

Fraunhofer Series in
Information and Communication Technology

Band 7/2004

Kai Lingemann

**Schnelles Pose-Tracking auf Laserscan-Daten
für autonome mobile Roboter**

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2004

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2825-X

ISSN 1612-4863

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Die Institute der Fraunhofer-Gruppe Informations- und Kommunikationstechnik (IuK) entwickeln gemeinsame Strategien für die anwendungsorientierte Forschung.

In der Reihe „Fraunhofer Series in Information and Communication Technology“ publizieren die IuK-Institute Dissertationen, Habilitationen sowie herausragende Diplomarbeiten, wissenschaftliche Monographien und Forschungsberichte. Diese Publikationen dienen der Fundierung der anwendungsnahen Fraunhofer-spezifischen Forschung und Vorlaufforschung.

Direktorium der Fraunhofer-IuK-Gruppe

Prof. Dr. José L. Encarnação, Vorsitzender, Fraunhofer IGD

Prof. Dr. Ulrich Trottenberg, stv. Vorsitzender, Fraunhofer SCAI

Prof. Dr. Jürgen Beyerer, Fraunhofer IITB

Prof. Dr. Karlheinz Brandenburg, Fraunhofer IDMT

Prof. Dr. Thomas Christaller, Fraunhofer AIS

Prof. Dr. Claudia Eckert, Fraunhofer SIT

Prof. Dr. Stefan Jähnichen, Fraunhofer FIRS

Prof. Dr. Matthias Jarke, Fraunhofer FIT

Prof. Dr. Erich J. Neuhold, Fraunhofer IPSI

Prof. Dr. Radu Popescu-Zeletin, Fraunhofer FOKUS

Prof. Dr. Dieter Präzel-Wolters, Fraunhofer ITWM

Prof. Dr. Martin Reiser, Fraunhofer IMK

Prof. Dr. Dieter Rombach, Fraunhofer IESE

Prof. Dr. Dieter Spath, Fraunhofer IAO

Prof. Dr. Heinz Thielmann, Fraunhofer SIT

Prof. Dr. Herbert Weber, Fraunhofer ISST

Vorwort

Selbstlokalisierung ist eine der Grundfunktionen autonomer mobiler Roboter. Entsprechend gibt es dazu eine Vielzahl von Ansätzen und Arbeiten, wobei die Literatur derzeit SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) gleichsam als die Krone der Selbstlokalisierung behandelt.

Das heißt aber nicht, alle Probleme in diesem Kontext seien gelöst. Forschung an autonomen mobilen Robotern hat sich – aus guten Gründen – in den letzten Jahren vielfach in Bürogebäuden abgespielt und Roboter verwendet, die dafür gebaut sind, auf planen, horizontalen Fußböden maximal mit Schrittgeschwindigkeit zu fahren. Unter diesen Randbedingungen waren die Fortschritte in der Selbstlokalisierung mit oder ohne Kartenbau schnell und beeindruckend, und das Problem kann im Wesentlichen als gelöst betrachtet werden. Dazu hat sicherlich der bekannte Zuwachs an Prozessorleistung beigetragen, der früher unpraktikable Rechenverfahren heute bordrechnerfähig gemacht hat. Auch die Verwendung von Laserscannern als Umgebungssensoren statt der vordem üblichen Ultraschallsensoren hilft. Darüber hinaus gibt es jedoch eine ganze Reihe von originellen wissenschaftlichen Beiträgen zur Selbstlokalisierung, etwa zum Scan-Matching, zu probabilistischen, merkmals- und histogrammbasierten Verfahren.

Sobald der autonome mobile Roboter sich aber außerhalb von Gebäuden lokalisieren soll, der Fußboden nicht mehr plan ist oder die Fahrgeschwindigkeit weit über Schritt liegt, wird die Literatur dünn. Dieses Problem wurde für autonome mobile Bürogebäuderoboter nicht bearbeitet, weil es sich dort meist nicht stellt. Der Unterschied zu den breit erprobten Verfahren liegt darin, dass bei hoher Geschwindigkeit wie auch bei Nick-, Roll- oder Rüttelbewegungen des Roboters zwei aufeinander folgende Scans selbst ohne Vorliegen von Messfehlern leicht sehr unterschiedlich ausfallen können, wenn sie nicht in ausreichend schnellen Zykluszeiten aufgenommen und verarbeitet werden können. Die Abbildung dieser Scans in eine Risskarte, geschweige denn der Aufbau einer Karte aus diesen Informationen oder auch nur *Pose-Tracking*, also die präzise Ermittlung einer Pose-Differenz zwischen zwei konsekutiven Sensormessungen, ist mit den bekannten Verfahren unter den genannten Bedingungen nicht möglich oder nicht sinnvoll. Soweit diese Verfahren das Vorliegen von planen Wandflächen oder rechten Winkeln voraussetzen, sind sie im Freiland schon sowieso verloren.

An diesen Problemen setzt die Arbeit von Herrn Lingemann an. Den Roboter KURT3D, mit dem er gearbeitet hat, fährt er bis 4 m/s, also 14.4 km/h oder in zügigem Dauerläufertempo. Zudem fährt er ihn im Freien in baum- und buschbestandem Gelände und auf der Rüttelstrecke, die ein Verbundpflasterweg für ein mechanisch im wesentlichen ungedämpftes Radfahrzeug darstellt. Ziel der Arbeit ist, unter all diesen Voraussetzungen Pose-Tracking, den “kleinen Bruder” des SLAM, auf Basis ebener Laser-Scans zu realisieren.

Herrn Lingemanns Verfahren HAYAI löst das Problem mit Eleganz. Es ist auf einem mäßig schnellen Laptop in der Lage, Laser-Scans in 2.300 Hz zu verarbeiten – wenn der Scanner die Daten nur so schnell lieferte. Dieser erreicht 75 Hz, was bei einer Fahrt mit 4 m/s also ein Scan alle 5.3 cm ist und damit praktisch ausreicht. HAYAI ist, wie Herr Lingemann im empirischen Teil der Arbeit nachweist, deutlich besser als alle derzeit üblichen Referenzverfahren, selbst wenn man im Offline-Betrieb die Laser-Scan-Frequenz künstlich so reduziert, dass diese Verfahren die wesentlich längere Verarbeitungszeit bekommen, die sie brauchen. Herr Lingemann leitet

den Kern von HAYAI analytisch her, sodass der Grund für diese Überlegenheit offenbar wird. Es arbeitet auf Basis von Merkmalen in der Polardarstellung von Laser-Scans. Darin nutzt es zum einen die Erhaltung der Merkmals-Topologie zwischen zwei aufeinander folgenden Scans aus. Zum anderen können die Rotations- und Translationskomponenten beim Scan-Matching ohne Iteration konstruktiv berechnet werden, weil die Merkmalsmengen zweier solcher Scans näherungsweise den gleichen geometrischen Schwerpunkt haben. Die mathematische Herleitung erlaubt auch, Grenzen des Verfahrens zu charakterisieren, die dann aufscheinen, wenn die Umgebung in Scan-Richtung praktisch merkmalslos ist, also keine signifikanten Unstetigkeiten oder Sprünge enthält. Die Arbeit bietet aber auch für diese Situationen die Lösung durch Fusion mit Odometrie-Daten und schritthaltende Lokalisierung in einer Referenzkarte.

Es ist hoch empfehlenswert, neben den qualitativen und quantitativen Vergleichen mit Referenzverfahren, die Herr Lingemann in dieser Arbeit präsentiert, in die Experiment-Videos im Web zu sehen, deren URL der Text angibt. Darin wird plastisch, wie schnell 4 m/s in einem Büroflur ist, wie eine Rüttelfahrt im Freiland aussieht und wie bei einer schnellen Schleuderschaft auf glattem Hallenboden die Odometrie wie erwartet hoffnungslos verloren geht, aber HAYAI die Pose nachhält.

Sind Herrn Lingemanns Ergebnisse also nur relevant, wenn man Hochgeschwindigkeitsrobotik im Freiland treiben will? Keineswegs! Auch für gemächliche Fahrt in Gebäuden ist das Verfahren immer noch besser und rechenzeitsparender als alle anderen. Bei einer Laserdatenfrequenz von 75 Hz und einem Verfahren, das sie in Echtzeit verarbeiten kann, verliert zudem auch Dynamik in der Umgebung einen Teil ihres Schreckens beim Pose-Tracking: ein Mensch, der aus Sicht des Roboters als mobiles Hindernis in einem Gebäude unterwegs ist, legt zwischen zwei Scans bei zügigem Gang nur etwa 2 cm zurück und würde somit das Pose-Tracking nicht stören, sondern als "vorübergehende Landmarke" sogar noch stützen.

Herrn Lingemanns Arbeit wird in Auszügen natürlich an geeigneten Stellen veröffentlicht werden. Mit der hier vorliegenden Version gibt es wenigstens für den deutschen Sprachraum schon einmal die komplette Darstellung. Sie hat eine rasche Verbreitung verdient.

Sankt Augustin, 7.5.2004

PD Dr. Joachim Hertzberg

Die nachfolgende Arbeit wurde am Fraunhofer Institut für Autonome Intelligente Systeme angefertigt, am 8. Januar 2003 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn als Diplomarbeit eingereicht und anschließend in der vorliegenden Publikation veröffentlicht.

Danksagung

Herzlich danken möchte ich Herrn PD Dr. Joachim Hertzberg, der mir wichtige Einblicke in die interessanten Forschungsgebiete *künstliche Intelligenz* und *Robotik* gewährt hat. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Dr.-Ing. Hartmut Surmann. Seine große Bereitschaft, meine Fragen zu beantworten und fachliche Diskussionen zu führen, hat diese Arbeit durch wertvolle Hinweise und Ideen vorangetrieben und führte ferner zum Grundkonzept des vorgestellten Algorithmus. Von seinem Wissen über den verwendeten Roboter konnte ich ebenfalls sehr profitieren.

Ein großes Dankeschön auch an Andreas Nüchter und Hannes Rohde, die den Text korrektur-gelesen und viele wertvolle Anregungen gegeben haben.

Dank sagen möchte ich schließlich meinen Eltern. Sie haben mir dieses Studium ermöglicht und mich in jeder Hinsicht unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftlicher Beitrag	3
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1	Sensorik	5
2.1.1	Odometrie	5
2.1.2	Ultraschall	6
2.1.3	Laser	9
2.1.4	Kamera	10
2.1.5	Fazit	13
2.2	Lokalisierungs-Verfahren	13
2.2.1	Problemdefinition	13
2.2.2	Scanmatching	14
2.2.3	Merkmale	21
2.2.4	Karte	25
2.2.5	Landmarken	26
2.2.6	Sonstiges	28
2.2.7	Wahrscheinlichkeitsbasierte Ansätze	29
3	Pose-Tracking mittels HAYAI	33
3.1	Selbstlokalisierung	33
3.2	Datenvorverarbeitung	36
3.2.1	Medianfilter	36
3.2.2	Reduktionsfilter	38

3.2.3	Linienfilter	38
3.2.4	Lineare Filter	39
3.3	Berechnung der Merkmale	41
3.3.1	Merkmalsextraktion	42
3.3.2	Bestimmung der Kongruenzpaare	45
3.4	Berechnung der Pose	54
3.4.1	Berechnung der Rotation	58
3.4.2	Berechnung der Translation	60
3.5	Robuste Lokalisierung	61
3.5.1	Evaluation von Matchings	61
3.5.2	Winkelhistogramme	62
3.5.3	Basisscans	65
4	Fusion mit extrinsischen Informationen	69
4.1	Odometrie	69
4.2	Relokalisierung in einer Karte	72
4.2.1	Problemdefinition	72
4.2.2	Simulation von Laserscans	73
4.2.3	Weltmodell	74
5	Ergebnisse	77
5.1	Praxisbeispiel: Indoor-Fahrt	77
5.2	Praxisbeispiel: Outdoor-Fahrt	79
5.2.1	Pose-Tracking und 3D-Modellierung	79
5.3	Evaluierung	82
5.3.1	Paarweises Scanmatching	82
5.3.2	Inkrementelles Matching: Simulation einer Fahrt	86
5.3.3	Robustheit	89
6	Zusammenfassung und Ausblick	95
A	Mathematische Grundlagen	97
A.1	z -Transformation	97
A.2	Kalman-Filter	98
A.2.1	Anwendung	101