Routenbeschreibung durch Odometrie-Scans

Thomas Röfer

Bremer Institut für Sichere Systeme, TZI, FB3,
Universität Bremen, Postfach 330440, D - 28334 Bremen
roefer@tzi.de

Zusammenfassung In diesem Beitrag wird ein Navigationsverfahren vorgestellt, das auf der Verwendung von distanzgeführten Grundverhalten und der Auswertung der Eigenbewegung eines autonomen mobilen Systems basiert. Es wird gezeigt, wie ein Lehrer einen nur mit minimaler Sensorik ausgestatteten Roboter in die Lage versetzen kann, einmal trainierte Routen autonom abzufahren und mögliche Fehler zu erkennen.

1 Motivation

Die Repräsentation räumlichen Wissens ist ein Forschungsthema in vielen wissenschaftlichen Disziplinen, z. B. in Biologie, Psychologie und Robotik. Im interdisziplinären DFG-Schwerpunktprogramm „Raumkognition" befassen sich Psychologen und Informatiker gemeinsam mit dieser Fragestellung. Die Arbeitsgruppe des Autors arbeitet zum einen innerhalb dieses Kontextes auf dem Gebiet der Navigation und der Erkennung von Landmarken, andererseits ist die verwendete Experimentalplattform der *Bremer Autonome Rollstuhl „Rolland"* (s. Abb. 1a), der in Kooperation mit dem Rollstuhlhersteller *Meyra* entwickelt wurde. Die

a)

b)

Abb. 1. Die verwendeten Plattformen. a) Rolland. b) Nomad 200.

Zielsetzung der Arbeit ist daher die Entwicklung von psychologisch inspirierten Navigationstechniken und ihre Nutzbarmachung für Menschen mit starken körperlichen Behinderungen.

Im Bereich der Rehabilitationsrobotik müssen Anwendungen einfach zu benutzen und einfach zu installieren sein, da weder die behinderten Benutzer noch die Verkäufer und Mechaniker der medizinischen Warenhäuser Experten auf dem Gebiet der Robotik sind. Für die Navigation des Bremer Autonomen Rollstuhls wurde daher die Idee des „Teaching" als geeignete Methode ausgewählt, um dem autonomen System das benötigte räumliche Wissen zu vermitteln. Ein Lehrer, d. h. die Person, die den Rollstuhl ausliefert, lehrt alle möglichen Routen in der Wohnung des späteren Benutzers, die dieser danach einfach abrufen kann. Wie bereits in einigen Veröffentlichungen beschrieben wurde (z. B. Krieg-Brückner *et al.*, 1998), gibt der Lehrer keine direkten Fahrkommandos an das autonome System, sondern beschreibt Routen durch die Aneinanderreihung von vordefinierten distanzgeführten *Grundverhalten*, wie z. B. *Wandverfolgung* oder *Einbiegen-in-eine-Tür*. Während des Lernprozesses sucht das autonome System die Umgebung nach sogenannten Wegmarken ab, die mit dem Wechsel zwischen den Grundverhalten assoziiert werden. Dadurch kann das System eine gelernte Route wiederholen, indem es ein Grundverhalten so lange ausführt, bis es die erwartete Wegmarke findet, die das Umschalten zum nächsten Verhalten auslöst, dieses Grundverhalten dann startet und wiederum auf eine Wegmarke wartet usw. In früheren Arbeiten wurden künstliche visuelle Wegmarken für diesen Zweck verwendet (Röfer und Müller, 1998). Dieser Beitrag wird hingegen auf eine andere Art von Wegmarken eingehen, nämlich den Ecken im zurückgelegten Weg, die durch die Betrachtung von sog. *Odometrie-Scans* ermittelt werden können.

2 Odometrie-Scans

Koppelnavigation (Odometrie) wird in vielen mobilen Robotern eingesetzt. Sie ist einfach zu realisieren, ist aber auch bekannt für ihre Fehleranfälligkeit, da sich bereits kleine Abweichungen zu großen Fehlern akkumulieren können. Daher sollte die Odometrie nur lokal eingesetzt werden, nicht aber für einen globale Selbstlokalisation. Die Grundidee dieses Beitrags ist folgende: Wenn ein Roboter Grundverhalten wie z. B. Wandverfolgung benutzt, spiegelt seine Bewegung die Struktur der Umgebung wider. Mittels der Odometrie kann diese Bewegung aufgezeichnet werden. Die daraus resultierenden Odometrie-Scans repräsentieren somit nicht nur die Eigenbewegung des Roboters, sondern auch die Beschaffenheit der Umgebung. Falls das System dieselbe Strecke ein zweites Mal zurücklegt, wird dies einen ähnlichen Odometrie-Scan erzeugen. Findet man eine Methode, die die Elemente zweier solcher Scans der gleichen Strecke einander zuordnet, hat man eine Selbstlokalisation im Eindimensionalen, d. h. man kann die aktuelle Position innerhalb einer bekannten Route lokalisieren, indem man das Ende des aktuellen Odometrie-Scans in einem früher aufgezeichneten wiederfindet. Daher kann die Eigenbewegung als Repräsentation für Routen genutzt werden.

Im Vergleich zu Methoden, die versuchen, mit Hilfe von z. B. Abstandssensorik eine kartenartige Repräsentation der Umgebung aufzubauen, ist der wesentliche Vorteil von Odometrie-Scans, daß sie immer kontinuierlich sind, da sich das autonome mobile System ebenfalls kontinuierlich bewegt. Das Rauschen in den Sensordaten wird durch die Trägheit des autonomen Systems erheblich gedämpft, da die Entfernungsmessungen der Sensorik erst über den Umweg der Grundverhalten und somit der Eigenbewegung des Systems in die Routenrepräsentation gelangen.

3 Scan-Zuordnung

Die Zuordnung von Odometrie-Scans wird in zwei Schritten durchgeführt: Zuerst wird von beiden Scans abstrahiert und dann werden sie abgeglichen. Die abstrakte Form ist auch die, in der Routenbeschreibungen gespeichert werden (s. Tab. 1).

3.1 Scan-Abstraktion

Die Abstraktion der Bewegungsdaten wurde von Arbeiten zur *qualitativen Routenbeschreibung* inspiriert, z. B. denen von Musto *et al.* (1998). Allerdings sind die in diesem Bericht vorgestellten Repräsentationen nicht qualitativ, sondern bestehen aus Längen und Winkeln. Ausgehend von der Annahme, daß die Navigation in Gebäuden im wesentlichen aus dem Abfahren von Korridoren und dem Abbiegen an Ecken besteht, wurde eine Darstellung gewählt, in der Routen aus *geraden Strecken* bestehen, die in bestimmten *Winkeln* aufeinandertreffen. Eine Routenbeschreibung besteht daher aus einer Folge von Längen und Winkeln, z. B. „800 cm, 89°, 345 cm, -83°, 566 cm“. Für den Abgleich zweier solcher Beschreibungen ist zudem das Wissen um die möglichen Abweichungen von der Route wichtig, d. h. wie weit sich das autonome System beim Umfahren von Hindernissen, z. B. Passanten, von der gelernten Strecke entfernen kann. Daher wird zusätzlich die zur Verfügung stehende *Bewegungsfreiheit* erfaßt, d. h. die Breite eines Ganges abzüglich der Breite des Roboters.

Ein Odometrie-Scan S ist eine Folge von Positionen in einem unbekannten Koordinatensystem, die aus kartesischen x- und y-Werten sowie der Rotation α bestehen. Bei den hier vorgestellten Arbeiten liegt zwischen zwei benachbarten Positionen immer eine Distanz von etwa 20 cm.

$$\begin{aligned} S &= s_0, s_1, \ldots, s_{n-1} \\ \bigwedge_{i=0}^{n-1} s_i &= \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ \alpha_i \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{1}$$

Um feststellen zu können, ob ein Teilstück von S eine Gerade ist, wird eine Funktion benötigt, die eine optimale Gerade durch dieses Segment legt und dann die Abweichungen der s_i von dieser Geraden bestimmt. Hierzu werden zwei

Punkte bestimmt, die die Gerade aufspannen. Diese werden als Mittelwert der s_i der jeweils ersten und zweiten Hälfte des Teilstücks berechnet:

$$
\begin{aligned}
v_{a,b} &= \tfrac{1}{m-a} \sum_{i=a}^{m-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \\
v'_{a,b} &= \tfrac{1}{b-m} \sum_{i=m}^{b-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \\
& \text{wobei } m = \tfrac{b+a}{2} - 1
\end{aligned}
\tag{2}
$$

Danach wird die Summe aller Abweichungen von der durch v und v' laufenden Strecke als Fehler e bestimmt:

$$
e_{a,b} = \frac{1}{b-a} \sqrt{\sum_{i=a}^{b-1} \frac{\left(\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} - v_{a,b} \right) \left(v'_{a,b} - v_{a,b} \right)}{\left| v'_{a,b} - v_{a,b} \right|}} \tag{3}
$$

Ausgehend von einem Anfangspunkt s_a werden immer längere Segmente konstruiert und der Fehler e des jeweiligen Teilstücks bestimmt. Sobald dieser einen Schwellwert von $e_{\max}$ überschreitet, ist ein Punkt s_c bekannt, von dem angenommen wird, daß er nicht mehr Teil der Geraden ist:

$$
\begin{aligned}
c_a &= c'_{a,a+2} \\
& \text{wobei } c'_{a,b} = \begin{cases} b & \text{falls } e_{a,b} > e_{\max} \\ c_{a,b+1} & \text{sonst} \end{cases}
\end{aligned}
\tag{4}
$$

Der Punkt s_c markiert die Obergrenze des Bereichs, in dem sich das Ende der Geraden befindet. Die Untergrenze dieses Bereichs wird bestimmt, indem das letzte Minimum vor s_c in der Fehlerfunktion e gesucht wird. Die Position s_d folgt direkt auf dieses Minimum:

$$
d_{a,b} = \begin{cases} b & \text{falls } e_{a,b} > e_{a,b-1} \leq e_{a,b-2} \\ d_{a,b-1} & \text{sonst} \end{cases} \tag{5}
$$

Das gesuchte Ende des Teilstücks befindet sich zwischen s_d und s_c. Dieses Ende ist gleichzeitig die Ecke zwischen dem Segment und dem darauf folgenden. Es wird angenommen, daß sich die Ecke dort befindet, wo die Ausrichtung α_i dem Mittelwert zwischen den durchschnittlichen Ausrichtungen der beiden angrenzenden Segmente entspricht. Die durchschnittliche Orientierung β eines Teilstücks läßt sich bestimmen als

$$
\beta_{a,b} = \frac{1}{b-a} \sum_{i=a}^{b-1} \alpha_i - \alpha_a \tag{6}
$$

Für das hinter der Ecke befindliche Segment ist dies nicht möglich, da seine Ausdehnung noch nicht bekannt ist. Daher wird ersatzweise die Ausrichtung an der Stelle s_c verwendet. Auf der Basis dieser Annahmen kann das Ende s_b der Geraden bestimmt werden:

$$\begin{aligned} b_a &= b'_{d'} \\ &\quad \text{wobei } c' = c_a \\ &\qquad\quad d' = d_{c'} \\ &\qquad\quad b'_m = \begin{cases} m & \text{falls } |\alpha_m - \alpha_a| \geq \left| \frac{\beta_{a,d'} + \beta_{c',c'+1}}{2} \right| \\ b'_{m+1} & \text{sonst} \end{cases} \end{aligned} \tag{7}$$

Somit erstreckt sich ein Segment über den Bereich $s_a \ldots s_{b_a - 1}$. Das nächste Segment beginnt mit s_{b_a} und kann auf die gleiche Weise berechnet werden. Nachdem die Aufteilung bekannt ist, können die metrischen Längen der Teilstücke und die Winkel zwischen ihnen ganz einfach bestimmt werden. Der einzige Parameter, der die Zerlegung in Teilstücke beeinflußt, ist $e_{\max}$. Dieser wurde in den Experimenten auf den Wert 8 gesetzt. Abbildung 2 zeigt drei Odometrie-Scans mit ihren Abstraktionen.

3.2 Zuordnung der abstrakten Scans

Wenn zwei Scans entlang derselben Route aufgenommen wurden, sollten ihre Abstraktionen sich so ähnlich sein, daß ihre Teilstücke einander zugeordnet werden können. Dieses ermöglicht zwei Anwendungen:

1. Zum einen kann erkannt werden, wenn zwei Abstraktionen nicht dieselbe Strecke repräsentieren, z. B. weil das autonome System sich verfahren hat. Dies ist in Abb. 2 dargestellt, die drei Routenbeschreibungen zeigt: die erste wurde gelernt, die zweite ist eine korrekte und die dritte eine fehlerhafte Wiederholung der ersten. Der Fehler bei der letzten Fahrt wurde bereits kurz nach dem Fehlverhalten (Nichteinbiegen in eine Tür, da diese geschlossen war) erkannt.

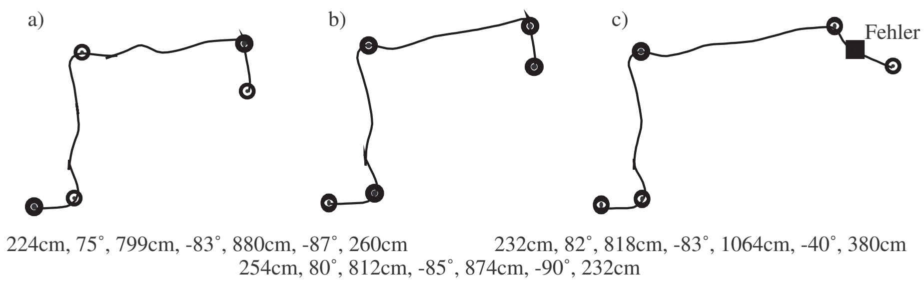

Abb. 2. Drei Odometrie-Scans mit den gefundenen Ecken und ihren Abstraktionen. a) Gelernter Scan. b) Korrekte Wiederholung. c) Fehlerhafte Wiederholung.

2. Zum anderen kann eine Zuordnung genutzt werden, um während der Aufnahme des zweiten Scans die Position des Roboters im ersten zu bestimmen, um z. B. eine mit dieser Position assoziierte Aktion ausführen zu können. Dieser Ansatz bildet die Grundlage für das im nächsten Abschnitt vorgestellte Navigationsverfahren.

In beiden Fällen ist es nicht sinnvoll davon auszugehen, daß beide Scans gleich lang sind, vielmehr wird der aktuelle Scan im allgemeinen kürzer sein als ein früher aufgenommener, da das autonome System die Route noch nicht vollendet hat und insofern auch noch keinen vollständigen Scan aufgenommen haben kann. Daher wird jeweils festgestellt, ob der aktuelle Scan dem Anfang des gespeicherten ähnlich ist. Hierzu werden die beiden Abstraktionen Segment für Segment durchlaufen. Zwei Segmente sind sich ähnlich, wenn sich ihre Längen d_i und d'_i um maximal $d_{\max}$ unterscheiden, außer beim letzten Segment des aktuellen Scans, daß beliebig kurz sein darf, da es noch nicht vollendet ist. $d_{\max}$ setzt sich aus der Bewegungsfreiheit r_i im vorherigen und folgenden Segment, einer fahrtstreckenabhängigen Abschätzung des translatorischen Odometriefehlers f_{trans} (2%) und einer Mindesttoleranz $d_{\min}$ (50 cm) zusammen:

$$d_{\max} = r_{i-1} + r_{i+1} + f_{\text{trans}} d_i + d_{\min} \tag{8}$$

Zwei Winkel γ_i und γ'_i sind sich ähnlich, wenn ihre Differenz nicht größer als $\gamma_{\max}$ ist. $\gamma_{\max}$ ist die Summe aus den Abweichungen, die sich durch die Bewegungsfreiheit in den beiden angrenzenden Segmenten ergeben können, einer winkelabhängigen Abschätzung des rotatorischen Odometriefehlers f_{rot} (10%) und einer Mindesttoleranz $\gamma_{\min}$ (18°):

$$\gamma_{\max} = \arctan \frac{r_{i-1}}{d_{i-1}} + \arctan \frac{r_i}{d_i} + f_{\text{rot}} \gamma_i + \gamma_{\min} \tag{9}$$

4 Navigation

Um entlang einer bekannten Route navigieren zu können, muß man wissen, wo man sich innerhalb der Routenbeschreibung gerade befindet und was man als nächstes zu tun hat. Dies bedeutet, daß die bisher geschilderte Art der Routenbeschreibung nicht ausreichend ist, da die Aktionskomponente fehlt. Daher wird jedes Routenteilstück um die Information ergänzt, nach welcher Distanz vom Beginn des jeweiligen Segments welches Grundverhalten aktiviert wurde. Wenn ein autonomes System einer solchen Routenbeschreibung folgt, d.h. die Route autonome abfährt, baut es sich während der Fahrt eine zweite Beschreibung auf, nämlich die seiner aktuellen Bewegung. Diese wird mit der gespeicherten abgeglichen, wodurch der Roboter weiß, in welchem Routensegment er sich gerade aufhält und wieviel er davon bereits hinter sich gebracht hat. Dadurch kann er an den richtigen Stellen die gelernten Grundverhalten aktivieren und so der Route folgen.

5 Ergebnisse

Das präsentierte Verfahren wurde sowohl auf Rolland als auch – während eines dreiwöchigen Forschungsaufenthalts an der Universität Manchester – auf dem dort vorhandenen *Nomad 200*-Roboter (s. Abb. 1b) implementiert. Die hier vorgestellten Experimente wurden in Manchester durchgeführt. Abbildung 3 zeigt eine Karte der Testumgebung zusammen mit den Routen, die dem Roboter beigebracht wurden. Die längste Route (b–c über den rechten Flügel) maß etwa 142 m. Die erzeugten Repräsentationen der in Abb. 3 dargestellten Routen sind in Tab. 1 zusammengefaßt. Die Karte weist einige Ungenauigkeiten auf, so ist sie in x- und y-Richtung nicht maßstabsgetreu und weicht im Bereich des Lifts stark von der Realität ab, was man auch in den Routenbeschreibungen a–b und b–a in Tab. 1 erkennen kann. Der Roboter war in der Lage, jede dieser Routen mehrfach autonom zu wiederholen. Allerdings war es möglich, ihn von seinem Weg abzubringen, was er aber nach wenigen Metern Fahrt bemerkte.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, daß die Realisierung eines auf Odometriedaten und Grundverhalten basierenden Navigationsverfahrens möglich ist. Für weitere Arbeiten gibt es zwei Ansatzpunkte: Zum einen ist es bisher nur möglich zu erkennen, daß sich der Roboter verfahren hat, es fehlt aber eine Methode, die solche Fehler behebt und das System auf die richtige Route zurückbringt. Zum anderen soll der Aufbau von *Routenkarten* unterstützt werden, indem der Roboter automatisch erkennt, daß ein Bereich einer Route auch Teil einer anderen Route ist und diese dann geeignet kombiniert.

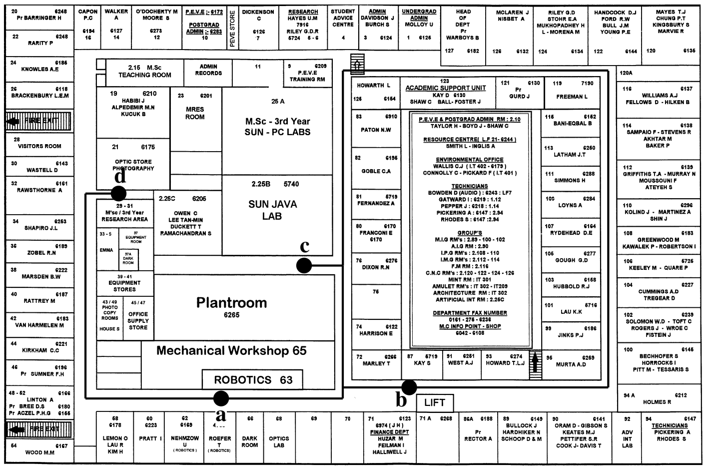

Abb. 3. Schematische Darstellung der gelernten Routen in der zweiten Etage des „Computing Science Building“ der Universität Manchester.

Literatur

B. Krieg-Brückner, T. Röfer, H.-O. Carmesin und R. Müller (1998). A taxonomy of spatial knowledge and its application to the Bremen Autonomous Wheelchair. In: C. Freksa, C. Habel und K. F. Wender (Hrsg.), *Spatial Cognition*, Band 1404 aus *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 373–397. Springer, Berlin.

A. Musto, K. Stein, A. Eisenkolb, K. Schill und W. Brauer (1998). Generalization, segmentation, and classification of qualitative motion data. In: *Proc. Europ. Conf. Artificial Intelligence*.

T. Röfer und R. Müller (1998). Navigation and routemark detection of the Bremen Autonomous Wheelchair. In: T. Lüth, R. Dillmann, P. Dario und H. Wörn (Hrsg.), *Distributed Autonomous Robotics Systems*, 183–192. Springer, Berlin.

Tab. 1. Erzeugte Beschreibungen der Routen aus Abb. 3.

Route	Winkel	Länge/cm	Bew./cm	Verhalten ab cm
a–b		1780	72	links 0
	85°	563	72	rechts 327
	-81°	651	72	
	-98°	205	122	
	93°	430	147	
	-94°	129	97	stop 107
b–a		215	97	links 0
	85°	350	122	
	-82°	241	147	
	87°	588	97	
	77°	635	72	rechts 358
	-71°	1685	72	stop 1641
a–c		1775	72	links 0
	98°	2728	72	gerade 406, rechts 720, links 1763
	92°	402	97	stop 381
c–a		619	72	rechts 0
	82°	2761	72	links 212, rechts 1541, gerade 1979, rechts 2539
	78°	1674	72	stop 1626
a–d		1476	72	rechts 0
	-78°	3976	72	links 338, rechts 3350
	-76°	671	72	stop 624
d–a		870	72	links 0
	96°	4004	72	rechts 341, links 3441
	96°	1309	72	stop 1263
b–c		1963	72	rechts 0, links 1517
	108°	5474	72	rechts 2453, links 4748
	102°	3215	72	rechts 647, links 2895
	98°	2983	72	rechts 539
	83°	516	72	stop 448