

Acht häufig gestellte Fragen an die Mobilrobotik

Kai Oliver Arras, Roland Siegwart

*Institut de Systèmes Robotique
Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL)
<http://dmtwww.epfl.ch/isr/asl>*

1. Warum mobile Robotik?

Die Antwort darauf liegt in der Mobilität. Es fällt leicht, sich menschliche Tätigkeiten auszudenken, die wir aus wirtschaftlichen, arbeitsergonomischen oder technischen Gründen gerne automatisieren würden, deren Umsetzung jedoch Mobilität benötigt. In der Tat stellt die Nutzbarmachung von Mobilität eine der kommenden grundlegenden Fortschritte im Automatisierungsbereich dar. Erste Vorboten dieser Entwicklung sind die führerlosen Transportsysteme (FTS), die in der industriellen Produktion zur Beförderung von Gut eingesetzt werden. Ihre Autonomie ist allerdings beschränkt, da mit optischen oder induktiven Spuren sowohl das Navigationsziel als auch der Weg dorthin vorbestimmt sind. Seit kurzem kommen auch frei navigierende Systeme zum Einsatz, die mit Winkelmessung zu in der Umgebung angebrachten Retroreflektoren ihre Position bestimmen. Alle derartigen Lösungen haben gemeinsam, dass ihre Einsatzumgebung durch Modifikationen aufbereitet werden muss, Modifikationen, die meist kostenintensiv und unflexibel sind.

Die Forschung im Bereich Mobilrobotik beschäftigt sich unter anderem mit Algorithmen und Systemen, die ohne jegliche Umgebungsmodifikation zuverlässiges und präzises Navigieren erlauben und für daraus erwachsende Implikationen praktikable Lösungen findet. Die wichtigsten Implikationen von Mobilität werden im folgenden erläutert.

2. Was bringt Mobilität mit sich?

Aus Sicherheitsgründen werden stationäre Industrieroboter mit eigens dafür vorgesehenen Käfigen oder Schutzfeldeinrichtungen von ihrem Umwelt abgeschirmt. Der Arbeitsraum des Roboters, definiert als alle vom Greifer oder TCP (*tool center point*) erreichbaren Punkte im Raum, bildet dabei die unmittelbare Gefahrenzone, die es nach aussen hin zu schützen gilt. Ausserdem hat man meist absolute Kontrolle über Struktur und Dynamik des Arbeitsraum oder darin befindliche Objekte. All das muss für mobile Systeme fallengelassen werden, da ihr Arbeitsraum je nach Applikation ein Gebäude, eine Produktionshalle oder ein öffentlicher Raum sein kann. Auch bei weitgehendster geometrischer oder prozesshafter Modellierung dieser Arbeitsräume verbleibt immer ein nicht kontrollier- und präzifizierbarer Teil, der einer mathematischen Beschreibung entbehrt. Diese Unvorhersagbarkeit ist der Grund weshalb mobile Roboter Sensoren zur Umgebungswahrnehmung brauchen.



Fig. 1: Soll das Design eines mobilen Roboters sich eher am Menschen (Humanoider Roboter von HONDA) oder an der Aufgabe (Pygmalion, Büroautomatisierung, EPFL) orientieren?

Bei Sensoren fangen die Schwierigkeiten an. Ihre Information ist inhärent unsicher und beim Versuch nützliche Information zu extrahieren, betritt man unweigerlich das Feld der Statistik als Formalismus für Darstellung, Propagation und Reduktion von Unsicherheit. Die Schätztheorie ist aus vielen Gebieten der Mobilrobotik nicht wegzudenken. Wenn nun auf einem untersten Niveau die gesuchten Wahrnehmungsprimitive extrahiert wurden (man denke z.B. an Liniensegmente von Distanzdaten oder Kanten-segmente aus Videobildern), ist es Aufgabe der darauffolgenden Stufen in der Sequenz fortlaufender Abstraktion, daraus nutzbare Information über die Umgebung des Roboters zu erzeugen. Schliesslich kommen Algorithmen zur automatischen Handlungsplanung in Gegenwart von Unsicherheit zum Zuge um den sensorischen Eingang in eine konkrete Aktion umzuwandeln. Ausgehend von dynamischen, unpräzifizierbaren Umgebungen ist man somit bei Problemen der statistischen Mustererkennung, der Bildverarbeitung und Algorithmen der künstlichen Intelligenz angelangt.

Bei genauerer Betrachtung ist die hier vorliegende Mobilität bei Maschinen eigentlich etwas grundlegend neues. Zum allerersten Mal, sind es die Maschinen, die sich frei bewegen und dabei selber über das Wohin und Wie entscheiden müssen. Ein Zusammentreffen zwischen Mensch und Maschine entsteht nicht mehr nur weil der Mensch sich räumlich auf die Maschine zubewegt hat, sondern kann auch zustande kommen, weil es die Maschine war, die von sich aus, auf den Menschen zugegangen ist. Dies wirft viele neue Fragen, z.B. ergonomischer Art auf: Wie muss ein Roboter, der seinen Arbeitsraum mit demjenigen von Menschen teilt, aussehen, damit

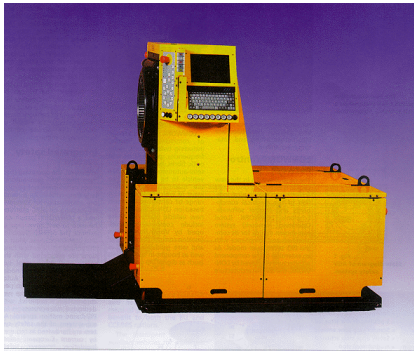


Fig. 2: Neueste Generation eines führerlosen Transportsystems (FTS), das bei VOLVO Motorblöcke transportiert.

er weder Befürchtungen noch allzuviel spielerische Neugierde weckt? Wie muss und darf der Roboter reagieren, wenn er merkt, dass sich Menschen um ihn herum befinden? Wie, wenn er feststellt, dass er Ausgangspunkt von Gefahr ist oder gar Objekt mutwilliger Manipulation? Und wie kann er dies detektieren? All das sind neue Fragen an die Gestaltung von Mensch-Maschine Schnittstellen und die Gebiete von Psychologie und Ergonomie. Studien zur Interaktion von Mensch und Maschine und die bewusste, daraus abgeleitete Gestaltung von Interfaces ist ein Teilbereich der Mobilrobotik.

Eine weitere Implikation von Mobilität ist das Sicherheitsproblem. Mobile Roboter mit einem hohen Grad an Autonomie, werfen neue Fragen über Sicherheit und ihre Zertifizierungsmethoden auf. Davon werden die mechanischen und elektrische Komponenten, die Sensoren, die Systemarchitektur, das Betriebssystem und eventuell auch Teile der Algorithmen betroffen sein. Gesetzliche Richtlinien für die Qualitätssicherung und Erhöhung von Sicherheit durch Massnahmen wie Entwurfssystematik, Redundanz oder Selbstdiagnoseverfahren sind teilweise noch im Aufbau. Es sei schliesslich an die drei Asimov'schen Robotergesetze erinnert, die als Grundlage für die Gestaltung zukünftiger Roboter dienen können: (1) Ein Roboter darf keinen Menschen verletzen oder zulassen, dass einem Menschen Schaden zugefügt wird, (2) Ein Roboter muss den Befehlen eines Menschen gehorchen ausser dies führt zum Widerspruch mit dem ersten Gesetz, (3) Ein Roboter muss seine eigene Existenz schützen, ausser dies führt zum Widerspruch mit dem ersten oder zweiten Gesetz.

3. Was sind die Anwendungen der Mobilrobotik?

Im Gegensatz zu Industrierobotern, stehen zukünftigen Robotern dank ihrer Mobilität eine grosse Palette neuer Anwendungsfelder offen. Viele davon zeichnen sich dadurch aus, dass sie vor allem im Dienstleistungsbereich liegen. Solche Roboter werden Serviceroboter genannt. Die folgende Aufzählung stellt eine Reihe von Anwendungsszenarien dar, die teilweise schon realisiert wurden oder in naher Zukunft umgesetzt werden sollen:



Fig. 3: Helpmate, ein Roboter der in Spitälern Transportaufgaben übernimmt.



Fig. 4: Mobiler Roboter zur Postverteilung (MoPS, ETH Zürich)

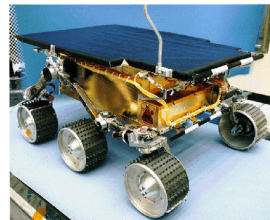


Fig. 5: Links: Sojourner, der erste Roboter auf dem Mars. Rechts: Shrimp, ein neues Konzept eines Mars-Roboters der EPFL.

- Transportaufgaben in der Produktion: Ablösung spurgeführter Vehikel, durch Fahrzeuge, die ohne Umgebungsmodifikation auskommen (Fig.2)
- Transportaufgaben in Hospitälern: Spedition von Medikamenten, Wäsche oder Mahlzeiten (Fig. 3)
- Transportaufgaben in Bürogebäuden: Verteilung von Post und Dokumenten, Hol- und Bringdienste (Fig. 3)
- Reinigungsaufgaben grosser Flächen: Flughäfen, Bahnhöfe oder Fassaden
- Überwachungsaufgaben und Führungen: in Museen oder öffentlichen Räumen
- Halbautomatische Teleinspektion und –manipulationsaufgaben in unwirtlicher oder schlecht zugänglicher Umgebung:
 - Kanalisations- und Lüftungssysteme
 - Havarierte Kernkraftwerke
 - Minenfelder
 - Tiefsee
 - Fremde Planeten (Fig. 5)

Weiterhin sind spezialisierte Anwendungen im Baugewerbe und in der Landwirtschaft zu erwähnen, und schliesslich ihr Einsatz im Entertainmentbereich, als Museumsführer (Fig. 6) oder Spielzeuge (Fig. 7). Bei mehreren der genannten Szenarien (z.B. Putzroboter) wird seit geraumer Zeit versucht, teilweise unter grossem Aufwand, eine Umsetzung voranzutreiben. Trotzdem muss für einige der obigen Anwen-



Fig. 6: Der Sage Roboter führt die Besucher durch das Carnegie Museum of Natural History's in Pittsburgh, USA.



Fig. 7: Aibo von SONY, ein künstlicher Hund mit primitiver Lernfähigkeit.

dungen gesagt werden, dass derzeit ihre Wirtschaftlichkeit noch unbefriedigend ist. Hauptursache sind ein noch herrschender Mangel an Robustheit der Systeme und ein zu hoher Anschaffungspreis. Trotzdem standen Serviceroboter noch nie so nahe vor ihrem breiteren Einsatz. Es dürfte wohl in näherer Zukunft ein Teil unserer Alltagswelt werden, dass wir gelegentlich in Flughäfen, Hospitälern oder Museen von einem autonomen Roboter freundlich aufgefordert werden, ihm den Weg frei zu machen.

Heute spricht man auch von *personal robots*, Roboter, die, wie die *personal computer*, als individuelle Assistenten fungieren sollen: Im Haushalt, im Büro oder in der Freizeit. Insbesondere wird der Einsatz für ältere, pflegebedürftige oder behinderte Menschen diskutiert.

4. Wann kommt der Haushaltsroboter?

Eine der am häufigsten gestellten Fragen an einen Mobilrobotiker, der nach seinem Beruf befragt wird, ist 'Wann kommt endlich der Roboter, der X kann?'. X steht in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter und Zivilstand der fragenden Person für: Putzen, Waschen, Kochen, Hemden bügeln, ein kühles Bier bringen, Saugen, Einkaufen und ähnliches. Die Antwort ist, wenn nüchtern betrachtet, meistens Auslöser für enttäuschte Gesichter: Solcher ein Roboter wird nicht so bald zu erwerben sein.

Der Grund liegt auf der Hand. Erstens ist es fraglich, ob die Automatisierung dieser Aufgaben am technisch und wirtschaftlich sinnvollsten durch einen einzelnen Roboter erfüllt werden kann. Zweitens müsste dieser Roboter eine sehr komplexe, anthropomorphe Gestalt haben, da die Einrichtung eines Haushalts darauf ausgelegt ist. Zudem ist der Haushalt eine sehr unstrukturierte und dynamische Umgebung, die grosse Anforderungen an Sensoren, ihre Auswertung und schritthaltende Umgebungsmodellierung stellt. Ferner verlangen die oben genannten Tätigkeiten ein nicht annähernd erreichtes sensorimotorisches Koordinationsvermögen und schwer festzustellende Wahrnehmungskategorien wie zum Beispiel 'sauber'. Einen Roboter dazubringen, über einen Teller zu wischen, ist eine Sache einfa-

cher sensorgeführter Bahnplanung, ihn jedoch feststellen zu lassen, wann der Teller sauber ist, ist schwieriger als es scheint.

Angesichts der anmassenden Versprechungen der KI-Forschung in den Sechziger Jahren, sei bei Prognosen für die Zukunft Vorsicht geboten. Auch wenn das Stichwort *personal robots* vor allem in den Vereinigten Staaten schon zu mehreren erschwinglichen, kommerziell erhältlichen Produkten geführt hat, handelt es sich in allen Fällen um hoffnungslos einfache Vehikel, die eher einen Liebhabermarkt ansprechen, denn wirkliche Erleichterung bei häuslichen Tätigkeiten bringen. Bis dies erreicht ist, und dann noch zu Preisen, die einen breiten Markt ansprechen, wird noch einige Zeit vergehen. Was bis dahin das Licht der Welt erblicken wird, sind mehr oder wenig ausgereifte Einzellösungen für Staubsaugen, Rasenmähen, Hol-und-Bring Dienste und anderes.

Die Schwierigkeiten beim Erreichen dieser Ziele soll uns jedoch nicht abhalten, Visionen zu entwickeln und zu verfolgen. Es wäre Pessimismus zu behaupten, obige Ziele seien technisch prinzipiell nicht erreichbar. Eine Frage, die sich vor allem auch bei den *personal robots* stellt, ist, ob wir diese Ziele überhaupt erreichen wollen oder sollen.

5. Welche Rolle spielt die Regelungstechnik in der mobilen Robotik?

Ein mobiler Roboter ist erst einmal ein mechatronisches Mehrachsensystem, das der herkömmlichen Positions-, Kraft- oder Geschwindigkeitsregelung seiner Achsen bedarf. In der Praxis lässt sich dies mit einfachen PID-Reglern gut realisieren.

Interessanter ist das Positionsregelungsproblem unter nicht-holonomen Zwangsbedingungen, beispielsweise für das automatische Einparken von Fahrzeugen mit einer auto-ähnlichen Radanordnung. Dort betritt man das Feld der nichtlinearen Regelungstechnik, und je nachdem, ob man Optimalitätskriterien, volle Dynamikmodellierung oder weitergehende Faktoren mitberücksichtigen will, hält diese Fragestellung so manche Knacknuss bereit.

6. Mobilität impliziert Navigation. Was ist Navigation?

Jeder der sich beispielsweise in einer unbekanntem Stadt schon verirrt hat, als Segler auf hoher See seine Position bestimmen musste oder in einer Tiefgarage sein Auto nicht wiederfinden konnte, war unbewusst oder bewusst mit Problemen der Navigation konfrontiert.

Die drei Fragen der Navigation sind 'wo bin ich?', 'wo will ich hin?' und 'wie komme ich dorthin?'.

Die Antwort auf die Frage 'wo bin ich?' nennt man das Lokalisierungsproblem (siehe Kasten), wobei unterschieden wird zwischen lokaler und globaler Lokalisierung. Globale Lokalisierung bedeutet, dass der Roboter in einer ihm bekannten Umgebung ohne

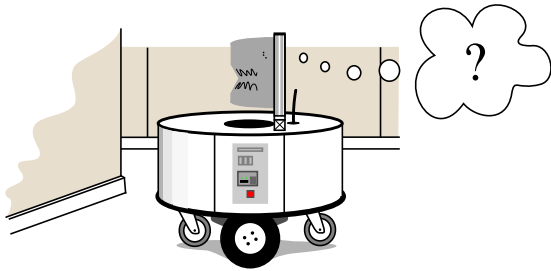


Fig. 8: Die drei Fragen der Navigation: Wo bin ich? - Wo will ich hin? - Wie komme ich dorthin?

Vorwissen über seine Position, herausfinden muss, wo er sich befindet – er ist global verloren. Dies entspricht dem Beispiel eines Touristen, der sich trotz Karte während eines Parisaufenthalts verirrt hat und plötzlich unter dem Eiffelturm steht. Spätestens jetzt weiss er wieder wo er ist. Lokale Lokalisierung bedeutet, dass der Roboter ungefähr weiss, wo er sich befindet – er ist nur lokal verloren – und seine Position über eine einzige sensorische Beobachtungen korrigieren kann.

Bei der Frage ‘wo will ich hin?’ können wiederum lokale und globale Navigationsziele unterschieden werden. Das globale Ziel ist abhängig vom aktuellen Auftrag, den der Roboter im Begriff ist auszuführen. Beispielsweise bei einem Hol- und Bringdienst wird der Bestimmungsort vom Benutzer angegeben. Anschliessend sucht der Roboter in einer topologischen Repräsentation der Einsatzumgebung den optimalen Weg und generiert so einen globalen Plan, der ihn von seiner aktuellen Position dorthin bringt. Unterwegs begegnet er eventuell Personen und unmodellierten Objekten, die ihn zwingen von seinem ursprünglichen Pfad abzuweichen. Deshalb muss er über Algorithmen zur Erzeugung lokaler Zwischenziele verfügen, welche in Trajektorien um die Objekte herum resultieren. Letztere Komponente nennt sich auch Hindernisvermeidung und ist eines der sicherheitskritischsten Teile eines mobilen Systems. Sie sollte mit hoher Abstrakte, möglichst unter Berücksichtigung von Form und Dynamik des Fahrzeugs geschehen und fortlaufend überwacht werden.

Die dritte Frage, ‘wie komme ich dorthin?’, ist damit auch schon fast beantwortet. Es handelt sich um die eben angedeuteten Probleme globaler oder lokaler Pfadplanung zur Bestimmung optimaler Pläne und Trajektorien wenn das Ziel gegeben ist. Unter den globalen Optimalitätskriterien sind minimaler Weg oder maximale Passierwahrscheinlichkeit, Kriterien für lokale Pfade sind beispielsweise maximale Fahrtgeschwindigkeit oder kleinstmögliche Beschleunigungen.

Lokale und globale Lokalisierung, Zielgenerierung und Pfadplanung sind die Hauptbestandteile eines Navigationssystems für autonome mobile Roboter. Sie sind nach wie vor Gegenstand andauernder Forschung, wenn auch schon befriedigend funktionierende Teillösungen existieren.

Bis jetzt wurde davon ausgegangen, dass der Roboter ein a priori bekanntes Modell seiner Einsatzumgebung hat, ohne darauf einzugehen, wie er dazu kommt. Oft wird dies von Hand erzeugt, dabei steht dem Versuch, das Lernen einer unbekanntem Umgebung dem Roboter zu überlassen, nichts im Wege. Diese Aufgabe, genannt *map building*, bildet einen Forschungsschwerpunkt, der nicht so schnell an Aktualität verlieren wird. Die Schwierigkeit des *map building* liegt in einem leicht einsichtlichen Paradox: Um eine Karte einer Umgebung aufzubauen, muss die Roboterposition bekannt sein, da so eine sensorische Beobachtung (z.B. eine aus Kamerabildern extrahierte Tür) an der ihr entsprechenden Position in der Karte aufgenommen werden kann. Wäre die Position des Roboters bezüglich der Karte unbekannt, könnte man der Tür keine korrekte globale Position zuordnen. Allerdings kann der Roboter nur über das Beobachten ihm in ihrer Position bekannter Umgebungsstrukturen (eine andere Tür) seine Position in der Karte bestimmen. Dies ist ein *chicken-and-egg*-Problem, da das eine gegeben sein muss, um das andere zu bestimmen, obwohl letzteres nur über ersteres bekannt sein kann. Das Problem heisst deshalb simultanes Lokalisieren und Kartographieren (*simultaneous localization and map building*) und lässt eine gewisse theoretische und praktische Komplexität nicht missen.

Fig. 9: Roboternavigation in einer Büroumgebung: Der Roboter war im Konferenzraum (oben rechts) und wurde zum Lift (links) gerufen. Unterwegs musste er Personen und offenen Türen ausweichen. Dabei konnte er jederzeit seine Position auf Millimeter genau. Beispieltrajektorie des Roboters Pygmalion am Institut de Systèmes Robotiques and der EPFL.

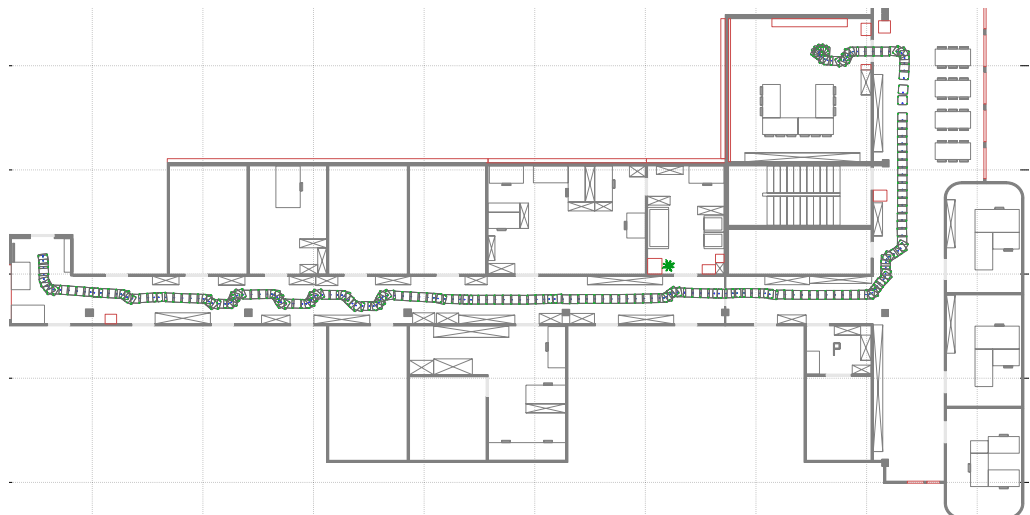




Fig. 10: Von Studenten im Rahmen einer Mechatronikvorlesung der ETH gebauter Roboter der selbständig aus Holzklötzen Türme bauen kann.

7. Was bietet die Mobilrobotik für die Lehre?

Mobile Roboter sind sehr telegen. Im Gegensatz zu vielen Wissenschaftsdisziplinen, wo Resultate sinnlich schwer erfassbar sind, hat die Mobilrobotik keine Probleme, sich nach aussen hin mitzuteilen. Hinzu kommt, dass Roboter nach wie vor den Flair von menschenähnlich belebten Wesen aus Science-fiction Romanen haben. Sie erfreuen sich deshalb einer gewissen Beliebtheit unter Studenten verschiedener Ingenieursdisziplinen, aber auch unter Erwachsenen und Kindern.

Ein Roboter ist, wie jedes andere mechatronische System auch, dabei ein sehr lehrreiches Stück Anschauungsmaterial. Studenten, die im Rahmen einer Vorlesung, eines Studienprojekts oder eines Roboterwettbewerbs mit solchen Systemen in Kontakt kommen, sind mehrfach gefordert: Sowohl mechanische, elektrische oder informatikbezogene Fragestellungen bedürfen einer Antwort. Die gesuchte Lösung kann in den Grundlagen des jeweiligen Gebietes liegen aber auch in den zwei anderen Bereichen. Wenn beispielsweise alles dafür spricht, dass die letzte Änderung algorithmischer Art die Ursache für ein Fehlverhalten des Roboters ist, kann der Fehler genausogut mechanischer oder elektrischer Natur sein. Dieses fortlaufend gleichzeitige Suchen auf mehreren Ebenen fördert nicht nur die Kompetenzen in den Einzelbereichen sondern auch ein erstrebenswertes vernetztes Denken zwischen den Disziplinen. Zudem lernt man, sein eigenes Gebiet nicht immer als das wichtigste zu betrachten.

Spätestens beim Bau ihres ersten eigenen Roboters (Fig. 9) erfahren Studenten auch, dass die Mechatronik die Kombination der Probleme der Mechanik mit den Problemen der Elektrotechnik und den Problemen der Informatik sein kann. Erfolgreiche Projektplanung unter grosser Unsicherheit der Zwischenziele verlangt dann ein ausgeprägtes Antizipationsvermögen. Lob gebührt dem, der alle Probleme in seiner Planung berücksichtigt hatte.

8. Sind unsere Mobilroboter intelligent?

Dieses Kapitel sei an den Schluss gestellt, da es sich auf dünnem Eis befindet, welches zudem vom

Diskurs der Materialisten (Mensch = Maschine) und Phänomenologen (Mensch \neq Maschine) schon schwer belastet ist und auf dem schon so manche Schlacht geschlagen wurde. Lassen wir uns davon aber nicht abhalten.

Die Antwort aus der Sicht des Autors ist 'ja', und dies ist nicht einmal als Metapher zu verstehen. 'Ja', wenn man von der Annahme ausgeht, dass es nur einen Typus von Intelligenz, und nicht mehrere 'Intelligenzen' gibt und wenn man den nachstehenden, kurz ausgeführten Feststellungen folgt.

Intelligenz ist einer der Begriffe, nach denen man nicht mit 'was ist X' fragen kann. X steht zum Beispiel für Bewusstsein, Geist oder Seele. Es ist wenigstens zur Zeit nicht, vielleicht sogar prinzipiell unmöglich, diese Begriffe mit einer Definition befriedigend und widerspruchsfrei einzugrenzen. In der Tat hat weder die KI-Forschung, die Neurobiologie, die kognitiven Psychologie noch die Philosophie darauf befriedigende Antworten gefunden. Stattdessen kann man die einfache Feststellung machen, dass Intelligenz ein ausschliesslich *auf Menschen zugeschnittener* Begriff ist. Bei seiner Verwendung sagen wir, dass eine Person gewisse menschliche Tätigkeiten besser oder schlechter als andere Menschen ausführen kann. Wir kümmern uns dabei nicht so sehr darum, welche neurophysiologischen, kognitiven oder philosophischen Kategorien wir bei der Verwendung des Begriffes bemühen, sprich, was Intelligenz überhaupt ist. Auf jeden Fall meinen wir bei der Aussage 'ein Schwein ist intelligenter als ein Hund', dass ein Schwein besser gewisse *menschliche* kognitive Verhaltensweisen aufzeigt als ein Hund. Wir fragen uns dabei nicht, was diese Aussage aus der Sicht der beiden Tiere bedeutet.

Intelligenz bezeichnet daher das Beherrschen der Vielzahl aller menschlichen Tätigkeiten. Wie weitreichend und aus was genau sich diese Vielzahl zusammensetzt, ist gar nicht von Belang.

Diese Sichtweise geht Hand in Hand mit der Feststellung, dass die Hauptanstrengungen im Bereich Bildverarbeitung, Spracherkennung, sensorgeführte Manipulation, Navigation, Laufroboter, automatisches Schliessen und Entscheiden etc. darauf abzielen, Maschinen menschliche Fähigkeiten zu verleihen. Dies ist nachvollziehbar, da es ja auch meistens um die Automatisierung menschlicher Tätigkeiten geht. Wir können also beobachten, dass ein Grossteil der Forschung im Bereich künstlicher Intelligenz – und die Mobilrobotik zählt in diesem Sinne dazu – im Grunde genommen zum Ziel hat, den Menschen nachzubilden.

Nehmen wir nun einen Taschenrechner zur Hand. Aus obigen Überlegungen folgt, dass dieser Rechner echt intelligent ist. Das heisst er besitzt die gleiche Qualität und Substanz von Intelligenz wie wir, einfach aus der Tatsache heraus, dass er eine menschliche Tätigkeit ausführt, nämlich Rechnen.

Im Grunde stellen diese Gedanken einen erweiterten Turing-Tests dar, der nicht nur auf diejenigen menschlichen Fähigkeiten beschränkt ist, die über

eine Computerterminal vermittelbar sind. Ferner vertritt diese Sichtweise, dass Intelligenz auch eine Frage der gesellschaftlichen Konvention ist. Dabei bestimmt die Konvention, wie das Vokabular aller menschlichen Tätigkeiten zu gewichten ist, wenn es gilt, ein Intelligenzmass zu bestimmen. Um darüber sprechen zu können, sollte Intelligenz einen nicht-willkürlichen Kern enthalten. Diesen kann man auch als anthropologische Konstante festzumachen versuchen, ob davon Maschinen einmal betroffen sein werden, wird jedoch sicherlich wiederum durch Konventionen beeinflusst sein.

Der Leser mag diesen Überlegungen zustimmen oder nicht. Es ist gar nicht so erheblich. Darüber nachzudenken, ob und wann Maschinen intelligent sind, bringt uns zwangsläufig in die Situation, dieselben Gedanken auch beim Menschen anzustellen. Vielleicht kommen wir dann an einem Punkt an, wo der herrschende, nicht unproblematische Intelligenzbegriff bei Menschen neu untersucht wird. Denn welche 'gewisse' Tätigkeiten beim Verwenden des Intelligenzbegriffes als gewichtig betrachtet werden, ist entgegen Verfechtern der sogenannten Intelligenztests, nicht ganz unabhängig von Kultur, Rasse, Geschlecht, Zeit und Interpretation.

Lokale Lokalisierung mit einem Kalmanfilter

Beim Lokalisierungsproblem in der Mobilrobotik geht es darum, die aus den verschiedenen Messsignalen erwerbene Information zu fusionieren um die bestmögliche Schätzung der Position und Orientierung des Roboters zu bekommen. Wenn wir davon ausgehen, dass die involvierten Messfehler hinreichend gut durch Gaussverteilungen beschrieben werden können, ermöglicht es uns die Schätztheorie, eine optimale Positionsschätzung zu bestimmen.

Ein Update der Roboterposition führt über fünf Schritte: *Zustandsprädiktion*, *Beobachtung*, *Messungsprädiktion*, *Matching* und schliesslich *Schätzung*. Sie sind im folgenden kurz dargestellt.

Zustandsprädiktion

Ausgehend vom System

$$\hat{x}(k+1|k) = f(\hat{x}(k|k), \hat{u}(k+1))$$

$$P(k+1|k) = \nabla f_x P(k|k) \nabla f_x^T + \nabla f_u U(k+1) \nabla f_u^T$$

beschrieben durch die ersten beiden Momente x und Kovarianzmatrix P mit dem Zustand $x(k|k) = [x \ y \ \theta]^T$ als die Roboterposition und -orientierung im globalen System $\{W\}$, wird die Zustandsprädiktion berechnet. Dies wird über das kinematische Modell des Fahrzeuges und dem unsicheren Fahrbefehl $\hat{u}(k+1) = [\Delta\hat{s}_l \ \Delta\hat{s}_r]^T, U(k+1)$ für linkes und rechtes Rad berechnet.

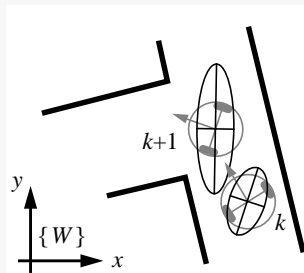


Fig. I: Voraussage der Roboterposition basierend auf dem intern gemessenen Fahrweg (Odometrie). Ein Roboter ist ein stochastisches System, das durch seine ersten zwei Positionsmomente beschrieben werden kann.

Die neue Positionsunsicherheit $P(k+1|k)$, dargestellt durch Konfidenzellipsen in Figur I, ergibt sich aus der vorhergehenden Unsicherheit $P(k|k)$ und der des Fahrbefehls, $U(k+1)$. Als Fehlerpropagationsmethode bedient man sich gewöhnlich einer linearen Approximation durch eine Taylorreihe erster Ordnung.

Beobachtung

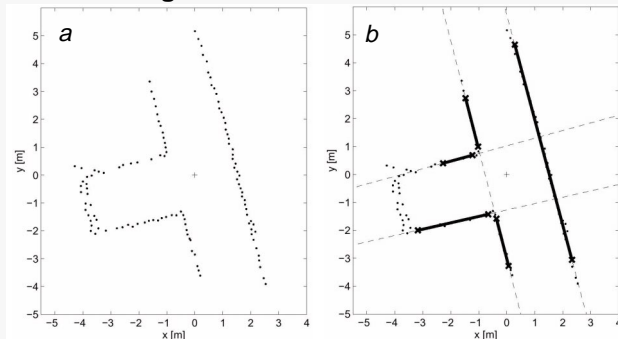


Fig. II Beobachtung: Die Bilder zeigen Rohdaten eines Laserscanners (a), aus denen Liniensegmente extrahiert werden (b). Diese bilden auch die Basis des Umgebungsmodells. Jede Linie wird durch zwei Modellparameter (α, r) und ihre Kovarianzmatrix $R(k+1)$ beschrieben. Pro parameter liegt eine Beobachtung $z(k+1)$ vor.

Im Beobachtungsschritt wird die Umgebung durch die Sensoren des Roboters abgetastet und nutzbare Information extrahiert $z(k+1), R(k+1)$. Die Art der extrahierten Information hängt von der Umgebungsmodellierung ab. Liniensegmente als Modellelement bieten sich an, da sie beispielsweise in Gebäuden häufig anzutreffen sind. In der dargestellten Figur wurden vier Linien extrahiert. Es liegen somit acht Beobachtungen vor, um die drei Zustandsvariablen zu schätzen.

Messungsprädiktion

Basierend auf der Zustandsprädiktion $\hat{x}(k+1|k)$ und $P(k+1|k)$ und einem a priori bekannten Modell der Umgebung werden in diesem Schritt die *zu erwartenden* Messungen bestimmt. Dies entspricht im wesentlichen der Transformation der im Sichtbereich des Roboters liegenden Umgebungsmerkmale p (z.B. Linien) aus dem globalen Koordinatensystem $\{W\}$ in dasjenige des Sensors $\{S\}$.

$$\hat{z}(k+1) = h(p, \hat{x}(k+1|k))$$

Das gleiche wird wiederum mit der Unsicherheit gemacht.

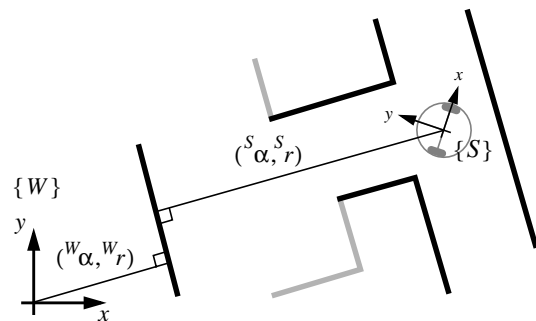


Fig. III: Darstellung der im Plan gespeicherten Linien im Welt- und Sensor-Koordinatensystem.

Matching

In diesem Schritt geht es darum, die Beobachtungen $z(k+1)$ mit den prädizierten Messungen aus dem Modell $\hat{z}(k+1)$ korrekt zu assoziieren. Das Resultat sind Zuordnungspaare (i, j) , wo Beobachtung $z_i(k+1)$ und Prädiktion $\hat{z}_j(k+1)$ das gleiche physikalische Objekt bezeichnen. Daraus werden dann die sogenannten *innovations* bestimmt $v_{ij}(k+1) = z_j(k+1) - \hat{z}_i(k+1)$ und deren Kovarianz $S_{ij}(k+1)$. Das Matching (auch *data association* genannt) ist ein sehr aktuelles Forschungsthema, da es einen grossen Einfluss auf die Robustheit der gesamten Positionsschätzung hat. Eine falsche Assoziation hätte je nach Grösse von $v_{ij}(k+1)$ die Filterdivergenz zur Folge.

Schätzung

Im letzten Schritt wird die a posteriori Schätzung der Position $\hat{x}(k+1|k+1)$ und seiner Unsicherheit $P(k+1|k+1)$ bestimmt. Dies geschieht mittels der Kalman gain matrix

$$W(k+1) = P(k+1|k) \cdot H^T \cdot S^{-1}(k+1)$$

und den Filtergleichungen

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + W(k+1) \cdot v(k+1)$$

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - W(k+1)S(k+1)W(k+1)$$

Der Innovationsvektor $v(k+1)$ und die Jacobische H von $h(\cdot)$ setzen sich dabei aus den entsprechenden Werten der einzelnen Beobachtungen zusammen. Die Lokalisierung mit Kalman filter und Liniensegmenten erlaubt sehr präzise Positionsschätzungen, deren Variabilität in der Praxis wenige Millimeter betragen kann.