

4 Autonomie bei mobilen Robotern

Nachdem im vorhergehenden Kapitel die Begriffe „autonom“ und „Autonomie“ recht oft verwendet wurden, ist es an der Reihe, diese Begriffe und ihre technische Umsetzung etwas näher zu erläutern.

Das Wort „autonom“ setzt sich aus den zwei griechischen Wörtern „autos“ (für selbst) und „nomos“ (für Gesetz) zusammen. Es bedeutet demnach soviel wie „eigengesetzlich handelnd“ und ist mit Begriffen wie Selbstbestimmung, Selbstständigkeit, Unabhängigkeit, Selbstverwaltung oder Entscheidungsfreiheit assoziiert. Im Bereich der Robotik versteht man unter „autonom“, dass der Roboter sich ohne externe Unterstützung in seiner Umgebung orientieren kann und über den Einsatz seiner Funktionen selbstständig entscheidet. Ein autonomer Roboter handelt also nach eigenen Gesetzen, allerdings nach Gesetzen bzw. Regeln, die seiner von Menschen erstellten Software genügen. Diese Software bedient sich externer Sensorik, um auf veränderte Umweltbedingungen reagieren zu können. Denn eine der Hauptaufgaben eines mobilen Roboters ist das selbstständige, also autonome Bewegen, Agieren und Navigieren in bekannten wie auch in unbekanntem Umgebungen.

Zunächst ist jedoch erst einmal festzustellen, dass zwar ein autonomer Roboter in der Regel auch mobil ist, ein mobiles System hingegen noch längst nicht ein autonomer Roboter sein muss. Mobilität bedeutet noch lange nicht Autonomie. So sind Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF, *englisch*: Automated Guided Vehicles, AGV) automatisierte spurgebundene Fahrzeuge mit eigenem Fahrantrieb, die über optische, magnetische oder induktive Leitspuren geführt werden und in teilweise (bekanntem) angepassten Umgebungen arbeiten. Sie müssen zwar mit Sensorsystemen, z. B. zur Personenerkennung und zum Auffahrschutz, wie berührend wirkende sog. „Bumper“ oder berührungslose Laserscanner oder Ultraschalltaster, ausgestattet sein; dennoch sind sie relativ unflexibel und unempfindlich gegenüber Veränderungen der Umwelt – können also nicht als autonom bezeichnet werden.

4.1 Grade der Autonomie

Bezüglich der Autonomie eines Roboters existieren verschiedene Grade bzw. Abstufungen. Mobile Roboter werden oft schon als autonom eingestuft, wenn sich die steuernde Einheit aus Software und Elektronik auf dem Roboter befindet. Der Roboter ist dann solange autonom, wie seine Energieversorgung dies zulässt. Vollständig autonom ist ein Roboter aber erst dann, wenn er auch hinsichtlich seiner Energieversorgung unabhängig ist, z. B. durch Versorgung mit Energie zum Laden seiner Akkus über Solar- oder Brennstoffzellen.

Zur Entwicklung autonomer Systeme, die eine gewisse Eigenständigkeit, beispielsweise bei der Wegfindung bzw. Navigation oder der selbstständigen Erkundung ihrer Umgebung aufweisen, werden zunehmend weitere wissenschaftliche Disziplinen in die Robotik integriert. Der für einen bestimmten Roboter notwendige Grad an Autonomie lässt sich näherungsweise aus den für ihn vorgesehenen Aufgaben ableiten. Werden dem Roboter Anweisungen für die zu erledigenden Aufgaben übermittelt, so hat dies keinen Einfluss

auf den Grad seiner Autonomie. Fernziele der Autonomie sind lernfähige Systeme, die nicht nur einprogrammierte Befehle ausführen, sondern, ähnlich Kindern, selbstständig aus Erfahrungen lernen und ihr Handeln danach bestimmen. Solche Systeme sollten dann in der Lage sein, bereits Gelerntes eigenständig zur Bewältigung neuer Aufgaben einzusetzen. Hier liegt ein Schwerpunkt bei der Integration von Konzepten der Künstlichen Intelligenz als Teilgebiet der Informatik und ihrer biologischen Vorbilder in der Biokybernetik bzw. der Bionik.

4.2 Fähigkeiten und Forderungen

Wie bereits im Abschnitt 3.2 „Mobile Roboter“ sinngemäß festgestellt wurde, ist der Roboter einerseits im Raum mehr oder weniger frei beweglich, so dass er auch in angrenzende Umgebungen vordringen kann. Andererseits soll er nicht nur in abgesperrten Bereichen, sondern oft auch direkt zwischen den Menschen agieren. Da die Menschen natürlich selbst ihre Positionen und zusätzlich die Umgebung durch Umordnen von Gegenständen verändern, muss der Roboter selbstständig seine Umwelt erfassen und daher unter anderen folgende Fähigkeiten aufweisen:

- Orientierung und flexible Navigation in bekannter und fremder Umgebung,
- selbstständige Planung des optimalen Wegs zu einem Ziel,
- Kollisionsvermeidung auf intelligente Weise durch rechtzeitige Hinderniserkennung und Ausweichen oder zumindest Anhalten.

Zusätzlich werden in punkto Sicherheit folgende Erwartungen gestellt:

- Die freie Fahrt darf nicht zu erhöhten Verletzungsgefahren führen und
- der Roboter sollte nur dann stoppen, wenn es wirklich notwendig ist.

Die Umsetzung dieser Forderungen gelingt über folgende Ansätze:

- In der eingelernten Umgebung wird automatisch nach dem besten Weg gesucht,
- das Fahrverhalten wird automatisch an die Umgebungsbedingungen angepasst,
- Kollisionen werden durch vorausschauendes Fahren verhindert,
- Hinzufügen von Orientierungspunkten über Mensch-Maschinen Schnittstellen,
- verschiedene Möglichkeiten, den Weg anzupassen, z. B. durch Bereiche für Langsamfahren.

4.3 Weltmodelle

Die nötige Autonomie und Intelligenz eines solchen Roboters wird von der Informatik mit ihrem Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz geliefert. Mit komplexen Algorithmen lassen sich Aktionsfolgen planen, die auf manchen Gebieten dem Menschen sogar überlegen sind, wie es z. B. im Schach oder bei Platinen-Layouts der Fall ist. Das Problem liegt hier jedoch zunächst in der Beschaffung eines ausreichend präzisen Weltmodells. Weltmodelle für die Navigation mobiler Roboter sind meist zweidimensionale geometrische Karten.

Unter geometrischen Weltmodellen versteht man hier positionsbezogene Modelle. Die Eigenschaften der Umwelt werden jeweils zusammen mit Positionsangaben gespeichert, so dass sie sich in einer zweidimensionalen geometrischen Karte mit Hilfe geeigneter Koordinaten lokalisieren lassen.

Eine wesentliche Komponente im Weltmodell ist die aktuelle Position des Roboters selbst. Folglich befassen sich viele Forschungsarbeiten mit der präzisen Lokalisierung mobiler Roboter. Obwohl hierbei schon Lösungen existieren, ist die Modellierung der Umwelt bei weitem noch nicht präzise und vollständig genug. Ist die Umwelt komplex, dynamisch und nicht explizit für autonome Roboter ausgelegt, so wird das Problem der präzisen Weltmodellierung nahezu unüberwindlich. Da viele Sensoren ungenau sind, lassen sich Gegebenheiten der Umwelt nur über unsichere Sensorik erfassen. Das macht eine präzise Modellierung fast unmöglich. Um die Umwelt präzise und vollständig zu erfassen, müssten gleichzeitig Unmengen von Sensordaten verarbeitet werden. Doch die hierfür benötigte Rechenzeit ist meist nicht vorhanden, weil Echtzeitbedingungen gefordert sind.

Angesichts dieser Problematik verlagert sich der Fokus der Anstrengungen in der autonomen mobilen Robotik vom möglichst präzisen Modell der Umwelt auf andere Bereiche wie Datenselektion oder Vereinfachung des Weltmodells. Statt perfekte Pläne zu berechnen, muss die Steuerung in anderem Sinn intelligent sein. Sie soll wesentliche Sensordaten und Berechnungen von weniger wichtigen trennen und optimierte Lösungen gegen zeitgerechte Reaktionen und sicheres Verhalten abwägen. Die Planungsalgorithmen müssen sich daher mit unvollständigen und unsicheren Weltmodellen begnügen und nach vereinfachten Regeln ad hoc schnelle und effektive Entscheidungen treffen können. Die Zeitkriterien für Planungsverfahren sind sehr unterschiedlich: Manche Aufgaben sind streng an Echtzeitforderungen geknüpft, andere in dieser Hinsicht unkritisch. Manche Verfahren benötigen sofort nur die wichtigsten aktuellen Sensordaten, andere hingegen erfordern möglichst vollständige Datenaufzeichnungen.

4.4 Sensoren

Sensoren dienen zur Erfassung von Eigenschaften der Umgebung und des Roboters selbst. Daher kann man Sensoren danach klassifizieren, ob sie interne oder externe Signale erfassen. Interne Sensoren ermitteln Eigenschaften an Bord des Roboters und versorgen die Steuerungssoftware mit Daten über den Roboterzustand, z. B. den Ladezustand der Batterien. Externe Sensoren hingegen liefern Messwerte aus der Umgebung, wie Daten über Art und Entfernung von Hindernissen. Zu den wichtigsten Eigenschaften seiner Umwelt zählt für mobile Roboter die befahrbare Fläche, also der Raum, in dem sich der Roboter ohne Kollisionen und andere Risiken bewegen kann. Hierbei genügt es meist, die Bewegung des Roboters nur zweidimensional zu betrachten. Um sich in der Umgebung orientieren zu können, benötigt der Roboter jedoch Sensordaten zum Abgleich mit seinem Weltmodell. Sensoren messen hierbei nur sehr selten die gefragte Größe direkt, sondern ermitteln sie anhand einer damit zusammenhängenden physikalischen Eigenschaft. So werden z. B. Abstände basierend auf den Ausbreitungs- und Reflektionseigenschaften von Ultraschallwellen, Infrarot- oder Laserlicht ermittelt. Dies führt bei Objekten, die nicht die passenden Reflektionseigenschaften aufweisen, zu systematischen Messfehlern. Um Fehl-

messungen zu erkennen und zu korrigieren, werden oft Sensoren redundant eingesetzt, d. h., mehrere Sensoren messen die gleichen Größen nach unterschiedlichen Methoden. Insbesondere bei der Erstellung und Aktualisierung eines Weltmodells können Messfehler und daraus resultierende widersprüchliche Sensordaten zu erheblichen Problemen führen.

Als Sensoren kommen Kameras, Triangulationssensoren (nach dem Prinzip der Lasertriangulation), Laserscanner oder Ultraschall- und Infrarot-Entfernungsmessgeräte in Frage. Auch Hallgeber zur Messung von Magnetfeldern und Temperatursensoren (Temperaturfühler) zur Erfassung von Temperaturen und Wärmequellen können je nach Anwendung erforderlich sein. Nachfolgend seien einige typische bei autonomen Robotern eingesetzte Sensoren aufgelistet:

- *Abstandssensoren*: Als Signalträger kommen hier nur Schall/Ultraschall und elektromagnetische Wellen verschiedener Frequenzen, also einschließlich Licht, in Frage, da nur diese die Möglichkeit einer kontaktlosen Übertragung bieten.
- *Bumper*: Dies sind unmittelbare (taktile, berührende) Kollisionssensoren, die durch den direkten Kontakt mit einem Hindernis aktiviert werden, also Kontaktsensoren.
- *Kameras*: Eine Kamera ist ein sehr vielseitiger Sensor. Der Einfall des Lichts wird aus verschiedenen Richtungen erfasst, so dass ein zwei- oder dreidimensionales Bild der Umwelt entsteht.
- Sensoren für „Dead-Reckoning“ (Odometrie – Wegmessung eines mobilen Systems anhand der Daten seines Vortriebsystems).

Mit Geschwindigkeitsüberwachung, Hindernis- und Abgrunderkennung wird die freie Fahrt für mobile Roboter generell möglich. Kritisch zu betrachten ist auch die Auswertung der Sensordaten. Da Sensorwerte immer mit Fehlern behaftet sind, ist ihre Auswertung im Regelfall kompliziert. Man muss mit Messfehlern aller Art rechnen, wie:

- Artefakten, also völlige Falschwerte,
- Rauschen (unterschiedliche Werte bei mehrmaliger Messung der gleichen Größe),
- Fehlern durch Bauteil-Toleranzen,
- systematischen Messfehlern durch Umgebungseinflüsse, z. B. durch Störlicht. Die Folge sind widersprüchliche Messwerte.

Genauere Beschreibungen diverser Sensoren finden sich im Kapitel 14 „Sensoren und Aktoren für Roboter“.

4.5 Navigation

Jede Aktivität des mobilen Roboters benötigt ein Ziel. Ist es nicht fest vorgegeben, so muss er selbst Routinen zur Generierung eines Ziels nach übergeordneten Gesichtspunkten durchführen. Daher ist die Navigation eine der wichtigsten Aufgaben für einen mobilen Roboter. Er sollte jederzeit fähig sein, sich zu einem vorgesehenen Zielort zu bewegen. Der Zielort kann auf unterschiedliche Weise beschrieben werden: Er könnte einfach durch ein Koordinatenpaar definiert sein oder durch Koordinaten plus Ausrichtung des Roboters, eine Richtung, eine Position relativ zu einem anderen Ort oder Objekt.

Es könnte auch eine Landmarke, ein Raum oder sonst etwas anderes gemeint sein. Wie für den Roboter, so stellt sich auch für Menschen oft das Problem, eine Route zu planen und danach entsprechend zu navigieren. Die sich dabei stellenden zentralen Fragen sind stets:

- Wo befinde ich mich im Moment?
- Wohin will ich? (die Frage nach dem Ziel) und
- Auf welchem Weg oder welchen Wegen komme ich dorthin?

Die zuvor genannten verschiedenen Beschreibungen eines Zielpunkts führen auch zu verschiedenen Lösungsansätzen für die Navigation des Roboters. Daher stellt sich das Problem der Orientierung auf unterschiedlichen Ebenen, denn die Navigation kann zerlegt werden in eine lokale und eine globale Navigation.

Bei der *lokalen Orientierung* wird ein lokales Navigationsziel angestrebt. Dazu muss der mobile Roboter innerhalb seines Segments, also in unmittelbarer Umgebung bzw. innerhalb der Reichweite seiner Sensoren, genau wissen, wo sich seine momentane Position befindet und wie seine derzeitige Ausrichtung (Drehwinkel) ist. Um das zu ermöglichen, muss der Roboter zumindest Teile seines Segments kennen und auch wiedererkennen. Die Orientierung kann dann anhand der erfassten Umgebungsstruktur und einem Vergleich mit dem bekannten Grundriss des Segments erfolgen. Damit lassen sich erkannte Teile der Umwelt einordnen und mögliche Verbindungswege zu anderen Segmenten bestimmen. Wichtig ist auch, die Passierbarkeit von Wegen in unmittelbarer Umgebung zu beurteilen. Wege können z. B. blockiert oder eng sein und der Roboter muss wissen, ob und wie er diese Stellen passieren kann.

Die *globale Orientierung* ist als Navigation „im Groben“ zu verstehen. Der mobile Roboter muss zunächst ermitteln, in welchem Abschnitt seines erweiterten Arbeitsraums er sich befindet, also in welchem Zimmer einer Etage, in welcher Etage des Hauses usw. Dazu bedarf es einer Vorinformation über den Aufbau und die Gliederung des globalen Arbeitsraums, die dem Roboter zuvor per Programm übermittelt wird und ihm hilft, Umwege und Sackgassen auf dem Weg zum Ziel zu vermeiden. Die globale Orientierung kann z. B. dadurch unterstützt werden, dass beim Wechsel von einem Segment in ein anderes gezielte Informationen durch RFID-Systeme (radio-frequency identification) oder durch Barcodes bzw. QR-Codes übermittelt werden. Diese globale Orientierung bezieht sich meist auf ein Weltmodell und ist nur lose an die Sensorik gekoppelt, da hier auch entfernte, nicht von den Sensoren erfassbare Regionen betrachtet werden müssen.

4.6 Steuerungsarchitekturen autonomer Roboter

Unter Steuerungsarchitektur versteht man generell die Softwarestruktur eines Steuerungssystems. Dabei sollte die Steuerungsstruktur für mobile Roboter auf deren spezielle Anforderungen zugeschnitten sein. Hierzu gehören die Berücksichtigung der Probleme durch ungenaue Sensorik und Aktorik sowie durch Zeitbedingungen bei den Interaktionen mit der realen Umwelt. Zur Realisierung des autonomen Verhaltens existieren folgende verschiedene Ansätze für die Steuerungsarchitektur: