

# Konsistente Karten aus Laserscans

Thomas Röfer

Bremer Institut für Sichere Systeme, TZI, FB3, Universität Bremen,  
roef@tzi.de

**Zusammenfassung.** Im Projekt *Bremer Autonomer Rollstuhl* [8] (vgl. Abb. 1) werden Verfahren entwickelt, die ältere und behinderte Personen bei der Benutzung von Rollstühlen unterstützen. Diese reichen vom *Fahrassistenten*, der Kollisionen vermeidet und einfache Verhalten zur Verfügung stellt, über den *Routenassistenten*, der amnestischen Patienten hilft, sich zurechtzufinden, bis zum vollautomatischen Navigieren in Gebäuden. Für letzteres wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem der Rollstuhl mit Hilfe eines Laserscanners Karten aufbauen und für die Selbstlokalisierung nutzen kann. Dieses trägt den Anforderungen einer Anwendung im Reha-Bereich Rechnung, insbesondere der ungenauen Odometrie des verwendeten Rollstuhls und der Tatsache, dass u.a. aus finanziellen Gründen nur ein 180°-Laser-Entfernungsmesser verwendet werden kann.

## 1 Stand der Forschung

Ein verbreitetes Verfahren zum Aufbau von Karten für die Selbstlokalisierung mobiler autonomer Systeme ist die so genannte Scanüberdeckung. Diese wird verwendet, um den räumlichen Versatz zwischen jeweils zwei Positionen zu bestimmen, an denen Scans von einem Laser-Entfernungssensor aufgenommen wurden [1][5][6]. Alternativ können die Scanpunkte auch in lokalen Rasterkarten akkumuliert werden, um diese Raster danach zu überdecken [7]. Der hier vorgestellte Ansatz zum Aufbau von Karten basiert auf den Arbeiten von Weiß *et al.* [10], d.h. er nutzt aus den Scanpunkten gewonnene Histogramme, um die Scans einander zuzuordnen. Der ursprüngliche Ansatz wurde dazu erheblich erweitert [2], u.a. um einen Sensor mit einem Öffnungswinkel von 180° (statt 360°) nutzen zu können: Der Scanüberdecker nutzt ein Projektionsfilter [6], zerlegt die Laserscans in Geradensegmente und verwendet Histogramme unterschiedlicher Granularität.

Folgt man der Spatial Semantic Hierarchy [3], so müsste ein Roboter zuerst topologisches Wissen über seine Umgebung erwerben, um später eine konsistente metrische Beschreibung generieren zu können. Die einzig bekannte Implementierung dieses Ansatzes auf einem realen Roboter [4] setzt leider eine sehr speziell beschaffene Umgebung voraus, um die topologische Struktur aufbauen zu können. In [6] wird ein



Abbildung 1. Der Bremer Autonomer Rollstuhl „Rolland“

Verfahren vorgestellt, das aus vorab aufgezeichneten Laserscans eine konsistente Karte erzeugt, für einen Echtzeitbetrieb aber zu langsam ist. Ein in [9] vorgestellter probabilistischer Ansatz zur Generierung konsistenter Karten arbeitet hingegen in Echtzeit, aber nur, wenn selten neue Sensormessungen zu integrieren sind.

## 2 Vorteile der Scanüberdeckung

Das in [2] vorgestellte Verfahren zur Scanüberdeckung bestimmt den räumlichen Versatz der Aufnahmepositionen zweier Scans. Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz zur Kartografierung basiert auf dieser Methode, könnte aber auch mit anderen Techniken der Scankorrelation verwendet werden. Die Grundidee ist, dass, sobald man eine Methode hat, um den räumlichen Versatz zwischen jeweils zwei Scanpositionen zu bestimmen, diese auch mehrfach hintereinander eingesetzt werden kann, um somit den metrischen Versatz auch über größere Distanzen relativ zu einer Anfangsposition errechnen zu können. Im Vergleich zu einer rein odometrischen Pfadintegration kann damit eine wesentlich größere Genauigkeit erreicht werden: Die Odometrie basiert auf der Annahme, dass sich die Bewegung eines mobilen Systems exakt in den Umdrehungen seiner Räder widerspiegelt, was aber aus verschiedenen Gründen (z.B. durchdrehende Räder, Schlupf auf Teppichböden, druckabhängige Durchmesser von Luftreifen usw.) selten der Fall ist. Die hier vorgestellte Methode nutzt hingegen externe Strukturen als Referenz, wodurch die eigentliche Bewegung des Systems in jedem Fall präzise erfasst werden kann. Allerdings werden – ähnlich wie bei der Pfadintegration – viele kleine räumliche Versatzstücke aufsummiert, wodurch ebenfalls eine Akkumulation von Fehlern entstehen kann. Es gibt zwei Möglichkeiten, diese Fehler zu reduzieren: Zum einen können, wegen der großen Messreichweite eines Laserscanners, Scans überdeckt werden, die von Positionen aus aufgenommen wurden, die mehrere Meter voneinander entfernt sind. Von den resultierenden großen Versatzstücken wird eine wesentlich geringere Anzahl für eine Kartografierung benötigt, wodurch ein viel kleinerer Positionsfehler aufsummiert wird.

Zum anderen, und im Gegensatz zur Odometrie, bietet die Scanüberdeckung die Möglichkeit, akkumulierte Fehler wieder zu korrigieren. Werden die korrelierten Scans zusammen mit ihren korrigierten Aufnahmepositionen in einer Karte gespeichert, dann kann diese Karte genutzt werden, um zu erkennen, dass der Rollstuhl in einen bereits kartografierten Teil der Umgebung zurückkehrt. Dadurch kann der Positionsfehler nicht mehr beliebig anwachsen. Stattdessen bleibt er unterhalb einer bestimmten Grenze, die sich aus der längsten Distanz ergibt, die das mobile System in seiner Einsatzumgebung zurücklegen kann, ohne in bekanntes Gebiet zurückzukehren.

## 3 Repräsentation der Karte

Die Karte wird durch eine Liste repräsentiert. Jeder Eintrag der Liste enthält einen Laserscan, seine korrigierte metrische Aufnahmeposition und einen so genannten *Frame of Reference* (FoR). Der FoR ist ein Wert, der anfangs mit der bereits von dem mobilen System zurückgelegten Strecke initialisiert wird. Daher kann durch Ver-

gleich der FoRs zweier Scans festgestellt werden, wie viel Strecke zwischen ihren Aufnahmepositionen zurückgelegt wurde. Diese Distanz kann sich stark von der euklidischen Entfernung der Positionen unterscheiden, z.B. wenn der Rollstuhl wieder an denselben Ort zurückkehrt. Der FoR wird verwendet, um den Suchraum bei der Korrelation von Scans zu beeinflussen, z.B. wird angenommen, dass der akkumulierte Positionsfehler zwischen Scans mit sehr ähnlichen FoRs nur gering ist, weshalb die bei der Überdeckung untersuchten maximalen Verschiebungen klein gehalten werden können und Fehlzusammenordnungen vermieden werden.

## 4 Kartografierung

Zu Beginn der Kartografierung wird die aktuelle Position mit  $(x, y, \theta) = (0, 0, 0)$  initialisiert und der Wegstreckenzähler auf 0 gesetzt. Ein erster Scan wird aufgenommen und in die Karte eingefügt.

Für jeden weiteren aufgenommenen Scan wird die Karte nach einer geeigneten Menge an *Referenzscans* durchsucht. Der neue Scan wird der Reihe nach mit diesen Referenzen korreliert, bis einer erfolgreich überdeckt werden konnte. Eine Überdeckung ist erfolgreich, wenn die Korrelationsfunktion für den „besten“ Versatz einen deutlich höheren Wert liefert als für den zweitbesten. Der dafür erforderliche Schwellenwert hängt von der Differenz der FoRs der beiden Scans ab, je weiter sie auseinander liegen, desto deutlicher muss das Korrelationsergebnis sein. Ist eine Überdeckung gefunden, kann die Aufnahmeposition des aktuellen Scans anhand des ermittelten Versatzes korrigiert werden, d.h. auch die geschätzte Position des mobilen Systems selbst. Da kontinuierlich Scans aufgenommen und verarbeitet werden, wird somit die Schätzung der aktuellen Position ständig korrigiert.

Allerdings ist es auch möglich, dass die Überdeckung mit allen gewählten Referenzscans misslingt, da diese über keine ausreichenden Ähnlichkeiten mit dem aktuellen Scan verfügen. In diesem Fall wird der letzte erfolgreich überdeckte Scan, d.h. der Scan, der vor dem aktuellen aufgenommen wurde, in die Karte eingefügt und die Auswahl der Referenzscans wird wiederholt.

## 5 Auswahl der Referenzscans

Es gibt drei Kriterien für die Auswahl der Referenzscans:

**Alter FoR.** Der Wert des FoR eines Scans sollte so klein wie möglich sein, da der FoR so etwas wie das Alter eines Scans angibt. Bei alten Scans kann sich erst ein geringerer Positionsfehler akkumuliert haben als bei jüngeren und daher sind alte Scans bessere Kandidaten, um als Referenz für einen neuen Scan zu dienen.

**Große Überlappung.** Um zwei Scans erfolgreich überdecken zu können, ist es vorteilhaft, wenn deren Scanpunkte eine große Überlappung aufweisen, also über große Strecken dieselben Objekte der Umgebung abbilden. Die Überlappung wird durch die Anwendung eines Projektionsfilters [6] auf die Scanpunkte beider Scans bestimmt.

Das Verhältnis der Anzahl der verbliebenen Punkte zur ursprünglichen Anzahl ist ein gutes Maß für die Überlappung. Da die Anwendung eines Projektionsfilters allerdings eine rechenaufwendige Operation ist (zumindest wenn man sie für jeden neuen Scan auf alle Scans in der Karte durchführt), wurde ein drittes Kriterium zur Reduktion der Menge potentieller Kandidaten als Vorauswahl für Referenzscans eingeführt:

**Räumliche Nähe.** Nur Scans, die in einem Umkreis von weniger als 10 m von dem neuen Scan aufgenommen wurde, kommen als Referenzscans in Frage. Dies ist auch sinnvoll, da die Reichweite des Laserscanners begrenzt ist und es somit unwahrscheinlich ist, von noch weiter voneinander entfernten Aufnahmepositionen Scans zu erhalten, die ausreichend große Gemeinsamkeiten aufweisen.

Die drei Kriterien werden folgendermaßen kombiniert: Zuerst werden nur Scans ausgesucht, die innerhalb des Maximalradius um die aktuelle Position aufgenommen wurden. Dann wird für jede Richtung (aus Sicht des mobilen Systems) der Scan mit der größten Überlappung mit dem aktuellen Scan bestimmt. Diese Scans werden nach ihrem FoR, d.h. nach ihrem Alter, sortiert und dann so lange in der Reihenfolge vom ältesten bis zum jüngsten mit dem aktuellen Scan korreliert, bis eine Überdeckung erfolgreich ist.

## 6 Konsistenz

Immer wenn der Rollstuhl in ein Gebiet zurückkehrt, das bereits kartografiert ist, d.h. wenn er einen Zyklus schließt, wird ein Referenzscan aus dieser Rückkehrregion ausgewählt, da dieser älter als jeder Scan innerhalb des Zyklus ist. Wegen des großen Unterschieds der FoRs des zuletzt im Zyklus verwendeten Referenzscans und des Referenzscans in dem Rückkehrgebiet werden bei der Überdeckung viel größere räumliche Verschiebungen überprüft. Da dabei ein größeres Risiko für eine falsche Zuordnung besteht, muss das Korrelationsergebnis ein sehr eindeutiges Maximum haben, um akzeptiert zu werden. Das verwendete Verfahren zur Scanüberdeckung [2] bestimmt die rotatorische und die zwei translatorischen Verschiebungen nacheinander. Solange immer derselbe Referenzscan verwendet wird, wird es toleriert, falls sich der zweite translatorische Versatz nicht eindeutig bestimmen lässt, z.B. die Verschiebung entlang eines Ganges. Stattdessen wird dabei auf die Odometrie vertraut. Wird aber ein Zyklus geschlossen, muss die Überdeckung in allen drei Dimensionen erfolgreich sein.

Beim Zyklenschluss muss der akkumulierte Fehler entlang der Scans, die innerhalb der Schleife aufgenommen wurden, verteilt werden. Diese Scans haben einen FoR, der größer als der FoR des Referenzscans im Rückkehrgebiet ist und kleiner als der des bisher verwendeten. Der Fehler wird unter diesen Scans in zwei Schritten aufgeteilt: Zuerst wird der Rotationsfehler verteilt, indem die Verdrehung zwischen nacheinander aufgenommenen Scans mit unterschiedlichen FoRs geringfügig geändert wird, wobei ihr relativer translatorischer Versatz erhalten bleibt, wie z.B. beim Geradbiegen einer Büroklammer (vgl. Abb. 2a, b). Der Versatz zwischen Scans mit gleichen FoRs wird nicht geändert. Danach werden die translatorischen Fehler in  $x$ - und  $y$ -Richtung verteilt (vgl. Abb. 2b, c). Wieder bleibt der Versatz zwischen Scans

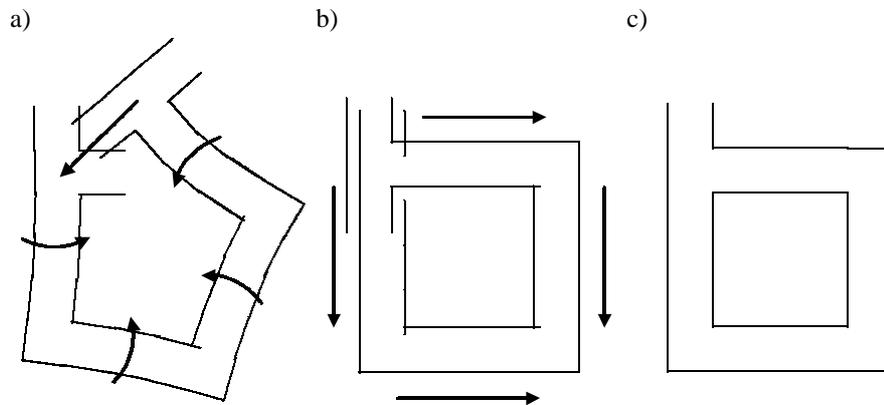


Abbildung 2. Verteilung des Fehlers: a) Rotationsfehler. b) Translationsfehler. c) Ergebnis

mit gleichen FoRs unverändert. Die Korrekturen werden nicht gleichmäßig durchgeführt, stattdessen werden sie durch einen Unsicherheitsfaktor gewichtet, der während der Scankorrelation berechnet und mit den Scans zusammen in der Karte gespeichert wurde. Nach der Fehlerverteilung werden die FoRs aller korrigierten Scans auf den FoR des Anfangs des Zyklus gesetzt, d.h. die Schleife wird nun als konsistent angesehen und daher haben alle Scans denselben FoR. Dadurch wird u.a. auch verhindert, dass die korrigierten lokalen metrischen Relationen später wieder zerstört werden, z.B. während des Schließens einer weiteren Schleife, die den aktuellen Zyklus enthält.

## 7 Ergebnisse

Der auf dem Bremer Autonomen Rollstuhl eingesetzte Pentium III-600 PC ist in der Lage, mehr als 14 Korrekturen der geschätzten Position pro Sekunde zu bestimmen. Da diese hohe Aktualisierungsrate aber eigentlich gar nicht benötigt wird, verbleibt noch ausreichend Rechenleistung für weitere Applikationen auf dem Rollstuhl. Zum Vergleich: Auf einem ähnlich schnellen Computer würde die Methode von Mojaev und Zell [7] nur etwa fünf Korrekturen pro Sekunde durchführen können, obwohl sie auf einen verhältnismäßig kleinen Rotationsfehler von unter  $4^\circ$  seit der letzten Positionskorrektur angewiesen ist, was zumindest der Bremer Autonome Rollstuhl nicht gewährleisten kann.

Der Kartografierungsprozess ist in Abb. 3 dargestellt. Die kartografierte Etage (die zweite Ebene des Mehrzweckhochhauses der Universität Bremen) hat eine Größe von etwa  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ . Der Rollstuhl wurde manuell ein Strecke von etwa 200 m Länge entlang gesteuert. Beginnend in dem in Abb. 3a dargestellten oberen horizontalen Korridor durchfuhr der Rollstuhl die Schleife im Uhrzeigersinn bis er fast wieder die Startposition erreichte. Wie in Abb. 3a zu sehen ist, hatte sich bereits eine kleine Abweichung zwischen den beiden aufeinandertreffenden Gängen akkumuliert. Diese wurde korrigiert, als der Rollstuhl die Einmündung passierte und damit den Kreis schloss. Das Ergebnis ist in Abb. 3b zu sehen. Außerdem ist dargestellt, wie die Erzeugung der Karte fortgesetzt wurde, während der Rollstuhl zur zentralen Kreuzung fuhr, dort nach links einbog und dann dem linken Zyklus im Uhrzeigersinn folgte. Er

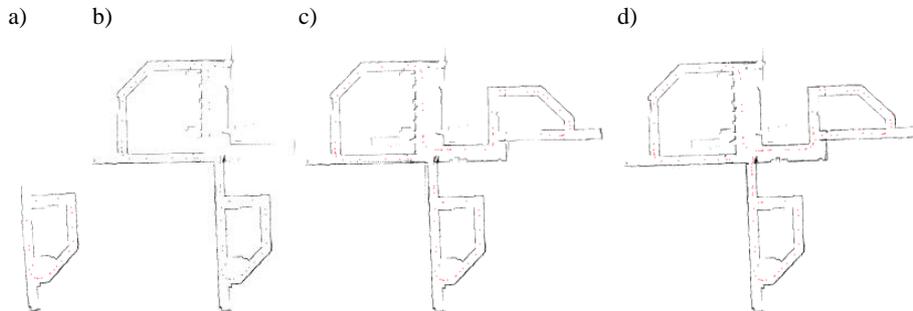


Abbildung 3: Vier Zwischenergebnisse beim Kartografieren einer Etage

kehrte zur zentralen Kreuzung zurück und bog erneut nach links ab, d.h. er fuhr in den rechten Teil der dargestellten Etage. In diesem Moment war es dem Algorithmus nicht möglich, die Rückkehr in bekanntes Gebiet zu bemerken, weil die Überlappung der in der Karte gespeicherten Scans mit dem aktuellen Scan zu klein war. Da der Rollstuhl diesen Bereich in entgegengesetzten Fahrtrichtungen durchquert hat, werden von dem verwendeten 180°-Laserscanner unterschiedliche räumliche Bereiche erfasst. Daher wurden von Abb. 3b zu Abb. 3c keine Korrektur durchgeführt. Die Fahrt wurde durch die kleine Schleife auf der rechten Seite fortgeführt, wieder im Uhrzeigersinn. In Abb. 3d ist das Resultat der Kartografierung dargestellt, nachdem der Rollstuhl zu seiner Startposition zurückgekehrt ist. Dabei wurde der innerhalb der rechten Schleife akkumulierte Fehler ausgeglichen und auch die Abweichung an der zentralen Kreuzung korrigiert. Dies demonstriert auch, dass der Algorithmus das „Zyklus im Zyklus“-Problem lösen kann.

Während der Fahrt hat der Sick-Laserscanner 9403 Scans an den PC geliefert (etwa 30 Scans pro Sekunde). 4208 davon konnten verarbeitet werden, d.h. der Algorithmus war schnell genug, um fast jeden zweiten Scan zu nutzen. Von diesen 4208 wurden 122 in die Karte eingefügt. Nur diese Scans sind in Abb. 3d dargestellt.

Zum besseren Vergleich zeigt Abb. 4 zwei weitere Karten, die von dem Verfahren erzeugt wurden. Sie wurden beide in einer anderen Etage desselben Gebäudes erstellt, allerdings wurden beide entlang unterschiedlicher Fahrstrecken generiert. Abbildung 4a zeigt die beiden unterschiedlichen Routen: Die in Abb. 4b dargestellte Karte wurde entlang der durchgängig gezeichneten Strecke erzeugt, die in Abb. 4c gezeigte entlang der gestrichelten Route. Wie man sieht, unterscheiden sich die Karten nur geringfügig.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag präsentierte einen Ansatz, der aus den Messungen eines 180°-Laserscanners konsistente Karten in Echtzeit erstellt. Während der Kartografierung werden akkumulierte Fehler beim Schließen von Zyklen korrigiert. Das Verfahren ist schnell und robust.

In Zukunft soll die Methode auch für größere Umgebungen eingesetzt werden. Erste Versuche mit einer 2 km langen Fahrt, bei der Teile des Bremer Campus vermessen wurden, sind sehr viel versprechend. Außerdem soll untersucht werden, wie

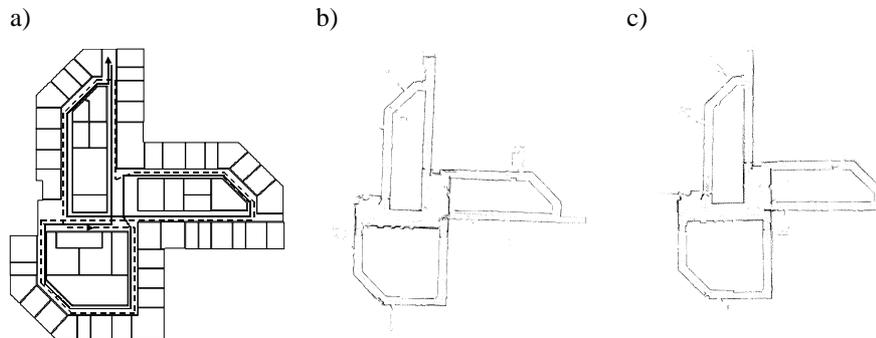


Abbildung 4. Zwei Karten derselben Etage, die entlang verschiedener Routen erzeugt wurden

die Gewichtung bei der Verteilung der akkumulierten Fehler am besten zu wählen ist. Ziel ist dabei, zeitaufwändige Berechnungen zu vermeiden und somit die Echtzeitfähigkeit des Ansatzes beizubehalten.

## Literatur

- [1] Gutmann, J.-S., Nebel, B. (1997). Navigation mobiler Roboter mit Laserscans. In: *Autonome Mobile Systeme 13*. Informatik aktuell. Springer. Berlin, Heidelberg, New York.
- [2] Kollmann, J., Röfer, T. (2000). Echtzeitkartenaufbau mit einem 180°-Laser-Entfernungssensor. In: Dillmann, R., Wörn, H., von Ehr, M. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 2000*. Informatik aktuell. Springer. 121-128.
- [3] Kuipers, B. J., Byun, Y.-T. (1991). A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations. In: *Journal of Robotics and Autonomous Systems* 8. 47-63.
- [4] Lee, W. Y. (1996). *Spatial Semantic Hierarchy for a Physical Robot*. PhD thesis. University of Texas at Austin.
- [5] Leonard, J., Durrant-Whyte, H. F., Cox, I. J. (1990). Dynamic Map Building for an Autonomous Mobile Robot. In: *Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*. 89-95.
- [6] Lu, F., Milios, E. (1997). Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 18:3. 249-275.
- [7] Mojaev, A., Zell, A. (1998). Online-Positionskorrektur für mobile Roboter durch Korrelation lokaler Gitterkarten. In: Wörn, H., Dillmann, R., Henrich, D. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme*. Informatik aktuell. Springer. 93-99.
- [8] Röfer, T., Lankenau, A. (2000). Architecture and Applications of the Bremen Autonomous Wheelchair. In Wang, P. (Ed.): *Information Sciences* 126:1-4. Elsevier Science BV. 1-20.
- [9] Thrun, S., Burgard, W., Fox, D. (2000). A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping. In: *Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation 2000 (ICRA-2000)*.
- [10] Weiß, G., Wetzler, C., von Puttkamer, E. (1994). Keeping Track of Position and Orientation of Moving Indoor Systems by Correlation of Range-Finder Scans. In: *Proc. of the IROS '94*. Munich, Germany. 595-601.