneinander, sondern auch jeder Scan in sich nicht-affin transformiert werden können, durch die Modifikation von einzelnen 2D-Schnitten oder gar Messpunkten.

Ein letzter Punkt für die offene Liste bislang ungelöster Probleme stellt die Registrierung von artikulierten Objekten, beispielsweise in Form eines realen Scans gegen ein CAD-Modell mit fest definierten Gelenken. Auch hier gilt, dass rudimentäre Ansätze, beispielsweise über die Generierung einer Reihe von Modell-Scans in unterschiedliche Gelenkstellungen, denkbar sind, befriedigende Lösungen aber noch ausstehen und Gegenstand der aktuellen Forschung sind.

3 Eigene Beiträge

3.1 2D-Lokalisierung

3.1.1 Einleitung

Die Grundlage für nahezu jegliche Arbeit autonomer mobiler Agenten liegt in der Fähigkeit, sich selber zu lokalisieren. Dabei unterscheidet man zwischen der Lokalisierung relativ zu einer Startpose, auch *Tracking* genannt, und der globalen innerhalb einer a-priori gegebenen Karte. Nur der erste Ansatz erlaubt den Einsatz des Roboters auch in unbekanntem Gebiet. Standard-Verfahren zum Tracking existierten schon vor der nachfolgend beschriebenen Arbeit, waren aber nicht in der Lage, unter den nachfolgend beschriebenen, speziellen Nebenbedingungen, die dieser Arbeit als Motivation dienten, zuverlässig zu arbeiten.

3.1.2 Zusammenfassung der Publikation

In [Lingemann et al., 2005] habe ich einen sehr effizienten Scanmatching-Algorithmus² zum Registrieren zweier 2D-Laserscans entwickelt und seinen Einsatz zum Tracking demonstriert. Das Hauptaugenmerk lag, neben der Robustheit, auf einer möglichst hohen Geschwindigkeit der Registrierung, die entsprechend eine hohe Fahrgeschwindigkeit des Roboters erlaubt. Das Verfahren basiert auf effizient extrahierten Merkmalen, die in der Umgebung, in der der Roboter agieren soll, natürlich vorkommen, sowie deren paarweiser Zuordnung (Abbildung 1) und Lösung des Minimierungsproblems in geschlossener, iterationsloser Form. Inhärente Probleme der Familie von merkmalsbasierten Matchingverfahren – zum einen wenig Überlappung zwischen zu registrierenden Scans, zum anderen fehlende Merkmale in der Umgebung – werden durch die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit gelöst, respektive durch virtuelle Merkmale, die der Algorithmus automatisch aus den realen Scans heraus generiert, sofern notwendig.

Der bislang 106-mal zitierte Beitrag liefert einen ausführlichen Vergleich mit Algorithmen, die zu der Zeit den aktuellen Stand der Technik dargestellt haben: Neben der Güte der Registrierung, die in den allermeisten Fällen gleich gut oder besser ausfiel, führt der massive, algorithmisch gewonnene Geschwindigkeitsgewinn

1. zu Rechenleistung, die nun frei ist für höhere (z.B. Planungs-)Aufgaben, sowie
2. insbesondere zu der Möglichkeit, einkommende Scans in Echtzeit (typischerweise

² Der Algorithmus ist mittlerweile erfolgreich patentiert beim Deutschen Patentamt, Offenlegungsschrift DE 10 2004 015 111 A1 2005.10.2

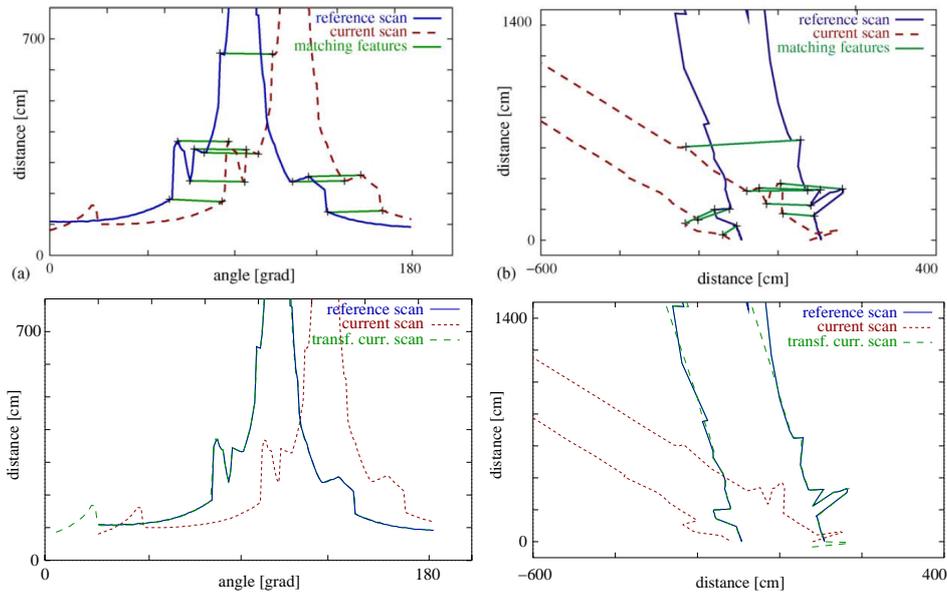


Abbildung 1: Berechnung der Merkmalspunkte in Polardarstellung der Scans, deren paarweise Zuordnung und Transformation. Grafik aus [Lingemann et al., 2005].

75 Hz) zu verarbeiten. Dies erlaubt die Lokalisierung auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten (und damit einem großen Versatz zwischen zwei aufeinander folgenden Scans). Die Evaluation gegen o.g. Alternativansätze hat gezeigt, dass diese im Gegensatz zu dem von mir entwickelten Verfahren *nicht* in der Lage waren, eine Lokalisierung des Roboters unter diesen Umständen (Fahrt mit bis zu 4 m/s) aufrecht zu halten.

Als Anwendungsszenario dient die Ausgabe des Algorithmus als initiale Poseschätzung für das im nachfolgenden Beitrag beschriebene 3D-Kartierungsverfahren, wie in dem Papier erfolgreich an Versuchen sowohl innerhalb als auch außerhalb von Gebäuden in freiem Gelände gezeigt. Darüber hinaus schafft der Algorithmus den Übergang zur globalen Lokalisierung, demonstriert anhand der Relokalisierung des Roboters innerhalb einer gegebenen Karte.

3.1.3 Eigener Beitrag an der Publikation

Ich bin der Erstautor. Die Grundidee des Verfahrens stammen von mir, ebenso der überwiegende Teil des Textes, und basiert auf (für die Publikation ins Englische übersetzen) Ergebnissen meiner Diplomarbeit [Lingemann, 2004], die ich für die Publikation um ausführliche Evaluationen gegen andere Verfahren und um neue grundlegende Funktionalität erweitert habe.

3.2 3D-Kartierung

3.2.1 Einleitung

Soll eine 3D-Umgebung möglichst verschattungsfrei kartiert werden, ist eine Reihe von 3D-Punktwolken notwendig, die zu einem gemeinsamen, konsistenten Modell registriert werden müssen. Dieses Vorgehen, bestehend aus den zwei Teilproblemen der Selbstlokalisierung und der Generierung einer Karte, ist als SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) bekannt. Die Bezeichnung 6D-SLAM oder auch 6DoF-SLAM (DoF: *Degrees of Freedom*) bezieht sich hier auf die Fähigkeit des Algorithmus, mit unbeschränkten Bewegungen des Roboters/Sensors in allen seinen sechs effektiven Freiheitsgraden – drei translatorischen sowie drei rotatorischen – umgehen zu können.

3.2.2 Zusammenfassung der Publikation

Die Arbeit [Nüchter et al., 2007] beschreibt ein zu der Zeit neuartiges System: Es erweitert den grundlegenden Registrierungsalgorithmus von [Besl u. McKay, 1992] um Funktionen, die den erfolgreichen Einsatz zum Kartieren auch größerer Gebiete mit Hilfe eines autonomen 6DoF-Roboters ermöglichen. Als Eingabe dienen die Punktwolken, beispielsweise eines Laserscanners, sowie eine Schätzung ihrer Pose in einem gemeinsamen Koordinatensystem; diese Schätzung erfolgt beispielsweise über Odometrie, sofern hinreichend präzise verfügbar, oder auch durch das Ergebnis des Algorithmus aus Abschnitt 3.1.

Die Scans werden nun paarweise (gegen den jeweiligen Vorgänger) oder gegen die bisherige Karte, bestehend aus allen bislang registrierten Scans, ausgerichtet. Die Poseschätzung neuer Scans wird dabei durch Extrapolation anhand ihrer eigenen Schätzung sowie dem Ergebnis der Registrierung des Vorgänger-Scans korrigiert. Bei Schleifenschluss, also dem erneuten Besuch eines bereits explorierten Gebietes, findet im Falle der paarweisen Ausführung eine Re-Registrierung gegen jene früheren Scans statt. Wird hierbei ein Fehler festgestellt – üblicherweise basierend auf kleineren Registrierungsfehlern, die sich über die Zeit aufsummieren – wird der Fehler anteilig auf die beteiligten Scans verteilt. Dieses recht aufwändige Verfahren wird praktikabel durch für diesen Zweck optimierte Datenstrukturen, die die Bearbeitung von etlichen Stunden (naive Implementation) auf wenige Sekunden reduziert. Ermöglicht wurde dies insbesondere durch eine substanzielle Erweiterung des zentralen Punktes der Registrierung, der Nächste-Nachbarn-Suche, durch gecachete und approximative und Suchverfahren mit frei spezifizierbarer Approximationsgüte, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Die Qualität der so gewonnene Karte kann durch einen nachgeschalteten, automatischen Verfeinerungsschritt, das sogenannte *simultane Matching*, verbessert werden, das den

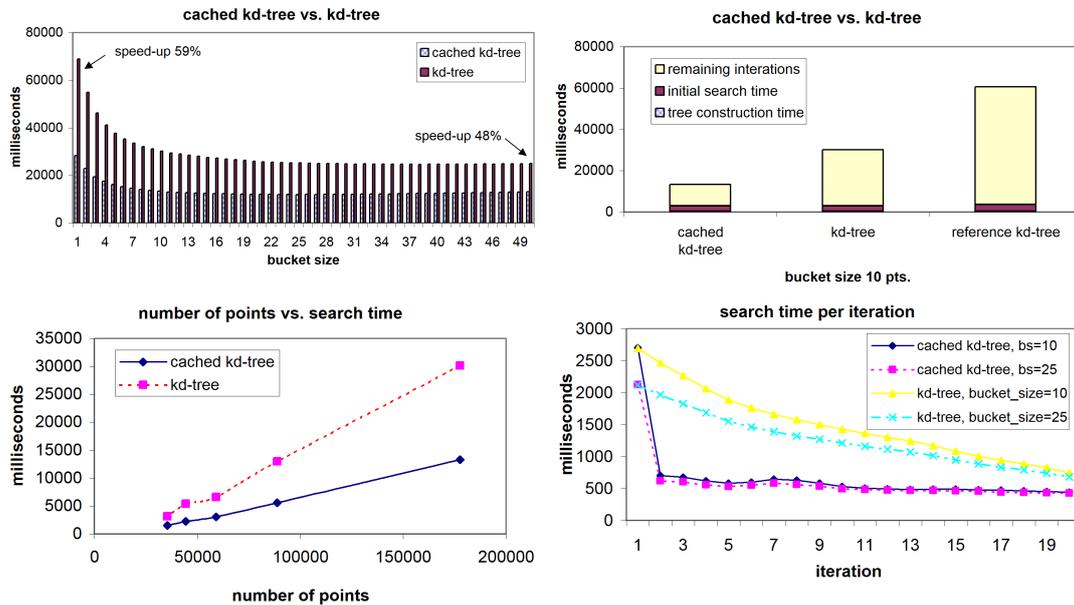


Abbildung 2: Geschwindigkeitsgewinn durch approximative und gecachte Suche in kD -Bäumen zur Beschleunigung der paarweisen Registrierung von 3D-Scans. Grafiken aus [Nüchter et al., 2007].

Gesamtfehler der Karte verringert und versucht, Inkonsistenzen auszubessern. Hierbei werden Scans gegen all jene Scans, die sie überlappen, nachregistriert; dies geschieht rekursiv mit allen Scans, die durch den vorherigen Schritt korrigiert worden sind – so lange, bis das gesamte Modell starr bleibt.

Die bislang 203-mal zitierte Arbeit bildete die Grundlage für einen Großteil der theoretischen und praktischen Arbeit im Bereich 3D-Scan-Verarbeitung der Autoren bis heute. Ein direktes Anwendungsbeispiel war die vollständig autonome Exploration und 3D-Kartierung eines Schloss-Saales. Ferner lieferte sie das Fundament für Industrie-finanzierte Projekte zur Qualitätskontrolle an Universität und DFKI (Deutsches Forschungszentrum für künstliche Intelligenz), sowie die Grundlage für weitreichende Kooperationen mit anderen Forschern, z.B. zur autonomen Rekonstruktion von verlassenen Minen in Zusammenarbeit mit Sebastian Thrun [Nüchter et al., 2004] (174-mal zitiert).

3.2.3 Eigener Beitrag an der Publikation

Die theoretische Basis stammt aus der Diplomarbeit von Andreas Nüchter. Die Software dazu haben wir in großen Teilen in gemeinsamer Arbeit unter der Betreuung von Hartmut Surmann implementiert, die Publikation ist ebenfalls in enger Zusammenarbeit entstanden.

3.3 Global konsistente Karten

3.3.1 Einleitung

Jegliche Verfahren zum sukzessiven Registrieren von Punktwolken, so auch der in Abschnitt 3.2 beschriebene Ansatz, unterliegen dem Problem, dass selbst erfolgreiche Registrierungen nie 100% exakt sind, und sich gerade bei längeren Trajektorien und größeren Karten kleine Ungenauigkeiten zu merkbaren Fehlern akkumulieren. Bei dem obigen Ansatz liefert das simultane Matching eine heuristisch recht erfolgreiche Möglichkeit, globale Konsistenz der Karte zu forcieren. Allerdings ist die Strategie, „so lange zu registrieren, bis sich nichts mehr ändert“ nicht nur äußerst teuer, was Zeit und Arbeitsspeicher angeht, sondern auch nicht beweisbar optimal.

Verbreitete, mathematisch fundiertere Ansätze für dieses Problem lassen sich in zwei Alternativen aufteilen: Zum einen sind hier EKF-basierte Verfahren zu nennen, die allerdings wegen in den Dimensionen exponential steigendem Aufwand in der Regel nur auf zweidimensionalen Daten Verwendung finden, oder auf spärlichen (meist visuellen) Merkmalen, die aus den Sensordaten extrahiert werden.

Dem gegenüber stehen iterative Verfahren, die üblicherweise Netzstrukturen mit Bezügen zwischen überlappenden Scans aufbauen und diese relaxieren. Dazu gehören im 2D vor allem die Arbeit von Lu und Miliotis [Lu u. Miliotis, 1997a], auf die ich im Folgenden weiter eingehen werde, sowie probabilistische Ansätze wie die Arbeit von Krishnan et al. [Krishnan et al., 2000], die für den Fall nicht-verrauschter Daten optimal ist, andernfalls als Initialschätzung der Lösung für nachgeschaltete Verfahren fungieren kann.

3.3.2 Zusammenfassung der Publikation

Der im Folgenden beschriebene Ansatz ([Borrmann et al., 2008], 144-mal zitiert) garantiert die oben geforderte Optimalität unter den gegebenen Informationen, indem er alle lokalen Unsicherheiten zwischen räumlich benachbarten Scans betrachtet und eine Lösung berechnet, die all diesen – potentiell auch widersprüchlichen – Bedingungen maximal gut genügt. Genauer wird eine Netzstruktur der Scans aufgebaut: Paarweise Registrierung aller überlappenden Scans liefert über sich daraus ergebenden Kovarianzen Schätzungen darüber, wie zuverlässig die jeweiligen Registrierungen durchgeführt worden sind. Dieser Graph wird global relaxiert und der Vorgang mit nun geänderten Kovarianzen und potentiell geänderten Nachbarschaftsbeziehungen so lange iteriert, bis das Ergebnis stabil ist und zu einer global konsistenten Karte konvergiert.

Offensichtlich bestehen räumliche Verbindungen, und damit also auch Kanten in dem Graphen, zwischen sukzessiven Scans. Neue, wertvolle Informationen liefern aber insbe-

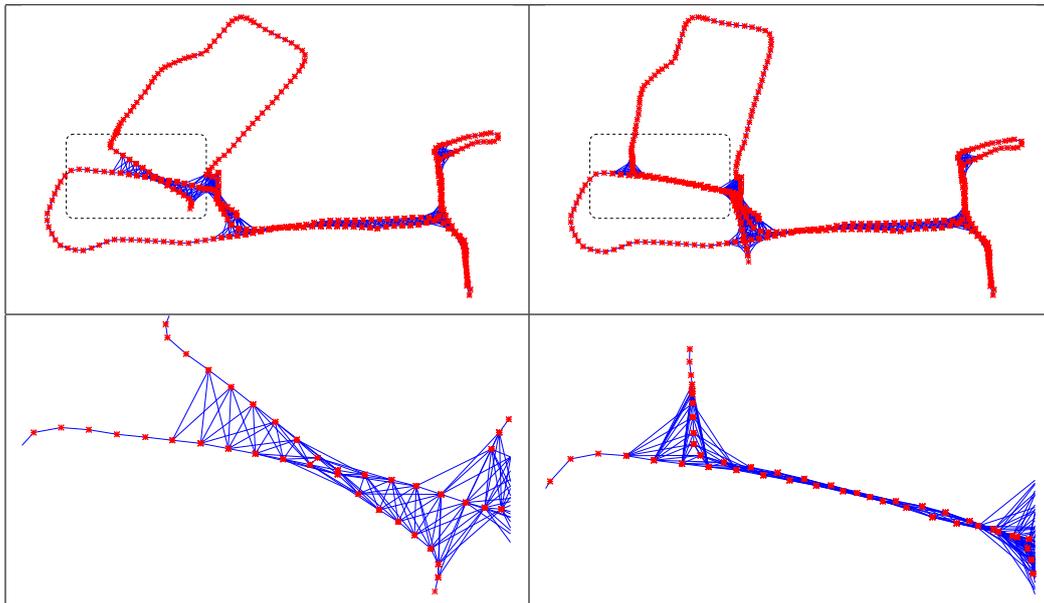


Abbildung 3: Ausschnitt aus der Graphstruktur der Exploration eines Campusgeländes mit 468 3D-Laserscans, Trajektorie ca. 750 m, vor und nach global konsistenter Optimierung (gesamte Szene siehe Abbildung 4). Unten: Zoom in den markierten Bereich. Grafiken aus [Borrmann et al., 2008].

sondere Schleifen, da nur hier Fehler, die beim Nachhalten der Poseschätzung aufgetreten sind, ersichtlich werden und ausgeglichen werden können. Im Gegensatz zu anderen verbreiteten Verfahren, die explizit für einfache Schleifen ausgelegt sind, sind in der vorliegenden Arbeit beliebige Netztopologien möglich.

Das Verfahren ist eine Erweiterung der Arbeiten von Lu/Milios in sechs Freiheitsgraden, die notwendig ist, um Scans mit beliebigen Bewegungen des Roboters/Laserscanners verarbeiten zu können. Es hat den Stand der Technik dermaßen erweitert, dass es mittlerweile Teil der verbreiteten Point Cloud Library (PCL) ist und darüber Verwendung als Standard-Algorithmus in der Roboter-Kontrollsoftware ROS gefunden hat. Ferner bildet es, zusammen mit dem im vorherigen Abschnitt 3.2 beschriebenen Algorithmus, die Basis für die Open-Source-Software 3DTK [Nüchter et al., 2009], für die wir 2009 mit dem *Invention*-Preis für freie Software ausgezeichnet worden sind.

3.3.3 Eigener Beitrag an der Publikation

Die Basis des Aufsatzes – Konzept und Implementierung – liegt in den Bachelorarbeiten von Dorit Borrmann und Jan Elseberg, die ich inhaltlich zusammen mit Andreas Nüchter betreut habe. Der Text ist eine Zusammenarbeit.

3.4 Heuristisches Schleifenschließen

3.4.1 Einleitung

Der in Abschnitt 3.3 beschriebene Algorithmus liefert eine Lösung zur globalen Konsistenz, die unter den gegebenen Informationen – den Kovarianzen zwischen den einzelnen Scans – optimal ist. Allerdings ist das Verfahren so speicher- und rechenzeitintensiv, dass es auf aktueller Hardware nicht für den Online-Einsatz während der Exploration einzusetzen ist, sondern stellt einen Nachbearbeitungsschritt dar. An dieser Stelle setzen *Greedy*-Strategien wie das heuristische Schleifenschließen (ELCH) aus [Sprickerhof et al., 2011] an.

3.4.2 Zusammenfassung der Publikation

Die global konsistente Optimierung aus Abschnitt 3.3 verarbeitet die relevanten Informationen automatisch, d.h. Schleifen, sofern vorhanden, werden implizit ausgenutzt. Für den im Folgenden beschriebenen Ansatz wird dagegen eine explizite Erkennung benötigt: Gegeben eine Heuristik, wann der Roboter eine Schleife³ geschlossen hat, d.h. wann er in ein Gebiet zurück gekehrt ist⁴, wird der Graph der bisherigen Scanpositionen betrachtet (Kanten repräsentieren partielle Überdeckungen). Der Teilgraph der Scans, die an dem Schleifenschluss beteiligt sind, wird nun so transformiert, dass Start und Ende von Schleifen bestmöglich zusammen passen. Die übrigen, an der Schleife beteiligten Scans werden anteilig an ihrer kürzesten Graphendistanz zum Schleifen-Startknoten mit transformiert, und die Änderungen iterativ in alle Schleifen, die an dem augmentierten Pfad hängen, weiter propagiert. Damit ist auch dieses Verfahren für beliebige Schleifentopologien anwendbar.

Während bei der globalen Relaxation lokal recht dichte Graphen entstehen, deren Optimierung mathematisch sehr aufwändig ist, wird hier nur genau eine Kante zwischen dem Start- und Endscan (bzw. einer Akkumulation von jeweils n Scans, n sehr klein) der Schleife betrachtet, vgl. Abbildung 4. Die Berechnung ist damit sehr effizient durchführbar.

³ Die Bedingung für ein wieder besuchtes Gebiet ist genau genommen nicht der Aufenthalt des Roboters, sondern eine hinreichend große Überdeckung der aktuellen mit früheren Sensormessungen. Je nach Reichweite und Öffnungswinkel reichen schon deutlich entfernte Scan-Positionen für einen Schleifenschluss aus, bzw. kann es vorkommen, dass nicht nur die physische Nähe von Aufnahmepositionen notwendig ist, sondern auch ähnliche Blickrichtungen.

⁴ Der hier beschriebene Algorithmus arbeitet mit einer Schleifendetektion basierend auf dem euklidischen Abstand und der Überlappung von Scans in der registrierten Trajektorie. Je ausgefeilter die Erkennung, desto größer der potentielle Nutzen dieses Verfahrens. Ein auf NDT basierender Ansatz, der die geometrische Struktur der Scans betrachtet, ist in [Magnusson et al., 2009] beschrieben.

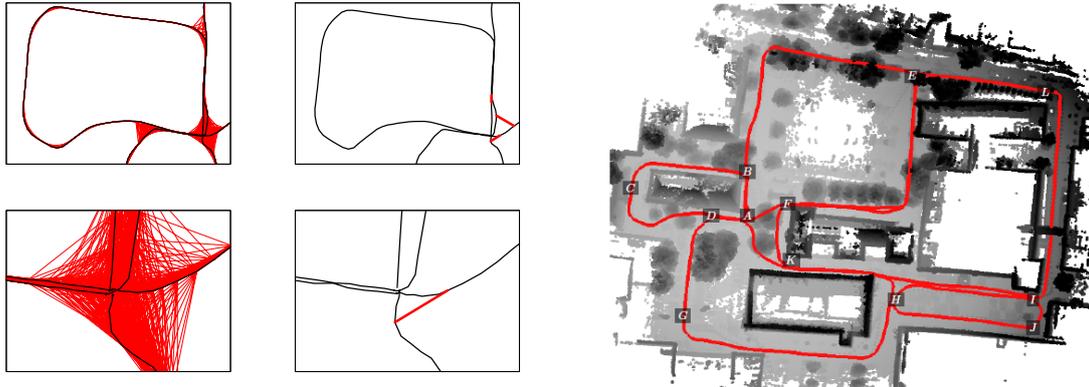


Abbildung 4: *Linke Seite:* Vergleich der Konnektivität unterschiedlicher SLAM-Graphen am Beispiel des Datensatzes aus Abbildung 3. Links: Global konsistente Optimierung. Rechts: Heuristisches Schleifenschließen. Unten: Jeweils Zoom in eine der Schleifen. *Rechte Seite:* 2D-Aufsicht auf die gesamte Trajektorie/Karte. Grafik aus [Sprickerhof et al., 2011].

In dem Papier ist gezeigt, dass das Verfahren an sich schon quantitativ sowie qualitativ überzeugende Ergebnisse liefert – und vor allem eine deutlich sicherere Lokalisierung des Roboters während der Fahrt ermöglicht, als dies mit sukzessivem Scanmatching alleine möglich gewesen ist. Darüber hinaus bietet es die Möglichkeit, als Vorverarbeitungsschritt für die globale Optimierung (Abschnitt 3.3) zu dienen, um als Ergebnis eine Karte zu garantieren, deren globaler Fehler minimal ist.

3.4.3 Eigener Beitrag an der Publikation

Das grundlegende Konzept und seine Implementierung liegen in der Diplomarbeit von Jochen Sprickerhof, die ich inhaltlich zusammen mit Andreas Nüchter betreut habe. Der Text ist eine Zusammenarbeit.

3.5 Alternative Selbstlokalisierung & Kartenbau

3.5.1 Einleitung

Die bislang beschriebenen Verfahren hatten zur Aufgabe, während der Fahrt zugleich eine Karte aufzunehmen und den Roboter in der bislang erstellten Karte zu lokalisieren (SLAM). Dabei wurde bisher absichtlich auf künstliche Landmarken verzichtet, die die

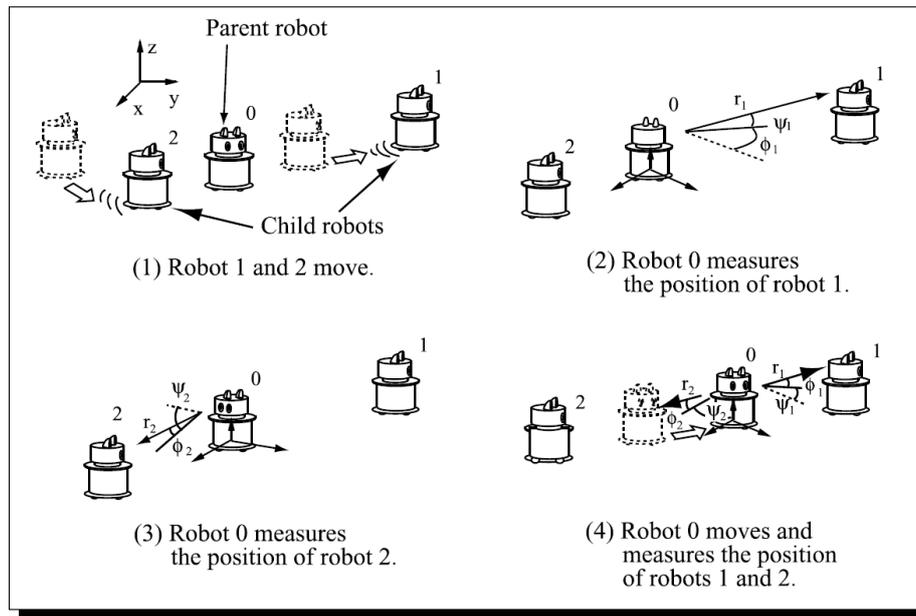


Abbildung 5: Kooperative Lokalisierung des Haupt- mit Hilfe der Kindroboter, die als autonome künstliche Landmarken dienen. Grafik aus [Tobata et al., 2012].

Aufgabe zwar deutlich erleichtern würden, die den Einsatz aber auf Umgebungen und Datensätze beschränken würden, die eben jene Landmarken aufweisen.

Ein alternativer Ansatz besteht darin, aktiv für die eigenen Landmarken zu sorgen, wie im Folgenden dargestellt.

3.5.2 Zusammenfassung der Publikation

Das in [Tobata et al., 2012] beschriebene System besteht aus einem Hauptroboter H , mit 3D-Sensorik ausgestattet, sowie zwei oder mehr, potentiell autonom agierenden, Kindrobotern K_n , die von H sicher detektierbar sind (Abbildung 5). Bei statischen K_n dienen diese dem fahrenden Hauptroboter zur Lokalisierung. Steht H , bewegen sich die K_n zu Positionen, die die Sichtbarkeit während der weiteren Fahrt von H gewährleisten. Auf diese Weise erhält man die Vorteile einer merkmalsbasierten Lokalisierung (namentlich, Stabilität) ohne die Nachteile des beschränkten Einsatzes bzw. manuellen Manipulation der Umgebung – und dies sowohl in Gebäuden als auch außerhalb.

Allerdings bleibt ein Problem weiterhin bestehen: Wie bei jeder sukzessiven Lokalisierung akkumulieren sich zumeist kleine Fehler bei längeren Fahrten und führen auf Dauer zu inkonsistenten Karten, insbesondere bei Schleifschluss. Der Algorithmus versucht dies

auszugleichen, indem bei Überbestimmtheit (z.B. durch Verwendung von redundanten Kind-Robotern) ein Least-Square-Minimierungsproblem über die Historie der Posen und ihrer Fehlerkovarianzmatrizen die Poseschätzungen verbessert werden. Darüber hinaus beeinflusst die Wahl der Fahrstrategien der Kindroboter das Lokalisierungsergebnis.

Auf diese Weise erhält man ein sehr zuverlässiges System . . . allerdings noch kein vollständiges SLAM. Dies geschieht durch eine nachgeschaltete Anwendung von 6D-SLAM, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, die die Ausgabe von CPS als – schon recht präzise – Eingangsschätzung nimmt und zu einer global konsistenten Karte optimiert. So erhält man ein System, das sich in zahlreichen Tests als außerordentlich stabil erwiesen hat bei der Lokalisierung in und Kartierung von allen Arten von Umgebung, auch solchen, die aufgrund ihrer Struktur aktuell üblichen Scan-Registrierungsverfahren verwehrt sind.

3.5.3 Eigener Beitrag an der Publikation

Die grundlegenden Arbeiten zum CPS-SLAM stammen von Kurazume et al. Während eines viermonatigen Forschungsaufenthalts am *Department of Intelligent Interaction Technologies*, Tsukuba-Universität Japan, hatte ich die Möglichkeit, mit Prof. Ryo Kurazume und Yukihiro Tobata an der Erweiterung des Verfahrens auf Basis der oben beschriebenen Algorithmen zu arbeiten. Der eigentliche Text der Publikation ist eine entsprechende Zusammenarbeit.

Verzeichnis der Textbestandteile

[Borrmann et al. 2008]

Dorit Borrmann, Jan Elseberg, Kai Lingemann, Andreas Nüchter und Joachim Hertzberg: *Globally consistent 3D mapping with scan matching*. In: Robotics and Autonomous Systems 56 (2008), Nr. 2, S. 130–142

[Lingemann et al. 2005]

Kai Lingemann, Andreas Nüchter, Joachim Hertzberg und Hartmut Surmann: *High-speed laser localization for mobile robots*. In: Robotics and Autonomous Systems 51 (2005), Nr. 4, S. 275–296

[Nüchter et al. 2007]

Andreas Nüchter, Kai Lingemann, Joachim Hertzberg und Hartmut Surmann: *6D SLAM – 3D mapping outdoor environments*. In: Journal of Field Robotics 24 (2007), Nr. 8-9, S. 699–722

[Sprickerhof et al. 2011]

Jochen Sprickerhof, Andreas Nüchter, Kai Lingemann und Joachim Hertzberg: *A Heuristic Loop Closing Technique for Large-Scale 6D SLAM*. In: Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications 52 (2011), Nr. 3, S. 119–222

[Tobata et al. 2012]

Yukihiro Tobata, Ryo Kurazume, Yusuke Noda, Kai Lingemann, Yumi Iwashita und Tsutomu Hasegawa: *Laser-based geometrical modeling of large-scale architectural structures using co-operative multiple robots*. In: Autonomous Robots 32 (2012), Nr. 1, S. 49–62

Literaturverzeichnis

[Allen et al. 2001]

Peter K. Allen, Ioannis Stamos, Atanas Gueorguiev, Ethan Gold und Paul Blaer: *AVENUE: Automated Site Modelling in Urban Environments*. In: Proceedings of the International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM). Quebec City, Canada, Mai 2001

[Bansal et al. 2011]

Mayank Bansal, Harpreet S. Sawhney, Hui Cheng und Kostas Daniilidis: *Geolocalization of street views with aerial image databases*. In: Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia, 2011, S. 1125–1128

[Benjemaa u. Schmitt 1998]

Raouf Benjemaa und Francis Schmitt: *A Solution For The Registration Of Multiple 3D Point Sets Using Unit Quaternions*. In: Computer Vision – ECCV 2 (1998), S. 34–50

[Besl u. McKay 1992]

Paul J. Besl und Neil D. McKay: *A Method for Registration of 3-D Shapes*. In: Journal of the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI) 14 (1992), Februar, Nr. 2, S. 239–256

[Biber u. Duckett 2005]

Peter Biber und Tom Duckett: *Dynamic Maps for Long-Term Operation of Mobile Service Robots*. In: Robotics: Science and Systems (RSS), 2005, S. 17–24

[Biber u. Straßer 2003]

Peter Biber und Wolfgang Straßer: *The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching*. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2003

[Borrmann u. Elseberg 2009]

Dorit Borrmann und Jan Elseberg: *Deforming Scans for Improving the Map Quality Using Plane Extraction and Thin Plate Splines*, Universität Osnabrück, Deutschland, Diplomarbeit, August 2009

[Borrmann et al. 2010]

Dorit Borrmann, Jan Elseberg, Shaan S. Rauniyar und Andreas Nüchter: *Lifelong 3D Mapping – Monitoring with a 3D Scanner*. In: Proceedings of the IEEE/RSJ IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring, 2010

[Bülow 2010]

Heiko Bülow: *Applications of Spectral Phase Registration in Robotic Mapping*, Jacobs University, Diss., Oktober 2010

[Bülow u. Birk 2013]

Heiko Bülow und Andreas Birk: *Spectral 6-DOF Registration of Noisy 3D Range Data with Partial Overlap*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI) 35 (2013), S. 954–969

[Cauchois et al. 2003]

Cyril Cauchois, Eric Brassart, Laurent Delahoche und Cyril Drocourt: *Spatial Localization Method with Omnidirectional Vision*. In: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR). Coimbra, Portugal, Juni 2003, S. 287–292

[Censi u. Carpin 2009]

Andrea Censi und Stefano Carpin: *HSM3D: Feature-Less Global 6DOF Scan-Matching in the Hough/Radon Domain*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009, S. 3899–3906

[Cox 1991]

Ingemar J. Cox: *Blanche – An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle*. In: Journal of the IEEE Transactions on Robotics and Automation (TRA) 7 (1991), Juli, Nr. 2, S. 193–204

[Eggert et al. 1996]

David Eggert, Andrew W. Fitzgibbon und Robert B. Fisher: *Simultaneous Registration of Multiple Range Views Satisfying Global Consistency Constraints For Use in Reverse Engineering* / Dept. of Artificial Intelligence. University of Edinburgh, 1996 (804). – Technical Report

[Elseberg et al. 2012]

Jan Elseberg, Dorit Borrmann und Andreas Nüchter: *6DOF Semi-Rigid SLAM for Mobile Scanning*. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012, S. 1865–1870

[Elseberg et al. 2013]

Jan Elseberg, Dorit Borrmann und Andreas Nüchter: *Algorithmic solutions for computing precise maximum likelihood 3D point clouds from mobile laser scanning platforms*, 2013, eingereicht

[Endres et al. 2012]

Felix Endres, Jürgen Hess, Nikolas Engelhard, Jürgen Sturm, Daniel Cremers und Wolfram Burgard: *An Evaluation of the RGB-D SLAM System*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2012

[Folkesson u. Christensen 2007]

John Folkesson und Henrik Christensen: *Graphical SLAM for Outdoor Applications*. In: Journal of Field Robotics 24 (2007), February, Nr. 1–2, S. 51–70

[Frese 2007]

Udo Frese: *Efficient 6-DOF SLAM with Treemap as a Generic Backend*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Rome, Italy, April 2007, S. 4814–4819

[Frese et al. 2010]

Udo Frese, René Wagner und Thomas Röfer: *A SLAM Overview from a User's Perspective*. In: KI - Zeitschrift Künstliche Intelligenz 24 (2010), Nr. 3, S. 191–198

[Früh u. Zakhor 2001]

Christian Früh und Avidesh Zakhor: *3D model generation for cities using aerial photographs and ground level laser scans*. In: Vision and Pattern Recognition Conference, 2001

[Grisetti et al. 2009]

Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss und Wolfram Burgard: *Non-linear Constraint Network Optimization for Efficient Map Learning*. In: IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems 10 (2009), S. 428–439

[Hähnel et al. 2003]

Dirk Hähnel, Wolfram Burgard, Dieter Fox und Sebastian Thrun: *A highly efficient FastSLAM algorithm for generating cyclic maps of large-scale environments from raw laser range measurements*. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2003

[Krishnan et al. 2000]

Shankar Krishnan, Pei Yean Lee, John B. Moore und Suresh Venkatasubramanian: *Global Registration of Multiple 3D Point Sets via Optimization on a Manifold*. In: Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2000

[Lingemann 2004]

Kai Lingemann: Fraunhofer Series in Information and Communication Technology. Bd. 7: *Schnelles Pose-Tracking auf Laserscan-Daten für autonome mobile Roboter*. Shaker-Verlag, 2004

[Lu u. Milios 1997a]

Feng Lu und Evangelos E. Milios: *Globally Consistent Range Scan Alignment for Environment Mapping*. In: Autonomous Robots Bd. 4, 1997, S. 333–349

[Lu u. Milios 1997b]

Feng Lu und Evangelos E. Milios: *Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans*. In: Journal of Intelligent & Robotic Systems 18 (1997), März, S. 249–275

[Lucchese et al. 2002]

Luca Lucchese, Gianfranco Doretto und Guido Maria Cortelazzo: *A frequency domain technique for range data registration*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI) 24 (2002), Nr. 11, S. 1468–1484

[Magnusson et al. 2009]

Martin Magnusson, Henrik Andreasson, Andreas Nüchter und Achim J. Lilienthal: *Automatic Appearance-Based Loop Detection from 3D Laser Data Using the Normal Distributions Transform*. In: Journal of Field Robotics 26 (2009), November, Nr. 11–12, S. 892–914

[Magnusson et al. 2007]

Martin Magnusson, Achim Lilienthal und Tom Duckett: *Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT*. In: Journal of Field Robotics (2007), S. 803–827

[Makadia et al. 2006]

Ameesh Makadia, Alexander IV Patterson und Kostas Daniilidis: *Fully Automatic Registration of 3D Point Clouds*. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2006, S. 1297–1304

[Newman u. Ho 2005]

Paul Newman und Kin Leong Ho: *SLAM – Loop Closing with Visually Salient Features*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2005

[Nüchter et al. 2009]

Andreas Nüchter, Kai Lingemann, Jan Elseberg, Dorit Bormann, Jochen Sprickerhof und weitere: *3DTK – The 3D-Toolkit*. <http://slam6d.sourceforge.net/>, 2009

[Nüchter et al. 2004]

Andreas Nüchter, Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Joachim Hertzberg und Sebastian Thrun: *6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping*. In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2004, S. 1998–2003

[Olson 2008]

Edwin B. Olson: *Robust and Efficient Robotic Mapping*. Cambridge, MA, USA, Massachusetts Institute of Technology, Diss., June 2008

[Pathak et al. 2010]

Kaustubh Pathak, Andreas Birk, Narūnas Vaškevičius und Jann Poppinga: *Fast Registration Based on Noisy Planes With Unknown Correspondences for 3-D Mapping*. In: IEEE Transaction on Robotics 26 (2010), S. 424–441

[Pulli 1999]

Kari Pulli: *Multiview Registration for Large Data Sets*. In: Proceedings of the International Conference on 3-D Imaging and Modeling (3DIM). Los Alamitos, CA, USA : IEEE Computer Society, 1999

[Rusu et al. 2009]

Radu Bogdan Rusu, Nico Blodow und Michael Beetz: *Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009, S. 3212–3217

[Saarinen et al. 2013]

Jari P. Saarinen, Henrik Andreasson, Todor Stoyanov und Achim J. Lilienthal: *3D Normal Distributions Transform Occupancy Maps: An Efficient Representation for Mapping in Dynamic Environments*. In: International Journal of Robotics Research (IJRR) (2013, akzeptiert)

[Santiso et al. 2003]

Enrique Santiso, Manuel Mazo, Jesús Ureña, José Antonio Jiménez, Juan Jesús García und M. Carmen Serra: *Mobile Robot Positioning with Natural Landmark*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR). Coimbra, Portugal, Juni 2003, S. 47–52

[Stoyanov et al. 2012]

Todor Stoyanov, Martin Magnusson und Achim J. Lilienthal: *Fast and Accurate Scan Registration through Minimization of the Distance between Compact 3D NDT Representations*. In: The International Journal of Robotics Research 31 (2012), S. 1377–1393

[Stoyanov et al. 2013]

Todor Stoyanov, Martin Magnusson und Achim J. Lilienthal: *Comparative Evaluation of the Consistency of Three-dimensional Spatial Representations used in Autonomous Robot Navigation*. In: Journal of Field Robotics (JFR) 30 (2013), Nr. 2, S. 216–236

[Sturm et al. 2012]

Jürgen Sturm, Nikolas Engelhard, Felix Endres, Wolfram Burgard und Daniel Cremers: *A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems*. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012, S. 573–580

[Thrun et al. 2000]

Sebastian Thrun, Wolfgang Burgard und Dieter Fox: *A Real-Time Algorithm for Mobile Robot Mapping With Applications to Multi-Robot and 3D Mapping*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). San Francisco, CA, 2000

[Thrun et al. 2005]

Sebastian Thrun, Wolfram Burgard und Dieter Fox: Probabilistic Robotics. The MIT Press, 2005

[Thrun et al. 2006]

Sebastian Thrun, Mike Montemerlo und Andrei Aron: *Probabilistic Terrain Analysis For High-Speed Desert Driving*. In: Proceedings of Robotics: Science and Systems. Cambridge, USA, June 2006

[Triebel u. Burgard 2005]

Rudolph Triebel und Wolfram Burgard: *Improving Simultaneous Localization and Mapping in 3D Using Global Constraints*. In: Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), 2005

[Weingarten u. Siegwart 2006]

Jan W. Weingarten und Roland Siegwart: *3D SLAM using planar segments*. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2006, S. 3062–3067

[Weiß et al. 1994]

Gerhard Weiß, Christopher Wetzler und Ewald von Puttkamer: *Keeping Track of Position and Orientation of Moving Indoor Systems by Correlation of Range-Finder Scans*. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Munich, Germany, 1994, S. 595–601

[Wiemann 2013]

Thomas Wiemann: *Automatische Generierung dreidimensionaler Polygonkarten für mobile Roboter*, Universität Osnabrück, Diss., April 2013

[Wiemann et al. 2012]

Thomas Wiemann, Kai Lingemann, Andreas Nüchter und Joachim Hertzberg: *A Toolkit for Automatic Generation of Polygonal Maps – Las Vegas Reconstruction*. In: Proceedings of the German Conference on Robotics (ROBOTIK), 2012, S. 446–451

[Zhao u. Shibasaki 2001]

Huijing Zhao und Ryosuke Shibasaki: *Reconstructing Textured CAD Model of Urban Environment Using Vehicle-Borne Laser Range Scanners and Line Cameras*. In: Second International Workshop on Computer Vision System (ICVS). Vancouver, Canada, July 2001, S. 284–295