

Contents

1 Geschicht	1
1.1 Industrieroboter	1
1.2 Serviceroboter	1
2 Software-Architekturen für mobile Robotersysteme	2
2.1 Probleme und Anforderungen	2
2.1.1 Umgebung mobiler Roboter	2
2.1.2 Roboterkontroll-Architekturen	2
2.1.3 Anforderungen an das Kontrollsyste eines autonomen Roboters	3
2.2 Mögliche Modelle	3
2.2.1 Klassisches Modell - der funktionale Ansatz	3
2.2.2 Verhaltensbasiertes Modell	4
2.2.3 Hybrider Ansatz	4
2.2.4 Probabilistische Robotik	5
2.2.5 Subsumption-Architektur in Bezug auf die Anforderungen des Robotersteuerungssystems	5
2.3 Robot Operating System (ROS)	6
2.3.1 Design Prinzipien	6
2.3.2 Asynchrone Kommunikation	7
2.3.3 Sychrone Kommunikation	7
3 Lokalisation autonomer mobiler Robotersysteme	8
3.1 Varianten der Selbstlokalisierung	8
3.2 Relative Lokalisierung versus Absolute Lokalisierung	9
3.3 Transformation von Koordinatensystemen lokale ↔ globale	9
3.4 Karten für statistische und dynamische Umgebungen	10
3.4.1 Mapping Methoden	10
3.4.2 Arten von Modellen	11
3.4.3 Kontinuierliche Metrische Karten	12
3.4.4 Grid Maps - Rasterkarten	12
3.4.5 Adaptive Unterteilung	12
3.4.6 Topologische Karten	13
3.4.7 Hybrid Maps	14
3.5 Passive und Aktive Selbstlokalisierung	14
3.6 Landmarken	15
4 Fortbewegung, Lokalisierungsalgorithmen	16
4.1 Relative Lokalisierung	16
4.1.1 Dead Reckoning	16
4.1.2 Odometrie	17
4.1.3 2D-Scanmatching	18
4.1.4 Weitere Lokalisierungsalgorithmen zur globalen Lokalisierung	19

5 Navigation	20
5.1 Bekanntes vs. unbekanntes Terrain	20
5.2 Navigation in unbekanntem Terrain	20
5.2.1 Konturverfolgung	20
5.2.2 Bug1 Algorithmus	21
5.2.3 Bug2-Algorithmus	21
5.2.4 Bug3-Algorithmus	22
5.2.5 Labyrinthe	22
5.3 Pfadplanung für mobile Roboter in bekanntem Terrain	24
5.3.1 Konfigurationsraum	24
5.4 Algorithmen und Methoden	25
5.4.1 Dijkstra	26
5.4.2 A*	26
5.4.3 Wegsuche mit dem Sichtgraph-Algorithmus	27
5.4.4 Voronoi-Diagramme	29
5.4.5 Navigation in einer Rasterkarte	29
5.4.6 Potentialfeld Methode	30
6 Probabilistische Methoden und Kartierungen	31
6.1 Problemstellung	31
6.2 Modellierung von Unsicherheit	31
6.3 Umgebungsmodellierung mit Occupancy Grids	31
6.3.1 Satz von Bayes	31
6.3.2 Evidence Grids (Beweisraster)	31
6.4 Bayes-Filter Algorithmus	32
6.4.1 Algorithmus	32
6.4.2 Beispiel Aufgabenstellung	33
6.4.3 Beispiel Rechnung	34
6.5 Markov Lokalisierung	34
6.6 Monte Carlo Lokalisierung	34
6.6.1 Partikelmengen	35
6.7 Kalman-Filter	36
6.7.1 Definition	36
6.7.2 Vorgehen	36
6.7.3 Einschränkungen	36
6.8 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)	37
6.8.1 Landmarkenbasiertes SLAM Problem	37
6.8.2 Problemstellung	37
6.8.3 Funktionsweise	38
6.8.4 Hinzunahme neuer Landmarken	38
6.8.5 Aufbau eines SLAM-Graphen	39
6.8.6 Varianten von SLAM	39
6.8.7 Bayesian Netzwerk für landmarkenbasiertes SLAM	40
7 Schwarmrobotik und Evolutionäre Robotik	41
7.1 Schwärme und deren Verhalten in der Natur	41
7.1.1 Computersimulation von Schwärmen - Algorithmus von Craig Reynolds	41
7.2 Schwarmintelligenz	41
7.3 Multi Robot Systems	42
7.4 Ameisenalgorithmen	42
7.4.1 Optimaler Weg bei futtersbeschaffenden Ameisen	42

7.4.2	Ant Colony Optimization Algorithm	43
7.4.3	Traveling Salesman Problem	44
8	Locomotion	46
8.1	Fortbewegungsarten	46
8.2	Laufroboter	46
8.2.1	Vorteile von Laufrobotern	46
8.2.2	Nachteile von Laufrobotern	46
8.2.3	Freiheitsgrade für Roboterbeine	46
8.2.4	Freiheitsgrade für Zweibeiner	47
8.2.5	Laufverhalten	47
8.2.6	Statisch stabiles Gehen	47
8.2.7	Zero Moment Point und Pseudo-Dynamisches Gehen	48
8.2.8	Steuerungssoftware	48
8.3	Radroboter	49
8.3.1	Stabilität von Radrobotern	49
8.4	Kinematik mobiler Radroboter	49
8.4.1	Holonomische Bewegung	49
8.4.2	Kinematik und Positionsveränderung für Zweiradandtrieb	50
8.4.3	Fortbewegung bei Omnidirektionalem Antrieb	50
9	Industrierobotik	51
9.1	Industrieroboter	51
9.1.1	Einsatz	51
9.1.2	Trends	51
9.2	Bauform und Komponenten	51
9.3	Freiheitsgrade	52
9.3.1	Definition	52
9.4	Bewegungsachsen	52
9.4.1	Rotatorisch	52
9.4.2	Translatorisch	53
9.4.3	Rotationsgelenk	53
9.4.4	Torsionsgelenk	53
9.4.5	Revolvergelenk	54
9.4.6	Kugelgelenk	54
9.5	Arbeitsraum	54
9.6	Grundtypen von Industrierobotern	55
9.6.1	Portalroboter	55
9.6.2	Horizontal-Knickarmroboter	55
9.6.3	Vertikal-Knickarmroboter	55
9.6.4	Parallele Roboter	55
9.6.5	Leichtbauroboter	56
9.7	Effektoren	56
9.7.1	Endeffektoren	56
9.7.2	Greifersysteme	56
9.7.3	Greifplanung	56
9.7.4	Greifprinzipien	57
9.8	Antrieb	57
9.8.1	Antriebsarten	57
9.9	Sensor	57
9.9.1	Interne Sensoren	57

9.9.2 Externe Sensoren	58
9.10 Kinematik	58
9.10.1 Kinematikmodul	58
9.10.2 Steuerung und Regelung von Industrierobotern	58
9.10.3 Punkt-zu-Punkt Bewegung	59
9.10.4 Überschleifen	59
9.10.5 Programmierung	60
9.11 Kinetic - Berechnungen	61
9.11.1 Rotationsmatrizen	61
9.11.2 Vorwärts Transformation	63
9.11.3 Modifizierte Denavit-Hartenbert Transformation	63
9.11.4 Inverses kinematisches Problem	63
9.11.5 Bestimmung der Achswinkel anhand der Position und Orientierung des Endeffektors	64
9.11.6 Koordinatensysteme	65
9.12 Safety	65
9.13 Roboterprogrammierungen	65
9.13.1 Programmierung in RAPID	65
9.13.2 Syntax	66
9.13.3 Bewegungsfunktionen	68
9.13.4 World Zones	69
9.13.5 Bildschirmein- und -ausgabe	69
9.13.6 Zeitmessung	70
9.13.7 Bewegung relativ	70

10 Prüfungsfragen (Schiedermeier)

71

1 Geschichte

1.1 Industrieroboter

Nach Definition der VDI-Richtlinie 2860 sind Industrieroboter universell einsetzbare Bewegungsmaschinen mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkel frei programmierbar und sensorgesteuert sind.

Zeichen sich aus durch:

- Schnelligkeit
- Genauigkeit
- Robustheit
- Traglast

Einsatzgebiete sind unter anderen **Schweißen, Kleben, Schneiden, Lackieren**.

Zunehmend **kollaborative** Roboter, Cobots die mit Menschen **ohne Schutzeinrichtungen** im Produktionsprozess interagieren und diese **Wahrnehmen um Verletzungen zu vermeiden**.

1.2 Serviceroboter

Ein **Serviceroboter** ist eine **frei programmierbare Bewegungseinrichtung**, die **teil- oder vollautomatisch** Dienstleistungen verrichten.

Dienstleistungen sind dabei Tätigkeiten, die **nicht der direkten industriellen Erzeugung** von Sachgütern, sondern Verrichtung von **Leistungen für Menschen und Einrichtungen** dienen. Sie werden in zwei Klassen eingeteilt:

Professionel Einsatzbereiche sind beispielsweise:

- Rettung
- Landwirtschaft
- Medizin

Privat Einsatzbereiche sind beispielsweise:

- Rasenmäher
- Pfleger

2 Software-Architekturen für mobile Robotersysteme

Unter einem Roboter verstehen wir eine frei programmierbare Maschine, die auf Basis von Umgebungssensordaten in geschlossener Regelung in Umgebungen agiert, die zur Zeit der Programmierung nicht genau bekannt und/oder dynamisch und oder nicht vollständig erfassbar sind.

– Joachim Herzberg, *Mobile Roboter*

2.1 Probleme und Anforderungen

2.1.1 Umgebung mobiler Roboter

Bei **mobilen Robotern** ist die Umgebung im Detail **nicht bekannt und generell nicht kontrollierbar**. Alle Aktionen sind **von der aktuellen Umgebung abhängig** und **Details sind nur während der Ausführung** der Aktion bekannt.

Mobile Roboter müssen in einer geschlossen Regelung:

1. Erfassung der Umgebung mit Sensoren
2. Auswertung der Daten
3. Planung der Aktionen
4. Umsetzung der Aktionen mittels Koordination der Aktuatoren

2.1.2 Roboterkontroll-Architekturen

Herausforderungen

Robotersysteme bestehen im allgemeinen aus den Gebieten **Wahrnehmung, Planung und Handlung**. Die Herausforderungen die hierdurch entstehen sind:

- Erfassung und Auswertung der Sensorwerte
- Planung der Pfade
- Vermeidung von Hindernissen
- Ausführung komplexer Algorithmen in langen Zeitzyklen

Probleme bei der Software-Erstellung zur Roboterkontrolle

Roboter sind **eingebettete Systeme**, die in einem geschlossenen Regelkreis die Sensorströme in **Echtzeit verarbeiten**. Dadurch entstehen diese Probleme:

- Unterschiedliche Aufgaben \Rightarrow Unterschiedliche Zeitzyklen
- Unterschiedlicher Zeitskalen \Rightarrow Abbildung des Kontroll- und Datenflusses in der Architektur ist nicht standardisiert
- Für etliche algorithmische Teilprobleme sind **keine effizienten Verfahren** bekannt
- **Prozessorkapazität ist begrenzt**

2.1.3 Anforderungen an das Kontrollsysteem eines autonomen Roboters

Robustheit Die Umgebung des Systems kann sich ständig ändern. Auf diese muss der Roboter sinnvoll reagieren, obwohl die verwendeten Modelle der Umgebung ungenau ist.

Unterschiedliche Ziele Roboter verfolgt zu einem Zeitpunkt eventuell in Konflikt stehende Ziele.
z.B.: Ziel ansteuern und Hinderniss ausweichen

Sensorwerte von mehreren Sensoren Sensordaten können verrauscht sein und damit fehlerhafte und inkonsiste Messwerte liefern. z.B. außerhalb seines Bereichs und dies nicht überprüfen kann.

Erweiterbarkeit Bei neuen Sensoren, sollte diese leicht in das Programm integriert werden können.

2.2 Mögliche Modelle

2.2.1 Klassisches Modell - der funktionale Ansatz

Das **klassische Modell** wird auch als hierarchisches Modell oder funktionales Modell bezeichnet. Ist ein Top-Down Ansatz, besteht aus drei Abstraktionsebenen.

Dieses Modell hat unterschiedliche Namen:

- Sense-Think-Act-Cycle (STAC)
- Sense-Model-Plan-Act (SMPA)

Sense: Vorverarbeitung der Daten

Model: Konstruktion oder Aktualisierung eines Weltmodells

Plan: Alle Entscheidungen basieren auf dem Weltmodell

Act: Ausführung der Aktionen und Befehle

Zyklus wird ständig wiederholt \Rightarrow wenn alle Ebenen richtig funktionieren resultiert daraus ein intelligentes Verhalten und die Erfüllung der Aufgabe.

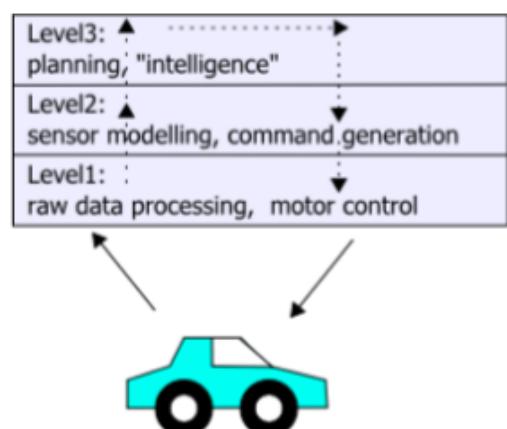


Figure 2.1: Oben nach unten: Planer, Navigator, Pilot

Nachteile:

- **Sequentieller Ansatz** ⇒ lange Kontrollzykluszeit
- **Gesamtsystem anfällig** ⇒ Modulfehler führt zum scheitern des Gesamtsystems
- Weltmodell muss alle zur Planung notwendigen Informationen enthalten
- Planer hat nur Zugriff auf das Weltmodell ⇒ Während Planung kann sich Umwelt verändert haben

2.2.2 Verhaltensbasiertes Modell

Grundlegender Gedanke Intelligentes Verhalten wird nicht durch komplexe, monolithische Kontrollstrukturen erzeugt, sondern durch das Zusammenführen der richtigen einfachen Verhalten und deren Interaktion.

Definition

- Engere Verbindung zwischen **Wahrnehmung** und **Aktion**
- Jede **Roboterfunktionalität** wird in einem **Behavior** gekapselt
- Alle **Behaviors** werden **parallel ausgeführt**
- Jedes Behavior Modul operiert unabhängig von den anderen
- Alle Behaviors können auf alle Fahrzeugsensoren zugreifen und gewissermaßen die Aktuatoren ansteuern.

2.2.3 Hybrider Ansatz

Nutzt die Vorteile der **Subsumption Architektur** und der **SMPA- Architektur**. Der verhaltensbasierte Anteil ist nicht geeignet, auf längere Sicht zielgerichtet Aktionen zu koordinieren ⇒ SMPA-Anteil

Die **Handlungsplanung** arbeitet auf hoher, strategischer Stufe in langen Zeitzyklen.

Die **mittlere Kontrollebene** hat die taktische Aufgabe, die jeweils **nächste Aktion aus dem Plan auszusuchen**, zu instanzieren und auf die Ebene der Verhaltensbausteine zu zerlegen. Des weiteren muss die Rückmeldung von der Aktionsüberwachung interpretieren und entscheiden ob eine Aktion erfolgreich abgeschlossen ist. ⇒ entscheiden, ob die Handlungsplanung einen anderen Plan erstellen muss.

Die **reaktive Aktionsüberwachung** enthält die Verhaltensbausteine auf operativer Ebene, die in schellen Zeitzyklen die physische Roboteraktion anstoßen und überwachen

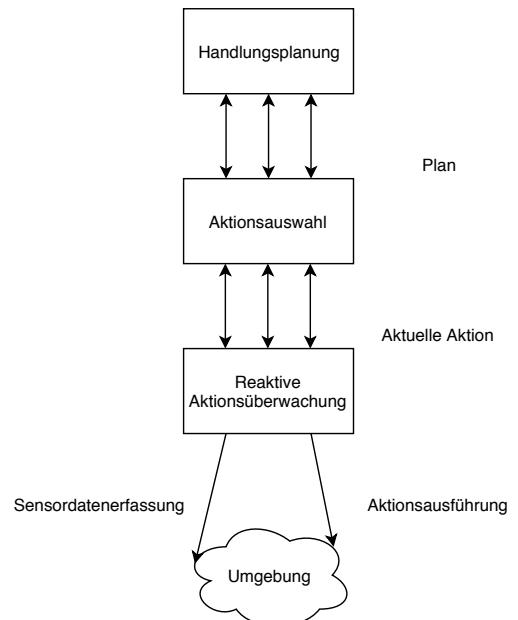


Figure 2.2: Schema des Hybridmodell

Kritik

- Mittlere Komponente benötigt den größten konzeptuellen und programmiertechnischen Aufwand
- Das mittlere Teilproblem ist deutlich komplexer als die beiden anderen

2.2.4 Probabilistische Robotik

Berücksichtigung der **Unsicherheit der Wahrnehmung und der Aktionen**.

Schlüsselidee: Information in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten repräsentieren. Eine **Lokalisierung** der Roboter wird unter Verwendung von Wahrscheinlichkeitstheorie oder einer Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Aussage über die Umgebung treffen.

Probabilistische Wahrnehmung: wenn man Sensorwerte schätzen kann, dann kann man mit Wahrscheinlichkeitstheorie eine Aussage über die Umgebung treffen.

Probabilistisches Handeln: aufgrund der Unsicherheit über die Umgebung ist auch das Handeln mit Unsicherheit behaftet. Mit probabilistischen Ansätzen besteht die Möglichkeit Entscheidungen trotz Unsicherheit zu treffen.

Vorteil: probabilistische Verfahren können auch mit weniger präzisen Umgebungsmodellen angewandt werden.

Nachteil: weniger effizient wegen komplexer Berechnungen, Approximation erforderlich

2.2.5 Subsumption-Architektur in Bezug auf die Anforderungen des Robotersteuerungssystems

Robustheit: Wenn einige Steuerungsmodule ausfallen, arbeiten bei der Subsumption-Architektur die restlichen Schichten einwandfrei \Rightarrow **eingeschränktes, aber sinnvolles Verhalten möglich**

Unterschiedliche Ziele

- Mehrere Teilsituationen können verschiedene Verhaltenselemente sinnvoll machen, die sich widersprechen können.
- Die Wichtigkeit einer Handlung hängt vom Kontext ab, d.h. höhere Ziele können niedrigere Ziele ersetzen.
- Alle zu einem Zeitpunkt möglichen Verhaltenselemente werden parallel bearbeitet.
- Das **resultierende Verhalten wird in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen dynamisch bestimmt**
- Das Gesamtergebnis hängt nicht von einer übergeordneten Instanz ab

Sensorwerte von mehreren Sensoren

- Der Roboter muss auch bei inkonsistenten Informationen eine Entscheidung fällen
- Die Subsumption-Architektur sieht keine zentrale Verarbeitung und Speichung der Umwelt-daten vor

- Jedes Modul reagiert nur auf die Daten einzelner Sensoren, es muss **kein konsistentes Abbild der Umwelt erschaffen werden**

Erweiterbarkeit Das bestehende Verhalten kann jederzeit durch Hinzufügen weiterer Schichten um komplexere Funktionen erweitert werden

2.3 Robot Operating System (ROS)

ROS bietet eine Standard für Roboterkontrollsoftware. **DAS Architektschema für Roboterkontrollsoftware** gibt es nicht ⇒ Unterstützung der Softwareentwicklung durch Middleware wie ROS.

Zweck: soll die Entwicklung von Software für Roboter vereinfachen und wiederkehrende Aufgaben standardisieren

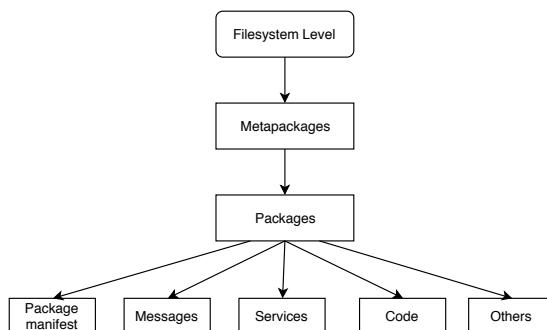


Figure 2.3: Filesystem, das ROS zugrunde liegt

2.3.1 Design Prinzipien

In ROS kommunizieren die verschiedenen Nodes über den Master, dabei können die verschiedenen Nodes und der Master auf verschiedenen Rechnern laufen. Einige Bedingung ist, dass die Nodes den Master erreichen können.

Master Dient zur Koordinierung und Kommunikation von Nodes. Er ist damit der wichtigste Knoten. Er bietet eine Serviceregistry für synchrone Kommunikation zwischen Nodes und ist Message Broker für asynchronen Nachrichtenaustausch.

Node Wird in ROS als Package publiziert. Ein Node muss sich beim Master registrieren und kann über ihn mit anderen Nodes kommunizieren. Ein Node ist in ROS ein Prozess mit einer bestimmten Funktionalität. Ist ein Node fehlerhaft hat dies in der Regel wenig Auswirkungen auf andere Nodes.

Parameter Server und Konfigurationsdateien

Der Parameter Server auf dem Master enthält **eine Art Wörterbuch für Werte**. Alle Ressourcen wie Nodes, Messages oder Parameter existieren darin in einer hierarchischen Namensstruktur. In ihm werden z.B.: die Konfigurationsdateien gespeichert.

2.3.2 Asynchrone Kommunikation

Der asynchrone Nachrichtenaustausch funktioniert über das **Publish-Subscribe** Pattern. Hierbei kann ein Node kann entweder Nachrichten an den Master publiziere, dafür benutzt er ein bestimmtes Topic. Er kann jedoch auch verschiedene Topics abbonieren um Nachrichten zu empfangen sobald diese publiziert werden. Ein Node hat dabei kein Limit an Topics die er nutzen kann. Ein Topic ist hierbei ein einfacher String. Die Kommunikation findet dabei über TCP/IP Socket stat.

```

Node2                                         Master
|           register publisher
|----- topic: "farbsensor" ----->
|
|
Node1                                         Master
|           subscribe
|----- topic: "farbsensor" ----->
|
|
Node2                                         Master
|           publish
|-- topic: "farbsensor" message: { r: 0.1, g: 0.1, b: 0.1 } -->
|
|
Node1                                         Master
|<- topic: "farbsensor" message: { r: 0.1, g: 0.1, b: 0.1 } --- |

```

Die Nachrichten (**Messages**) die dabei übertragen werden können sind streng typisiert. Eine Message kann **andere Messages, oder Felder von Messages** enthalten. Die möglichen Datentypen sind hierbei die primitiven Typen **int, float und bool**.

2.3.3 Sychrone Kommunikation

Die synchrone Kommunikation wird durch Services gelöst. Ein Node kann beim Master einen Service registrieren. Ein zweiter Node kann daraufhin einen Request schicken und erhält von der entsprechenden Node eine Response. Dies ist besonders geeignet für RMI und einmalige Anfragen.

```

Node1                                         Master
|           register service
|----- service: "farbsensor" ----->
|
|
Node2                                         Master
|           call service
|----- getfarbe ----->
|
|
Node1                                         Master
|<----- getfarbe -----
|----- { r: 0.1, g: 0.1, b: 0.1 } ----->
|
|
Node2                                         Master
|           response
|----- { r: 0.1, g: 0.1, b: 0.1 } ----->

```

3 Lokalisation autonomer mobiler Robotersysteme

Lokalisation Ermitteln der aktuellen Position des Roboters.

Pfadplanung oder Navigation beantwortet die Fragen **Wie gelange ich dorthin?** Bewegungsplanung oder Pfadplanung bedeutet die Berechnung der Fahrroute und der daraus abgeleiteten Bahn vom aktuellen Punkt zum Zielpunkt.

Unterscheidung zwischen unbekannter und bekannter Umgebung

Kartenerstellung, Mapping oder Umgebungsmodellierung Die Auswertung der vom Roboter mittels Sensoren erfassten Daten der Umgebung mit dem Ziel, ein Umgebungsmodell zu erzeugen oder zu vervollständigen.

⇒ Großes Problem

⇒ Selbstlokalisierung und Kartenerstellung bedingen sich gegenseitig.

3.1 Varianten der Selbstlokalisierung

Lokale Selbstlokalisierung (position tracking)

- Die Startposition des Roboters ist **ungefähr bekannt**.
- **Relative** Selbstlokalisierung
- Neuberechnung der Position mithilfe der Sensordaten bei Bewegung.
- Bezugspunkt ist der Startpunkt.
- **Methoden** sind Odometrie und Trägheitsnavigation

Globale Selbstlokalisierung

- Die Startposition ist unbekannt.
- **absolute Positionierung**
- Lokalisation durch Sensordaten und erkennen von **signifikanten** Umgebungsmerkmalen
- **Methode** ist Triangulation

Kidnapped Robot Problem

1. Die Position des Roboters ist anfangs bekannt
2. Der Roboter wird willkürlich mit temporär deaktivierten Sensoren an eine beliebige andere Position versetzt, ohne darüber informiert zu werden.

3. Auch dann muss das Verfahren robust die Position wiederfinden, zunächst muss der Roboter dies erkennen und sich dann relokalisieren
4. Es muss eine erneute globale Lokalisierung durchgeführt werden

3.2 Relative Lokalisierung versus Absolute Lokalisierung

Relative Lokalisierung

Auch: lokale, inkrementelle Lokalisierung oder 'tracking'.

Relativ zu einer Startpose wird sukzessiv die Änderung der Pose an discreten, aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ermittelt und integriert.

Absolute Lokalisierung

Auch: globale Lokalisierung

Die Pose wird in Bezug auf ein externes Bezugssystem ermittelt, z.B. einer Karte oder einem globalen Koordinatensystem

Ziel:

Bestimme oder schätze die Position und Orientierung des Roboters in seiner Umgebung basieren auf

- der Eigenbewegung
- durch Messungen der relativen Position zu unterscheidbaren Objekten in der Umgebung in Roboterkoordinaten (Ultraschall, Laser, Kamera)

3.3 Transformation von Koordinatensystemen lokale \leftrightarrow globale

Kinematik Die Kinematik ist die Lehre der Beschreibung von Bewegungen von Punkten im Raum. Dabei werden die Größen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung betrachtet. Die Kinematik ist ein Teilgebiet der Mechanik.

Kinematische Robotermodell Zweiradbetriebener Kreisförmiger Roboter und Bewegung in der Ebene.

Lokales Koordinatensystem An den Roboter verbunden mit Ursprung in der Mitte der Antriebsachse. Die x-Achse zeigt in Richtung des Roboterfront.

Roboterposition im globalen Koordinatensystem

Globale Koordinaten $M(x_M, y_M)$ und der Drehung von x' im Bezug zu x als Winkel θ .

$$\Rightarrow \text{Pose } p \text{ mit } p = \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \\ \theta \end{pmatrix}$$

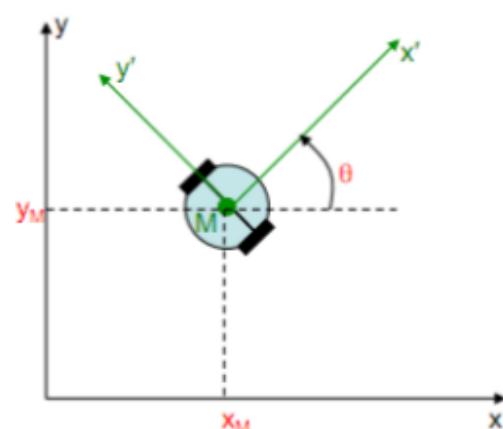


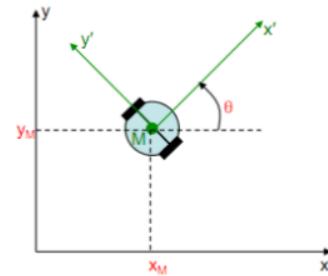
Figure 3.1

Transformation von lokalen in globale Koordinaten

$$R_\alpha \mapsto \begin{pmatrix} \sin \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_g = R_\theta \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} - \vec{m}$$

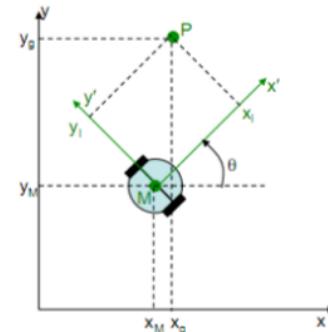


Transformation von globalen in lokale Koordinaten

$$R_\alpha \mapsto \begin{pmatrix} \sin \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}$$

$$\vec{t}_l = R_{-\theta} \cdot \left(\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} - \vec{m} \right)$$



3.4 Karten für statistische und dynamische Umgebungen

Generell gilt: **Karten** sollen eine explizite Repräsentation des Raumes sein.

Diese sind auf die Sensorik des Roboters zugeschnitten und nicht vorrangig für den menschlichen Betrachter bestimmt.

Statische Umgebungen

Basierend auf der Annahme, dass sich zwar der Zustand des Roboters innerhalb der Umgebung, nicht jedoch die Umgebung selbst ändert.

⇒ Karte spiegelt die wirkliche Umgebung wieder.

Dynamische Umgebungen

Objekte können ihre Lage oder ihren Zustand ändern. Dazu gehört das verschwinden und auftauchen von bekannten oder unbekannten Objekten.

"Lernende" Karten sind ein fundamentales Problem in der mobilen Robotik

3.4.1 Mapping Methoden

Durch Koordinaten-Transformation kann zwischen den verschiedenen Referenz-Frames beliebig gewechselt werden.

Weltzentriert

Die Pose aller Objekte werden in der Umgebung in Bezug auf ein festes Koordinatensystem repräsentiert.

Dies kann Indoor eine Zimmerecke sein und Outdoor ein globales Koordinatensystem wie Längen- und Breitengrade, i.d.R. nutzen von **WGRS**(World Geographic Reference System)

Roboterzentriert

Wird gebraucht um bspw. Kollisionen zu vermeiden. Diese nimmt als Bezugspunkt den Roboter.

3.4.2 Arten von Modellen

Die wichtigste Form von Umgebungsmodellen für mobile Roboter sind Umgebungskarten. Die folgende Ausführungen beziehen sich auf geeignet Karten für **mobile, autonome Landfahrzeuge**

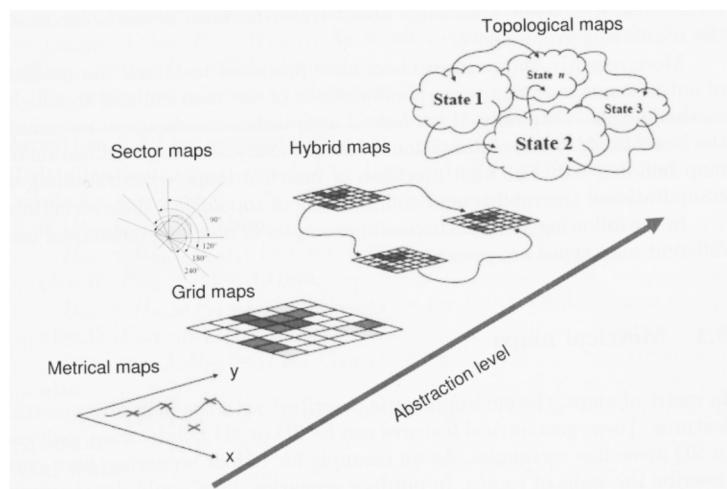


Figure 3.2: Die verschiedenen Umgebungsmodelle

Arten von Umgebungsmodellen

Kontinuierliche metrische Karten

2D oder 3D bei denen jedes Objekt eine Koordinate erhält.

Diskrete metrische Karten, Grid Maps

2D oder 3D bei der Raum in gleichmäßige oder ungleichmäßige Teile aufgeteilt wird. Ein Objekt wird mit einem dieser Teile assoziiert.

Hybrid Maps

z.B. Die Kontinuierliche metrische Anordnung von Grid Maps.

Topologische Modelle

Nur 2D bei der die Beziehung der Objekte zueinander im Vordergrund steht.

3.4.3 Kontinuierliche Metrische Karten

Metrische Lokalisierung beruht auf Ultraschall oder Laserscannern, bei der eine exakte Beschreibung der Umgebung in 2D oder 3D möglich ist.

Vorteil: detailliertes Bild der Umgebung

Nachteil: große, unstrukturierte Datenmengen erschweren die Pfadplanung

3.4.4 Grid Maps - Rasterkarten

Die Umwelt wird in gleichmäßiges Raster oder Grid zerlegt. Wobei für jede Zelle mitgeführt wird ob sie belegt ist oder nicht. Dabei können je nach Modell unterschiedliche Werte verwendet werden.

- frei und belegt
- frei, belegt und Mischbelegung
- Belegungswahrscheinlichkeit

Notwendige Informationen sind z.B.:

- x, y als Koordinaten (Zeile, Spalte) einer Zelle
- Sensordaten des Roboters
- Belegungswert

Dabei sind die Zellen unabhängig voneinander. Je höher die Messgenauigkeit der Sensoren ist, desto kleiner können die Rasterelemente gewählt werden.

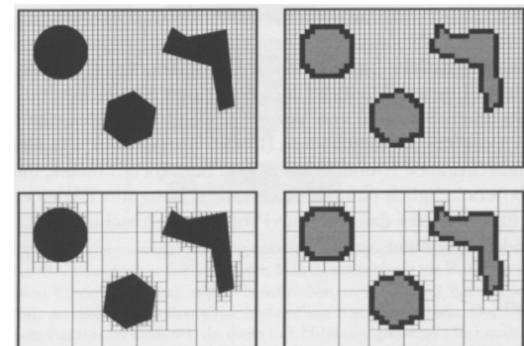


Figure 3.3: oben: gleichmäßiges Gitter,
unten: adaptives Gitter

Gleichmäßige Gitterstruktur vs. Adaptiver Gitterstruktur

Für eine kompakte Notation können Grid Maps adaptive Unterteilt werden und im 2-dimensionalen Raum mit Quadtrees im 3-dimensionalen mit Octtrees gespeichert werden.

3.4.5 Adaptive Unterteilung

1. Ausgangszustand: Rechteck mit Hindernissen
2. Fläche wird unterteilt in 4 Rechtecke gleicher Größe
3. Jedes Rechteck wird rekursiv wieder in 4 Rechtecke unterteilt \Rightarrow Quadtree
4. Attributierung der Knoten:

Frei: Rechteck enthält keinen Teil eines Hindernisses

Belegt: Rechteck ist vollständig von Hindernis belegt

Gemischt: Rechteck enthält nur Teile eines Hindernisses

5. Nur gemischte Knoten werden weiter unterteilt

Vorteile

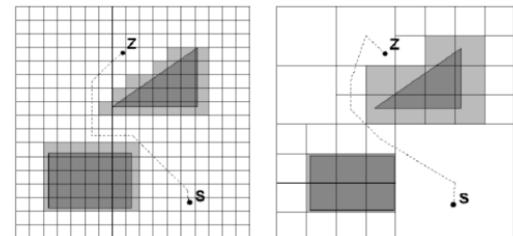
Schnell und leicht feststellbar, ob Punkt in einem Hindernis liegt

Nachteile

- Konturen der Objekte und der Freiraum zwischen ihnen wird unpräzise repräsentiert
- Um die Datenfülle zu reduzieren, wird das Raster zu grob gewählt und dadurch ein möglicher Weg durch Mischpixel versperrt

Weiterer Verwendungszweck

Neben der reinen Lokalisierung können die Karten auch dazu verwendet werden eine Fahrspur (Trakektorie) zu berechnen.



Weitere Beispiele für Umgebungskarten

- Laserscan Karten
- Bildbasierte Karten

3.4.6 Topologische Karten

Bedingt geeignet zur Lokalisation, Haupteinsatzgebiet ist die Pfadplanung.

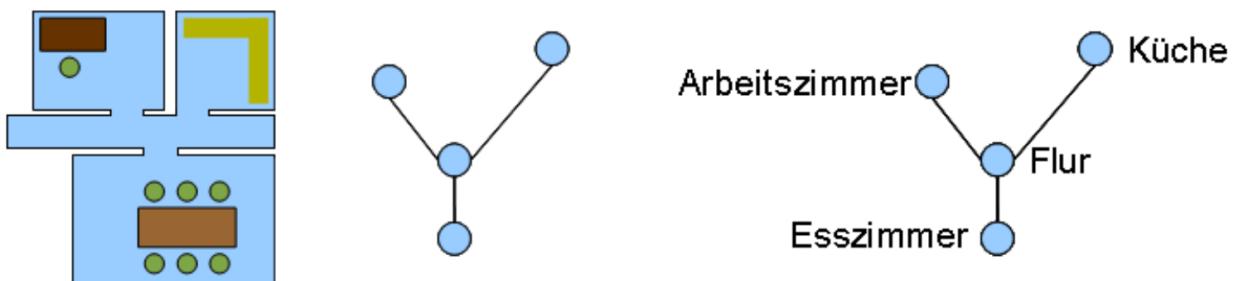


Figure 3.4

- Modelle bilden einen **Graphen**
- **Knoten** entsprechen Orten oder Bereichen der Umgebung
- Beziehungen zwischen den Orten werden durch **Kanten** modelliert.
- Zwei Knoten sind durch eine Kante verbunden, wenn sie unmittelbar voneinander erreichbar sind.
- **Gewichte**: Maß für die Länge der Wege
- Ist die Länge der jeweiligen Wegstücke bekannt, lässt sich der kürzeste Weg finden.

Vorteile

- Kompaktheit
- Gute Skalierbarkeit für welträumige Umgebungen.
- Es gibt viele schnelle Algorithmen auf Graphen, die gut zur Pfadplanung eingesetzt werden können

Nachteil Relevante Umgebungsmerkmale werden verdeckt. Landmarken werden schwerer erkannt.

3.4.7 Hybrid Maps

- Kombinieren metrische und topologische Ansätze
- Ermöglichen Lokalisation und Kantenerstellung mit hoher Präzision
- Erhalten die Kompaktheit der topologischen Ansätze

Abstraktions-basierter Ansatz

- Basis: konstruieren einer metrischen Karte der Umgebung
- ⇒ aufbau einer kompakten topologischen Repräsentation
- **Vorteil** Effizient Planung eines Pfads zu einem gegebenen Ziel aufgrund der Abstraktion.
- Die zugrunde liegende metrische Karte wird für Relokalisation und Hindernisvermeidung benötigt.

3.5 Passive und Aktive Selbstlokalisierung

Passive Verfahren

- bestimmen oder schätzen die Roboterposition mittels aktueller Sensorinformationen
- beeinflussen **nicht** die Bewegung und Orientierung des Roboters
- Lokalisierungsmodul beobachtet nur die Roboteroperationen
- Roboter bewegt sich zufällig hin und her bzw. führt die zu erledigende Aufgabe durch

Aktive Verfahren

- besitzen vollständige oder teilweise Kontrolle über die Bewegungen des Roboters und Ausrichtung der Sensoren
- fährt gezielt bestimmte Orte an um Mehrdeutigkeiten zwischen mehreren Orten aufzulösen

3.6 Landmarken

Definition

Als Landmarken werden **eindeutig identifizierbare Charakteristiken der Umwelt** bezeichnet, die von entsprechenden Sensoren erkannt werden können.

Landmarke

- ihre Position im Weltmodell ist bekannt
- sichtbar von unterschiedlichen Positionen aus
- erkennbar unter verschiedenen Belichtungen und Blickwinkeln
- relative Position bestimmbar
- stationär, oder dem Navigationsmechanismus muss die Bewegung bekannt sein

Vorteil Navigation erfolgt mit der Umwelt selbst und nicht mittels errechneter Daten

Natürliche Landmarken

- Werden nicht zum Zweck der Positionsbestimmung aufgestellt, können aber dafür verwendet werden
- Grundsätzlich Passiv

Künstliche Landmarken

Markante Objekte, eigens zum Zweck der Positionsbestimmung in der Umgebung installiert.

4 Fortbewegung, Lokalisierungsalgorithmen

4.1 Relative Lokalisierung

4.1.1 Dead Reckoning

- **Koppelnavigation oder Dead Reckoning** ursprünglich in der Nautik verwendet
- Mathematisches Verfahren - **Vorwärtsskinematik** - zur Positionsbestimmung
- Ausgehend von einer Startposition ist es dem Navigator möglich, seine **aktuelle Position zu berechnen** aufgrund der **zurückliegenden bekannten Kurs- und Geschwindigkeitswerte**

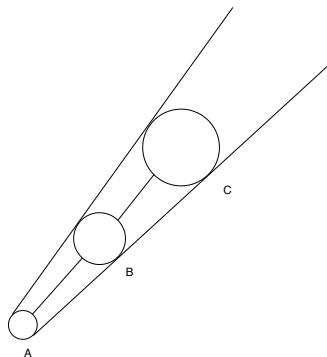


Figure 4.1

- A sei ein gegebener Ausgangspunkt
- Radius wird angegeben der zur Abweichung proportional ist, bsp. hier 0,5m.
- Der Radius spiegelt die mit der Zeit kumulierte Ungenauigkeit wieder
- Eine mögliche Roboterposition ist dann innerhalb des Sektors gegeben der durch die Linien eingegrenzt wird

Vorteile

- Einfache Implementierung
- Leichte Interpretation der Daten
- Unkomplizierte Bedienung
- Passable Kurzstreckengenauigkeit

Nachteile

- Startposition muss bekannt sein
- Genauigkeit nimmt mit zunehmender Länge der befahrenen Strecke drastisch ab

4.1.2 Odometrie

Odometrie ist die Wissenschaft der Positionsbestimmung eines Fahrzeugs durch die Beobachtung seiner Räder.

Grundlegendes Verfahren

- Sensoren an Rädern messen Drehbewegung
- **Relative Positionsbestimmung:** Die **Bestimmung der Position** erfolgt ausgehend von einer bekannten Position durch Berechnung des zurückgelegten Weges und anhand von Daten über den Roboter selbst.
- Es wird Inkrementalgebern die Anzahl n der Radumdrehungen zwischen zwei Messpunkten gezählt. Aus dem bekannten Radumfang wird die wegdifferenz berechnet mit:

$$\Delta = \Pi \times d \times n$$

- **Ausrichtung** kann durch differentiale Odometrie erfolgen: es werden bsw. die unterschiedlichen Entfernungsmessungen gemessen, die die linken und rechten Räder zurückgelegt haben.

Vorteile

- kostengünstig
- hohe Abtastraten
- passable Kurzzeitgenauigkeit

Fehlerquellen

- Fehlerhafte Messung des Raddurchmessers
- Raddurchmesser nicht gleich, Unrundheit des Rades

Fehlerberücksichtigung

- Die **Fehler** fließen in die Positions differenz ein, werden zur letzten bekannten Position hinzugefügt und **summieren sich mit jedem Messschritt**
- Fehlerellipse wächst mit zurückgelegtem Weg
- Odometrie als alleiniges Verfahren nur für kurze Strecken geeignet
- Fehler lassen sich bei geringen Geschwindigkeiten und geringer Beschleunigung reduzieren

4.1.3 2D-Scanmatching

- Ausgangslage sind zwei Scans, ein Scan M (**Modell**) und ein zweiter Scan D (**Daten**)
- Es wird eine Transformation des einen Scans berechnet und zwar so, dass beide optimal überlagert werden
- Die Transformationen bestehen nur aus einer Rotation und einer Translation
- Die Überlagerung ist optimal, wenn Punkte, die in der realen Szene nahe beieinander liegen, auch in den registrierten Messdaten nahe beieinander liegen.
- **Ziel:** Fehlerfunktion minimieren \Rightarrow Abstände der Punkte des einen Scans zu ihren korrespondierenden Punkten des zweiten Scans
- Die Transformation des zweiten Scans entspricht dann der Bewegung des Roboters zwischen der Aufnahme der Daten; durch sukzessiven Vergleich kann damit die Bewegung des Roboters nachverfolgt werden

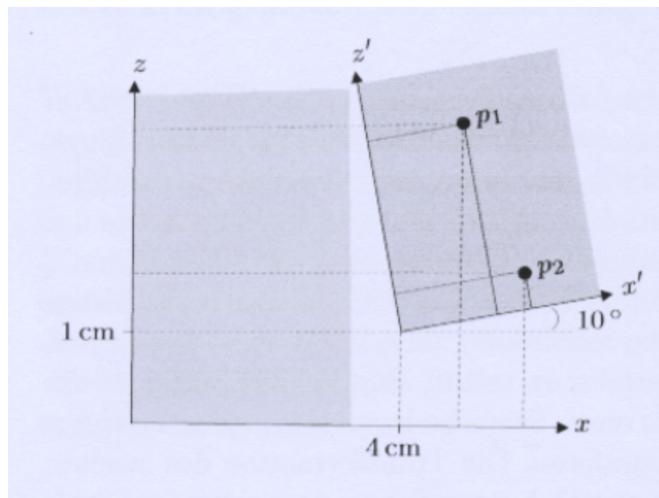


Figure 4.2

Iteratives Vorgehen

- **Annahme:** die korrespondierenden Punkte sind bekannt \Rightarrow eine **Transformation** kann berechnet werden, die diese Mengen aufeinander abbildet
- **Beispiel** zwei Scans mit einer Poseänderung des zweiten um $(4\text{cm}, 1\text{cm}, 10\text{ deg})^T$ beide Scans sehen dieselben Raumpunkte p_1 und p_2
- Obige Annahme i.d.R. nicht erfüllt \Rightarrow **nicht eindeutig zu bestimmen, welche Punkte zwischen den beiden Scans korrespondieren**
- **Lösung:** **iteratives Vorgehen**, bei dem zunächst eine **Schätzung** der Punktpaarung stattfinden und die Pose des zweiten Scans unter dieser Paarung optimiert wird.
- Iterativ werden mit dem transformierten Scan neue Punktpaare berechnet, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist, d.h. bis sich die Transformation zwischen zwei Schritten nicht mehr signifikant ändert

Transformationsberechnung

- **Gesucht:** Mögliche Menge von Translationen und Rotationen, unter denen ein korrektes Matching möglich ist.
- $(t_x, t_z, \theta)^T$, die eine Translation um t_x in x-Richtung und t_z entlang der Z-Achse durchführt, sowie eine Rotation um den Winkel θ
- Der Scan M besteht aus einer Menge von Punkten $(m_i)_{i=1,2,\dots,N}$
- Der Scan D besteht aus einer Menge von Punkten $(D_i)_{i=1,2,\dots,N}$

Minimum der Funktion

$$E(\theta, t) = \sum_{i=1}^N \|p_i - (\mathbf{R}_\theta \mathbf{p}'_i + \mathbf{t})\|^2$$

Transformation zur minimierung der Fehlerfunktion E

Folgende Transformation mit ggb. Parametern minimiert die Fehlerfunktion:

$$\theta = \arctan \left(\frac{S_{zx'} - S_{xz'}}{S_{xx'} + S_{zz'}} \right)$$

Hierbei ist

$$\begin{aligned} t_x &= c_x - (c'_x \cos \theta - c'_z \sin \theta) \\ t_z &= c_z - (c'_x \sin \theta + c'_z \cos \theta) \end{aligned}$$

mit den Parametern:

$$\begin{aligned} c_x &= \frac{1}{N} \sum_i p_{x,i} & S_{xx'} &= \sum_i (p_{x,i} - c_x)(p'_{x,i} - c'_x) \\ c_z &= \frac{1}{N} \sum_i p_{z,i} & S_{xz'} &= \sum_i (p_{x,i} - c_x)(p'_{z,i} - c'_z) \\ c'_x &= \frac{1}{N} \sum_i p'_{x,i} & S_{zx'} &= \sum_i (p_{z,i} - c_z)(p'_{x,i} - c'_x) \\ c'_z &= \frac{1}{N} \sum_i p'_{z,i} & S_{zz'} &= \sum_i (p_{z,i} - c_z)(p'_{z,i} - c'_z) \end{aligned}$$

4.1.4 Weitere Lokalisierungsalgorithmen zur globalen Lokalisierung

- Wird beim 2D-Scanmatching nicht mit einem vorhergehenden Scan verglichen, sondern mit einer Karte, kann eine globale Lokalisierung realisiert werden
- Lokalisierung an Linien: Vergleich von Messung und Linienkarte
- Lokalisierung an visuellen SIFT (Scale-invariant feature transform) Merkmalen; ein Algorithmus zur Detektierung lokaler Merkmale, die größtenteils invariant gegenüber Rotation und Skalierung sind
- Verschiedene Algorithmen zur probabilistischen Lokalisierung in Karten

5 Navigation

5.1 Bekanntes vs. unbekanntes Terrain

Man unterscheidet zwischen Algorithmen für:

- **bekannte Umgebung:** auch während der Fahrt ändert sich die Umgebung nicht
- **unbekannte Umgebung:** entweder vollständig oder Teilweise unbekannte Umgebung

Ist das Gebiet **vollständig bekannt**, lässt sich die Suche mittels eines Graphen lösen. Ansonsten erfolgen die Berechnungen auf lokalen Teileinformationen von Sensoren mit denen **inkrementelle Anpassungen** vorgenommen werden.

5.2 Navigation in unbekanntem Terrain

5.2.1 Konturverfolgung

Eine **Freiraumfahrt** d.h. eine Fahrt durch ein Gelände, dessen Raum möglichst weit und frei von Hindernissen ist, ist nicht immer Zielführend.

Lösung: **Konturverfolgung**

- Roboter wird nah an einem Objekt (Wand, Hinderniss) entlang bewegt
- Es sollte möglichst ein gegebener Abstand d eingehalten werden

Listing 5.1: Regelung des Abstands d

```
1 if (Distance to Wall > d) then
2     turn to wall
3 fi
4
5 if (Distance to Wall < d) then
6     turn away from wall
7 fi
8
9 if (Distance to Wall == d) then
10    Drive straight ahead
11 fi
```

5.2.2 Bug1 Algorithmus

Voraussetzungen

- Bewegung auf einer geraden Linie
- Konturverfolgung
- Roboter benötigt einen Sensor zur Erkennung eines "Kontakts" mit einem Hindernis
- Roboter kann die Distanz zwischen zwei Punkten x und y messen
- der Arbeitsraum ist begrenzt

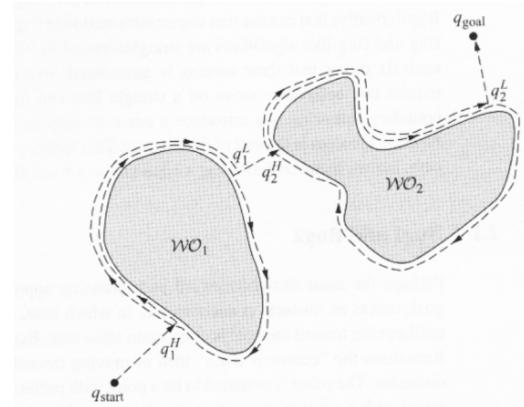


Figure 5.1: Bug1 Algorithmus Route

Algorithmus

```

1 while ( noch nicht am Ziel ) {
2   try {
3     Folge gerader Linie zum Ziel
4   } catch ( HindernisKontakt kontaktpunkt ) {
5     Umfahre das Hindernis bis wieder bei $kontaktpunkt
6     leavepoint = Punkt mit Lot vom Hindernis zum Ziel
7     Fahre zu $leavepoint
8   }
9 }
```

Exception Schneidet die Linie von q_1^L zum Ziel das **aktuelle Hindernis** gibt es keine Lösung

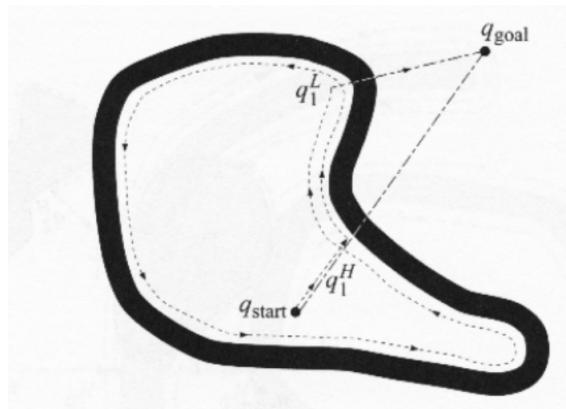


Figure 5.2

5.2.3 Bug2-Algorithmus

Schnellere Variante zu Bug1, da Hindernis nicht komplett umrundet wird. Eventuell keine mögliche Lösung wie bei Bug1. **Backtracking** und damit Veränderung der Umfahrrichtung eines Hindernisses können helfen.

Listing 5.2: Algorithmus ohne Backtracking

```

1 /**
2  * Start S
3  * Ziel T
4  * Derzeitige Position P = S
5  * Umfahrrichtung = rechts
6 */
7 Konstruiere Strecke ST
8 while (nicht bei T) {
9     try {
10         Fahre auf ST
11     } catch (HindernisKontaktPunkt H) {
12         while (P == Schnittpunkt mit ST && len(PT) < len(HT)) {
13             Umfahre das Objekt rechtsherum
14         }
15     }
16 }
```

5.2.4 Bug3-Algorithmus

Unterschied zu Bug2 ist, dass er nicht der Strecke ST strikt folgt sondern jede Möglichkeit nutzt näher ans Ziel T zu kommen. Auch hier Problematik keine Lösung zu finden und Verbesserung durch Backtracking möglich.

Listing 5.3: Algorithmus ohne Backtracking

```

1 /**
2  * Start S
3  * Ziel T
4  * Derzeitige Position P = S
5  * Umfahrrichtung = rechts
6 */
7 while (nicht bei T) {
8     try {
9         Fahre zu T
10    } catch (HindernisKontakt) {
11        while (PT nicht frei) {
12            Umfahre das Objekt rechtsherum
13        }
14    }
15 }
```

5.2.5 Labyrinthe

Grundprobleme

- Es wird davon ausgegangen, dass der Roboter berühren oder "sehen" kann
- Zwei grundlegend Hauptprobleme:

- Einen **Weg in ein Labyrinth** finden, um einen bestimmten Gegenstand oder **Schatz zu erreichen** sowie den **Rückweg zum Eingang**
- **Flucht aus einem Labyrinth** von einer unbekannten Stelle aus.
- Enger Zusammenhang zwischen Labyrinth und Graphen ⇒ Jeder Korridor:= Kante und jede Kreuzung:= Knoten
 - Bei bekanntem Labyrinth ⇒ Suchproblem in Bäumen

Verlassen eines Labyrinths mit Pledge Algorithmus

Grundidee Vorsichtig geradeaus bis man auf ein Hindernis trifft und dann mit der "linken" Hand immer an der Wand entlang bis zum Ausgang.

Problem Enthält das Labyrinth eine Säule, läuft man für immer im Kreis

Lösung Man folgt der Wand nur solange, bis man wieder in die alte Richtung schaut.

Allgemeingültige Lösung Drehungen beim Abbiegen an den Ecken mitzählen. Bei jeder Linksdrehung wird der Umdrehungszähler inkrementiert, bei jeder Rechtsdrehung dekrementiert.

- Bewege den Roboter geradeaus bis eine Wand erreicht ist
- Folge der Wand bis Umdrehungszähler 0 ist

Verlassen eines Labyrinths mit Ariadenfaden

Ziel: einen Weg zu einem versteckten Ziel im Labyrinth sowie wieder zurück zum Eingang finden ohne dass eine Karte des Labyrinths bekannt ist

Idee: Wenn man ein Labyrinth betritt Faden ausrollen ⇒ zurückverfolgen bringt einen zurück zum Eingang.

Voraussetzungen und grundsätzliches Vorgehen

- einer Wand folgen
- Umdrehen
- Kreuzungen erkennen
- Ziel erkennen
- Faden auslegen und wieder einsammeln
- Faden am Boden erkennen
- Faden zur nächsten Kreuzung folgen

Tarry und Tremaux Algorithmus

- Beispiel für klassische Tiefensuche
- Richtung, in der sich das zu suchende Objekt befindet ist unbekannt.
- Graph kann zyklen enthalten

- Es wird ein zyklisch gerichteter Graph durch jede Kante konstruiert, wobei jede Kante nur einmal pro Richtung besucht wird

Algorithmus:

- Starte willkürlich an einem Knoten
- Folge einem möglichen Pfad, markiere die Kante, in welcher Richtung sie betreten worden ist
- Sind alle Kanten schon betreten, eine auswählen, die bis jetzt nur in die Gegenrichtung betreten wurde.
- Trifft man auf eine Sackgasse oder einen schon besuchten Gang, zurück zur letzten Kreuzung
- Es darf kein Pfad betreten werden, der schon in beide Richtungen besucht wurde.
- Algorithmus ist beendet, wenn der Startpunkt erreicht wird.

5.3 Pfadplanung für mobile Roboter in bekanntem Terrain

Ziel der Navigation ist es, ein Fahrzeug in der Umwelt zu bewegen. Dies beinhaltet drei Unteraufgaben:

Global Pfadplanung • **Voraussetzung:** es gibt eine Karte

- suche eines Pfades von einem Start- zu einem Zielpunkt in vorhandenem Umgebungsmodell
- evtl. auch Suche nach Pfad mit geringsten Kosten
- Kompletter Pfad beschrieben durch Menge von Punkten

Lokale Pfadplanung berücksichtigt Fahrzeug-Dimension und kinematische Einschränkungen

Path Control generiert geeignet Steuerbefehle, um den vorberechneten Pfad zu folgen

5.3.1 Konfigurationsraum

Summe aller Konfigurations-Hindernisse bildet den **Konfigurationsraum**. Dieser ist eine Datenstruktur, die es dem Roboter ermöglicht, die **Position und Orientierung von Hindernissen** in der Umgebung zu definieren. Der Konfiguration dient somit als **Basis der Webplanung**.

Herleitung

- Abmessungen, Form, Bewegungsmöglichkeiten des Roboters werden für die Erstellung des Konfigurationsraums benötigt
- Konfiguration q eines Roboters beschreibt Lage und Ausrichtung im Bezugssystem des Umgebungsmodells
- Im zweidimensionalen Raum kann Position in x, y -Ebene und Orientierung ausgedrückt werden
- Konstruktionsbedingt sind einige Konfigurationen für den Roboter in seiner Umgebung nicht zulässig

- Problem; einfachere Darstellung:

Roboter als Punkt angenommen

Abmessungen des Roboters + Objektabmessungen \Rightarrow Konfigurations-Hindernisse

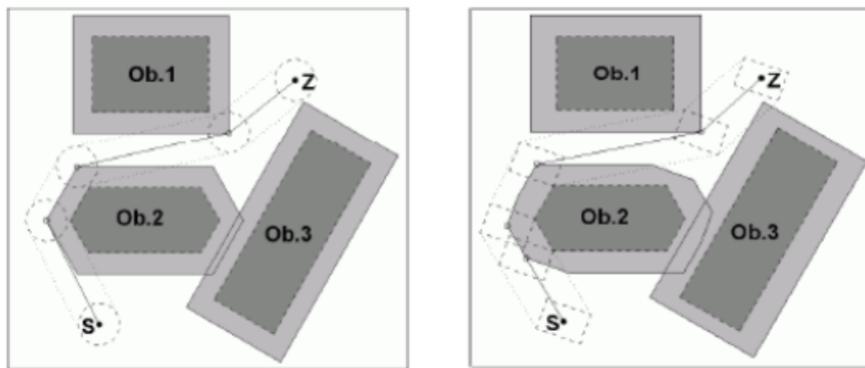


Figure 5.3

Repräsentationen

- Graphen mit Knoten
- Reguläre Gitter
- Quad-Bäume oder Octal-Bäume
- Voronoidiagramme

5.4 Algorithmen und Methoden

Für die folgenden Algorithmen und Methoden wird ausgesagte, dass Hindernisse bekannt sind und weder Position noch Form ändern.

Zellzerlegungen Das Umgebungsmodell wird in sich nicht überlappende Zellen unterteilt, die als besetzt oder frei markiert sind

Straßenkartenmethoden oder Roadmaps Eine Roadmap ist ein Graph mit Knoten und Kanten, bei dem alle befahrbaren Wege hinterlegt sind. Daraus kann ein kollisionsfreier Pfad vom Start- zum Zielpunkt erstellt werden.

Auf dieses Netzwerk können Standardmethoden der Graphentheorie, wie sie auch in der Autonavigation Verwendung finden, angewendet werden:

- kürzeste Wegsuche mit A*, Dijkstra
- Wegsuche mit Umgehung von Hindernissen mit dem **Sichtbarkeitsgraph**
- Wegsuche mittels eines **Voronoiographen**, **Voronoidiagramms**

Potentialfeldmethoden beinhalten die physikalische Simulation des Roboters als Partikel in einem Feld.

5.4.1 Dijkstra

```

1  /**
2   * PriorityQueue Open
3   */
4  struct Knoten {
5      int cost
6      Knoten* predecessor
7  }
8  Knoten start = {0, null};
9  push start on Open
10
11 while (Open is not empty) {
12     Knoten n = pop lowest cost from Open
13     if (ist n Ziel?) {
14         konstruiere weg
15         return sucess
16     }
17     for (Knoten nx : nachfolger von n) {
18         newcost = n.cost + wegkosten von n nach nx
19         if (n ist in Open && nx.cost <= newcost) {
20             continue;
21         }
22         nx.predecessor = n
23         nx.cost = newcost
24         if (nx is not in Open) {
25             push nx in Open
26         }
27     }
28 }
29 return failure

```

5.4.2 A*

```

1 /**
2  * PriorityQueue Open
3  * List Closed
4  */
5 struct Knoten {
6     int total           // total cost
7     int est             // estimated cost
8     int known           // known cost
9     Knoten* predecessor
10 }
11 Knoten start;
12 start.total = 0;
13 start.est = GoalDistEstimate(start);
14 start.known = start.total + start.est;
15 start.predecessor = null;
16
17 push start on Open
18

```

```

19 while (Open is not empty) {
20   Knoten n = pop lowest total cost from Open
21   if (ist n Ziel?) {
22     konstruiere weg
23     return sucess
24   }
25   for (Knoten nx : nachfolger von n) {
26     newcost = n.known + wegkosten von n nach nx
27     if ((n ist in Open || n ist in Closed) && nx.known <= newcost) {
28       continue;
29     }
30     nx.predecessor = n
31     nx.known = newcost
32     nx.est = GoalDistEstimate(nx)
33     nx.total = nx.known + nx.est
34     if (nx is in Closed) {
35       remove nx from Closed
36     }
37     if (nx is not in Open) {
38       push nx in Open
39     }
40   }
41   push n onto Closed
42 }
43 return failure

```

5.4.3 Wegsuche mit dem Sichtgraph-Algorithmus

Visibility Map Die Eckpunkte der Polygone (Hindernisse) werden zu Knoten, die eine Kante teilen wenn sie das Polygon nicht schneiden.

Visibility Graph Einfachste Visibility Map, bei der Start- und Zielknoten mitinbegriffen sind. **Hinderniskanten sind Teil des Sichtgraphen.**

Sichtgraphalgorithmus

1. Erzeuge Visibility Graph \Rightarrow Kanten = Wegstücke & Knoten = Orte
2. Kanten werden mit Entfernung gewichtet.
3. Suche: Suche die Geraden, die den kürzesten Weg zum Ziel verbinden.

Nachteile:

- Weg tangiert Hindernisse
- Graph enthält viele nutzlose Kanten

Reduzierter Visibility Graph

Der reduzierte Sichtgraph besteht nur aus unterstützenden und trennenden Kanten.

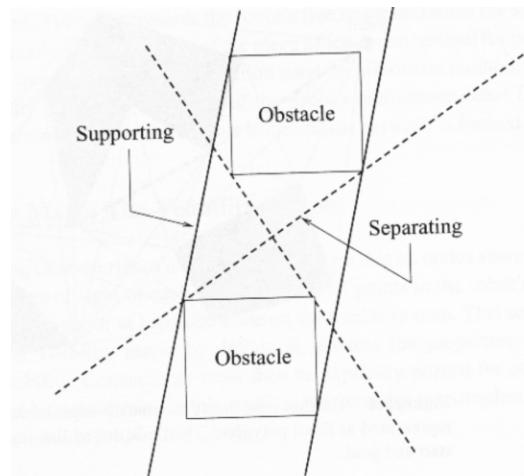
unterstützende Kanten: Tangente zu zwei Hindernissen, so dass die Hindernisse auf derselben Seite der Linie liegen

trennende Kanten: Tangente zu zwei Hindernissen so, dass die Hindernisse auf gegenüberliegenden Seiten der Tangente liegen.

Konstruktion: Alle Liniensegmente vv_i mit $v \neq v_i$ dürfen keinen Schnittpunkt mit einer Hinderniskante haben.

⇒ **Nachteil:** Komplexität $O(n^3)$

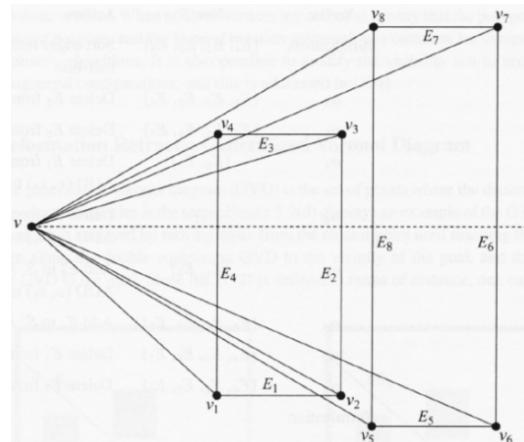
⇒ **Effizienter:** Plane Sweep Algorithmus $O(n^2 \log n)$



Listing 5.4: Sweep Line Algorithmus

```

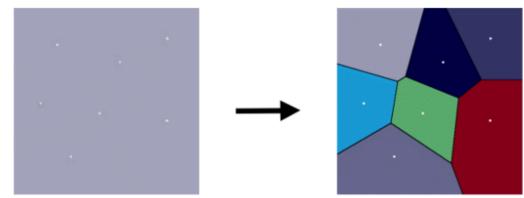
1 /**
2  * Input: Set of vertices (whose edges do not
3  *         intersect) and a vertex v
4  * Output: A subset of vertices from the
5  *         input set that are within the line
6  *         of sight of v
7 */
8 Angles = vertices.map(vi ->
9     angle between segment vvi horizontal line
10    from v
11 )
12
13 Angles.sort(ASC)
14
15 List S // containing edges that intersect the
16 // horizontal line from v
17
18 for (angle : Angles) {
19     if (vi is visible to v) {
20         add edge (v, vi) to the visibility graph
21     }
22     if (vi ist the beginning of an edge, E, not in S) {
23         insert E into S
24     }
25     if (vi is the end of and edge in S) {
26         delete the edge form S
27     }
28 }
```



5.4.4 Voronoi-Diagramme

Eine Fläche wird willkürlich mit Punkten besetzt. Diese Punkte bilden die Zentren der Polygonflächen. Jeder Punkt der Fläche gehört zu dem Zentrum das ihm am nächsten liegt \Rightarrow Gehört zur Polygonfläche dieses Zentrums. Wenn ein Punkt zu min. 2 Zentren den selben Abstand hat bildet er die Grenze zwischen den Polygonflächen dieser Zentren. Der Abstand wird mit der Euklidischen Abstandsfunktion bestimmt:

$$dist(p, q) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2}$$



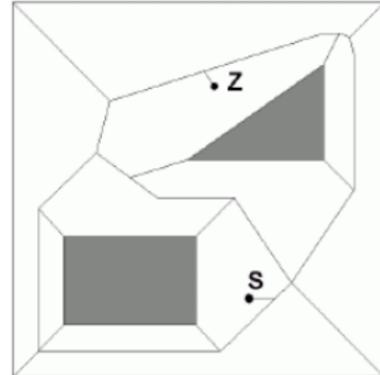
Die Menge der Grenzlinien nennt man Voronoi-Diagramm

Immer dann gut einsetzbar, wenn ungenaue Sensoren zur Verfügung stehen oder die Umwelt ungenau geometrisch modelliert wurde oder sich dynamisch ändert.

Generalisierte Voronoi-Diagramme

Bei dem sogenannten generalisierten Voronoi Diagramm (GVD) ist die **Form der Zentren** und die Art der **Abstandsfunktion** nicht festgelegt. Dadurch können Zentren komplexere Formen statt nur Punkte sein. Die damit entstehenden Voronoi-Kanten bilden mögliche kollisionsfreie Wegstücke.

In der Robotik werden Konfigurationsräume gerne damit repräsentiert und die Hindernisse werden zu Zentren des GVD gemacht. Bei der Wegfindung befinden sich Start- und Zielpunkt nicht auf dem Diagramm, diese werden mit der nächstgelegenen Kante verbunden.



5.4.5 Navigation in einer Rasterkarte

In einer Rasterkarte gibt es nur die Bewegungsrichtungen (N, O, S, W). Sie besteht aus einem binären Raster. Es können zwei ähnliche Algorithmen zur Navigation verwendet werden:

- Fluten vom Startpunkt aus
- Fluten vom Zielpunkt aus (Wave Front Planer)

Bei beiden Algorithmen werden in jeder Iteration die Werte des Nachbarn des Randes der Welle, die kein Hindernis darstellen, auf den Wellenwert + 1 gesetzt.

Daraufhin kann der gewünschte Weg durch Absteigen (Backtracking) ermittelt werden. Die beiden Algorithmen unterschieden sich in der Startbelegung.

1	2	3	4	5	6	7	8
2	3		5	6	7	8	9
3	4		6	7	8		
4	5		7	8	9	10	11
5	6	7			10	11	12
			8	9		11	12
						13	14
11	10	9	10	11			
12	11	10	11	12	13	14	15

	Fluten vom Startpunkt	Wave Front Planer
Start der Welle	Startpunkt	Zielpunkt
Hindernis Wert	-1	1
Frei Startwert	0	0
Wellen Startwert	1	2
Anmerkung		Einfache Potentialfeldmethode

Nachteile

- Weg führt ev. nah am Hindernis vorbei
- Der gesamte Raum muss durchsucht werden

Vorteil auch im 3D Raum anwendbar mit 6 Nachbarfeldern.

Algorithm 7.7 Flooding a raster with thick walls

```

Initialization:  $i := 1; j := 0;$ 
starting cell  $z := 1$ ; push  $S_i$ ;
repeat
   $i := (i + 1) \bmod 2; j := (j + 1) \bmod 2$ 
  repeat
    pop stack  $S_i$ ; check surrounding of the cell taken out of stack:
    for all cells with  $z = 0$  do
      if  $\min_{z>0}(O,S,W,N) > 0$  then
         $z := \min_{z>0}(O,S,W,N) + 1$ ; push to stack  $S_j$ ;
      else
        do nothing;
      end if
    end for
  until stack  $S_i$  is empty
until stack  $S_j$  is empty

```

Figure 5.4: Flooding Algorithmus

5.4.6 Potentialfeld Methode

Vorbild ist das elektrische Feld. Dabei müssen Start- und Zielposition und die Positionen aller Hindernisse bekannt sein. Der Zielpunkt und Freiraum erhalten ein anziehendes Potential. Der Startpunkt, Hindernisse und Wände ein abstoßendes Potential. Eine Karte mit den verschiedenen anziehenden und abstoßenden Kräften wird erstellt, diese nehmen linear mit dem Abstand zum Objekt ab.

Der Roboter bewegt sich nach der Methode des steilsten Abstiegs im Potentialfeld auf das Ziel zu.

Problem Der steile Abstieg ist ein greedy Algorithmus und kann dazu führen, dass ein lokales Minimum erreicht wird und somit in einer Sackgasse landet. \Rightarrow Potentialfunktion wählen, dass es nur ein Minimum im Ziel gibt.

6 Probabilistische Methoden und Kartierungen

6.1 Problemstellung

Sensordaten Roboter empfängt regelmäßig Sensordaten, jedoch mit Unsicherheit behaftet.

Steuerdaten Roboter führt regelmäßig Bewegungen mit Steuerdaten u_k durch, aber diese entsprechen nicht exakt den vorgegebenen Steuerdaten.

Position und Umgebungsmodell Position schätzt seine globale Position aufgrund der Sensor- und Steuerdaten in seiner Umgebungskarte, jedoch auch mit Unsicherheit behaftet

6.2 Modellierung von Unsicherheit

Die Unsicherheiten werden mit Wahrscheinlichkeiten modelliert. So kann der Zustand von dynamischen Systemen probabilistisch geschätzt werden.

Beispiel: Localization beim Roboter Dabei wird die Position ermittelt an der sich der Roboter am wahrscheinlichsten befindet. Die Lokalisierung wird somit zu einem Wahrscheinlichkeitsdichte Problem bei dem alle vorangegangenen Sensorwerte berücksichtigt werden.

6.3 Umgebungsmodellierung mit Occupancy Grids

6.3.1 Satz von Bayes

$p(A)$ = Wahrscheinlichkeit das die Aussage A zutrifft

$P(A|B)$ = Wahrscheinlichkeit, dass $p(A)$ unter der Voraussetzung das B gilt

$$P(A|B) = p(B|A) * \frac{p(A)}{p(B)}$$

6.3.2 Evidence Grids (Beweisraster)

Problem: reale Sensordaten erhalten häufig Rauschen. Rauschen bei Sensordaten führt zu Abweichungen des Idealwerts \Rightarrow schwerwiegende Fehler.

Im Gegensatz zu Occupancy Grids nutzen Evidence Grids keine Binärwerte um die Belegung darzustellen. Sie sammeln Beweismittel und geben die Wahrscheinlichkeit für die Belegung jeder Zelle an:

$$Z(x, y) = p(Z_{x,y,belegt} | \text{Sensorwert}) / p(Z_{x,y,frei} | \text{Sensorwert})$$

Da die Wahrscheinlichkeit für die Belegung unter einem bestimmten Sensorwert schwer zu berechnen ist wird der Satz von Bayes benutzt:

$$Z(x, y) = \frac{p(\text{Sensorwert} | Z_{x,y,belegt}) * p(Z_{x,y,belegt})}{p(\text{Sensorwert} | Z_{x,y,frei}) * P(Z_{x,y,frei})}$$

Beim Start der Erstellung wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit für die Belegung einer Zelle bei 50% liegt. Dannach wird die Wahrscheinlichkeit fortlaufend mit den aktuellen Sensorwerten aktualisiert.

Die direkte Anwendung des Bayessischen Filters auf das Selbstlokalisierungsproblem ergibt sich die sogenannte **Markov- Lokalisierung**

6.4 Bayes-Filter Algorithmus

Der Vertrauenzustand (**belief**) spiegelt internes Wissen des Roboters über den Zustand seiner Umgebung wieder.

6.4.1 Algorithmus

Ein Rekursiver Algorithmus der aus dem vorangegangenen Status den neuen berechnet:

z_t = Observationsmesswert, aktuelle Sensorwerte der Umgebung

u_t = Aktionsmesswert, aktuelle Zustandsänderungen im Intervall $]t - 1, t]$

x_t = Zustand zum Zeitpunkt t

$$\text{bel}(x_t) = p(x_t | Z_{1:t}, u_{1:t})$$

Eine Vorhersage liefert, da dort die aktuellen Sensordaten noch nicht berücksichtigt werden:

$$\overline{\text{bel}}(x_t) = p(x_t | z_{1:t-1}, u_{1:t})$$

Algorithmus 4.1: Bayes-Filter (diskrete Verteilung). Eingabe ist eine Aktion u sowie ein Perzept z . Die Aktion führt zu der a-priori-Schätzung $\overline{Bel}(x_{t+1})$, mit Hilfe der Messung z wird daraus dann die a-posteriori-Schätzung $Bel(x_{t+1})$ aktualisiert.

Eingabe : Aktueller Belief $Bel(x_t)$, sowie ein Paar (u, z) .
Ausgabe: Aktualisierter Belief $Bel(x_{t+1})$

```

1: for alle Zustände  $x_t$  do                                // Update nach Aktion
2:    $\overline{Bel}(x_{t+1}) = \sum_{x_t} P(x_{t+1} | u, x_t) Bel(x_t)$ 
3: end for
4:  $\eta = 0$ 
5: for alle Zustände  $x_{t+1}$  do                      // Update nach Messung
6:    $Bel(x_{t+1}) = P(z | x_{t+1}) \overline{Bel}(x_{t+1})$ 
7:    $\eta = \eta + Bel(x_{t+1})$ 
8: end for
9: for alle Zustände  $x_{t+1}$  do                      // Normierung
10:   $Bel(x_{t+1}) = \eta^{-1} Bel(x_{t+1})$ 
11: end for
12: return  $Bel(x_{t+1})$ 

```

6.4.2 Beispiel Aufgabenstellung

Roboter schätzt den Zustand einer Tür mittels einer Kamera, er macht einen Beobachtung z.
Annahmen:

- Türe kann nur offen oder geschlossen sein
- Nur der Roboter kann den Zustand der Tür ändern

Der Roboter kennt den Zustand der Tür nicht \Rightarrow Gleichverteilung

$$\begin{aligned} bel(X_0 = \text{open}) &= 0.5 \\ bel(x_0 = \text{closed}) &= 0.5 \end{aligned}$$

Verrauschen der Sensoren \Rightarrow bedingt Wahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} p(Z_t = \text{sense_open} | X_t \text{ is_open}) &= 0.6 \\ p(Z_t = \text{sense_closed} | X_t \text{ is_open}) &= 0.4 \\ p(Z_t = \text{sense_open} | X_t \text{ is_closed}) &= 0.2 \\ p(Z_t = \text{sense_closed} | X_t \text{ is_closed}) &= 0.8 \end{aligned}$$

Der Roboter kann die Tür öffnen

$$\begin{aligned} p(X_t = \text{is_open} | U_t = \text{push}, X_{t-1} = \text{is_open}) &= 1 \\ p(X_t = \text{is_closed} | U_t = \text{push}, X_{t-1} = \text{is_open}) &= 0 \\ p(X_t = \text{is_open} | U_t = \text{push}, X_{t-1} = \text{is_closed}) &= 0.8 \\ p(X_t = \text{is_closed} | U_t = \text{push}, X_{t-1} = \text{is_closed}) &= 0.2 \end{aligned}$$

Der Roboter tut nichts

$$\begin{aligned} p(X_t = \text{is_open} | U_t = \text{nothing}, X_{t-1} = \text{is_open}) &= 1 \\ p(X_t = \text{is_closed} | U_t = \text{nothing}, X_{t-1} = \text{is_open}) &= 0 \\ p(X_t = \text{is_open} | U_t = \text{nothing}, X_{t-1} = \text{is_closed}) &= 0 \\ p(X_t = \text{is_closed} | U_t = \text{nothing}, X_{t-1} = \text{is_closed}) &= 1 \end{aligned}$$

6.4.3 Beispiel Rechnung

Für $t = 1$ mit $u_1 = \text{nothing}$ und $z_1 = \text{sense_open}$:

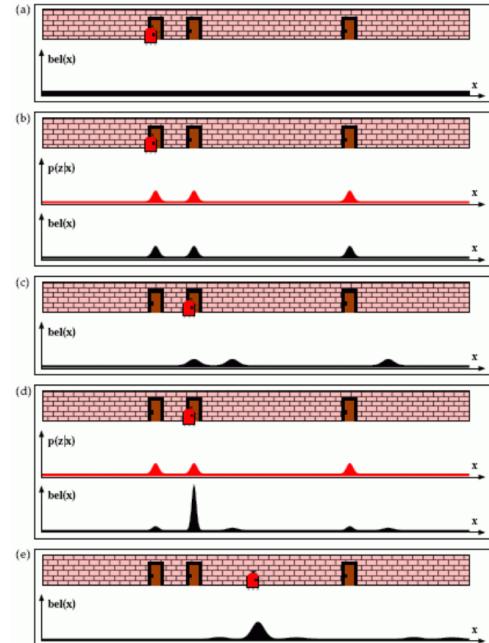
$$\begin{aligned}\overline{\text{bel}}(x_1 = \text{open}) &= \\ p(x_1 = \text{open}|u = \text{nothing}, x_0 = \text{open})\text{bel}(x_0 = \text{open}) + \\ p(x_1 = \text{open}|u = \text{nothing}, x_0 = \text{closed})\text{bel}(x_0 = \text{closed}) \\ &= 1 * 0.5 + 0 * 0.5 = 0.5 \\ \overline{\text{bel}}(x_1 = \text{closed}) &= \\ p(x_1 = \text{closed}|u = \text{nothing}, x_0 = \text{open})\text{bel}(x_0 = \text{open}) + \\ p(x_1 = \text{closed}|u = \text{nothing}, x_0 = \text{closed})\text{bel}(x_0 = \text{closed}) \\ &= 0 * 0.5 + 1 * 0.5 = 0.5 \\ \eta = 0 : \text{bel}(x_1 = \text{open}) &= \\ p(z = \text{sense}_{\text{open}}|x_1 = \text{open})\overline{\text{bel}}(x_1 = \text{open}) \\ &= 0.6 * 0.5 = 0.3 \\ \eta = 0.3 : \text{bel}(x_1 = \text{closed}) &= \\ p(z = \text{sense}_{\text{open}}|x_1 = \text{closed})\overline{\text{bel}}(x_1 = \text{closed}) \\ &= 0.2 * 0.5 = 0.1 \\ \eta = 0.4 : \text{bel}(x_1 = \text{open}) &= \text{bel}(x_1 = \text{open}) * \eta^{-1} = 0.3 * 0.4^{-1} = 0.75 \\ \text{bel}(x_1 = \text{closed}) &= \text{bel}(x_1 = \text{closed}) * \eta^{-1} = 0.1 * 0.4^{-1} = 0.25\end{aligned}$$

6.5 Markov Lokalisierung

Bei der Markov Lokalisierung geht von der Annahme aus, dass der nachfolgende Zustand nur vom aktuellen Zustand abhängt. Dafür bietet sich der Bayes-Filter an. Dabei wird der Bayes-Filter auf das Lokalisierungsproblem angewendet. Dafür ist als weitere Input die Karte notwendig. Für die Markov Lokalisierung ist eine **möglichst genaues Umgebungsmodell** notwendet.

Der Algorithmus ist wie beim Bayes-Filter es wird nur die Karte m als zusätzliches Parameter für die Wahrscheinlichkeit hinzugefügt.

$$\begin{aligned}\overline{\text{bel}}(x_t) &= \int p(x_t|u_t, x_{t-1}, m)\text{bel}(x_{t-1})dx \\ \text{bel}(x_t) &= \eta p(z_t|x_t, m)\overline{\text{bel}}(x_t)\end{aligned}$$



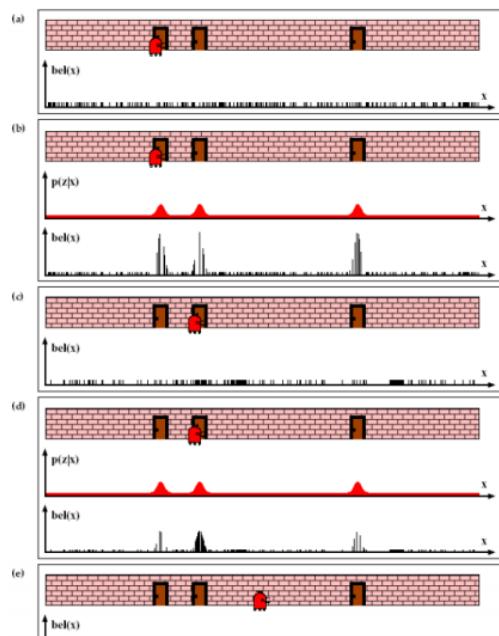
6.6 Monte Carlo Lokalisierung

Die Monte Carlo Lokalisierung ist ein Stichprobenbasiertes Approximationsverfahren für die Markov Lokalisierung. Der Bayes Filter wird auch hier benutzt, unterscheidet sich jedoch von gridbasierten Lokalisationsverfahren anhand der Betrachtung und Verarbeitung.

Praxis: Viele der Gitterzellen besitzen Wahrscheinlichkeit von 0. Diese Gitterzellen miteinzubeziehen ist ineffizient. Diese können vernachlässigt werden.

Funktionsweise

- Positionsschätzung bei (x_k) wird durch eine Menge von **Partikeln** dargestellt
- Es besteht keine Information über die Anfangsposition; Partikel sind **zufällig verteilt**
- Durch **Sensormessung** z werden die **Gewichte** (Strichhöhe) verändert
- **Resampling:** Aus der Partikelmenge werden mit gewichteten Zufall Partikel entzogen \Rightarrow Integrierung des Steuerbefehls (u_k)
- Es erfolgt eine erneute Gewichtung mit einem neuen Sensorwert
- Anschließend ein erneutes Resampling und Integrierung des Steuerbefehls



Vorteil

- zur Laufzeit kann die Größe der Stichprobenmenge variabel sein
- je unsicherer die Roboterposition ist, desto größer ist die Stichprobenmenge

6.6.1 Partikelmengen

- Jeder Partikel stellt eine **Hypothese** für den **Zustand** x dar
- Generierung einer Partikelmenge X aus einer Wahrscheinlichkeitsichtete p :

```

Algorithm generateParticle( $p$ ):
     $\chi = \emptyset;$ 
     $i = 0;$ 
    while  $i < M$  do
        generiere Zufallszahl  $x$  aus  $[a,b]$ ;
        generiere Zufallszahl  $q$  aus  $[0,c]$ ;
        if  $q < p(x)$  then
             $i = i+1;$ 
             $\chi = \chi \cup \{x\};$ 
        endif
    endwhile
return  $\chi$ ;

```

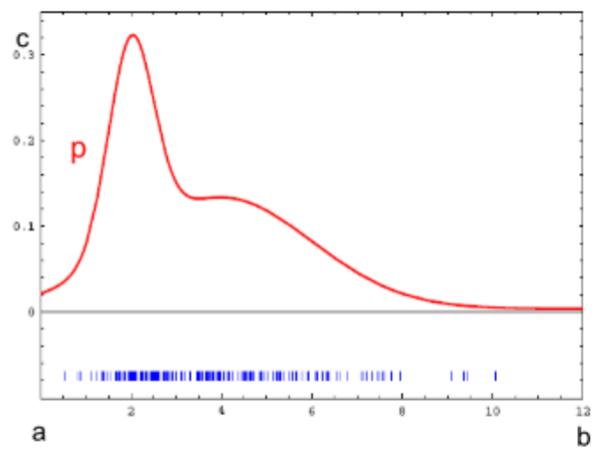


Figure 6.1: Partikelmengen

6.7 Kalman-Filter

6.7.1 Definition

- Zustandsschätzer für dynamische Systeme
- Spezielle Version eines Bayes-Filters
- Dient zur Fusion von zwei unterschiedlichen, stochastisch unabhängigen Informationsquellen

Anwendung fusion der Odometriedaten mit externen Messungen

6.7.2 Vorgehen

- $Bel(x_t)$ wird durch seinen Erwartungswert μ sowie die Kovarianz \sum_t approximiert.
- Zu jedem Zeitpunkt wird eine **Zustandsschätzung** geliefert, die aus einer Schätzung des aktuellen Zustandes und aus einer Vorhersage des Nachfolgezustandes nach Ausführung einer Aktion besteht.
- In die **Zustandsschätzungen** werden unabhängige Sensormessungen integriert
- In der **Vorhersagephase** benutzt der Kalman Filter die Zustandsschätzung vom vorhergehenden Zeitschritt um Zustandsschätzung für den aktuellen Zeitschritt zu erzeugen
- In der **Update** oder **Korrekturphase** werden die Messinformationen des aktuellen Zeitschritts verwendet, um die Vorhersage zu verbessern.
- Das Fehler Modell der Schätzung soll optimal aktualisiert werden auf Basis vorhandener Informationen

6.7.3 Einschränkungen

- Fehlermodelle sind Gaußverteilungen
- Die Zustandsverteilung ist eine Gaußverteilung

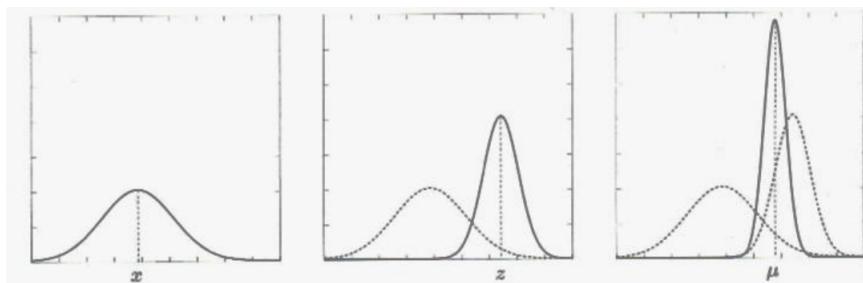


Figure 6.2: Kalman Filter

- **Links:** Unsicherheit im aktuellen Zustand x
- **Mitte:** eine unabhängige Messung z liefert konkurrierende Informationen (*Mittelwert und Varianz*)
- **Rechts:** Fusion beider Daten liefert eine Mittelung, gewichtet mit der Sicherheit der Informationen, sowie reduzierte Varianz, d.h. eine größere Sicherheit in dem gefilterten Zustand

6.8 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

6.8.1 Landmarkenbasiertes SLAM Problem

- **Ausgangspunkt** Roboter exploriert eine unbekannte, statistische Umgebung
 - Roboter kennt seine Pose (Position und Orientierung) nicht genau
 - Es existiert keine Karte der Umgebung
- **Bekannt** sind Sensor- und Steuerdaten: $d = u_1, z_1, u_2, z_2 \dots u_k, z_k$
- **Gesucht** Karte m mit M Landmarken: $m = l_1, x, l_1, y, \dots, l_M, x, l_M, y$
 - Weg des Roboters $x_1, x_2, \dots x_k$

Probabilistische Algorithmen Ungenauigkeiten in den Messdaten werden durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert

- bekannt sind die **Roboter Bewegungsbefehle** (die Kontrolldaten, die Steuerkommandos u_t)
- bekannt sind die **Beobachtungen** z_t der nahe gelegenen **Landmarken** bestehend aus Entfernung und Winkel
- die Sensorik kann sowohl die Beobachtungsrichtung als auch die beobachtete Entfernung einer Landmarke zur Verfügung stellen
- gesucht ist eine Schätzung der Karte der Merkmale, der Landmarkenpositionen, sowie der Pfad des Roboters, d.h. seine aktuelle und frühere Posen

6.8.2 Problemstellung

- Roboterpfad und Positionen der Landmarken in der Karte sind unbekannt
- Die Zuordnung von Messdaten zu Landmarken sind i.d. Regel unbekannt
- Roboter muss entscheiden, ob Messdaten einer bereits beobachteten Landmarke zugeordnet werden können oder einer noch nicht gesehenen Landmarke
- Problematik der Zuordnung wird durch Unsicherheit in der Roboterposition verstärkt

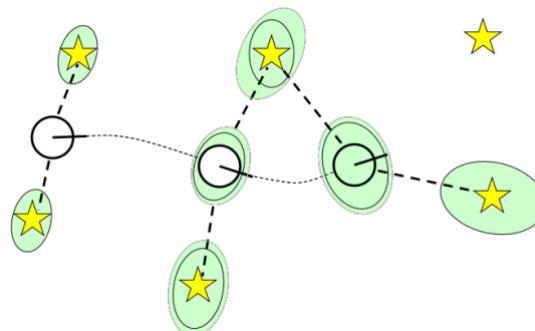


Figure 6.3

6.8.3 Funktionsweise

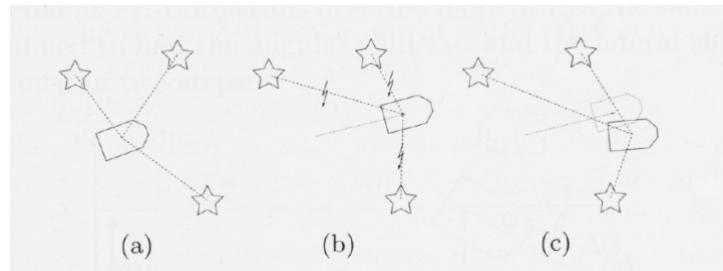


Figure 6.4: SLAM Darstellung

- (a) Roboter misst Distanzen zu den Landmarken
- (b) Roboter schätzt seine neue Position anhand von Odometriedaten; Odometrie-basierte Roboterpose kann zur Schätzung der neuen Distanzen zu den in (a) verwendeten Landmarken herangezogen werden
- Nach Vergleich zwischen Roboter und Landmarken kann der Roboter seine Position (c) korrigieren

6.8.4 Hinzunahme neuer Landmarken

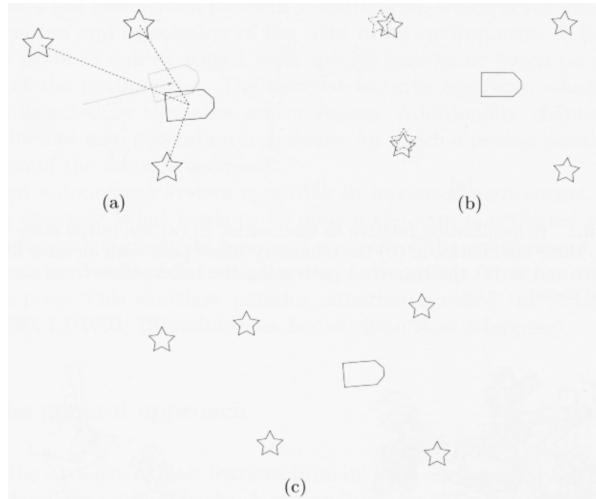


Figure 6.5

- (a) entspricht der Situation aus der vorhergehenden Folie.
- In (b) lokalisiert sich das Fahrzeug nach einer Bewegung erneut anhand zweier 'alter' Landmarken und der letzten lokalen Karte
- Führt aufgrund der Fehler zu einer ungenauen, globalen Roboterposition
- Die Position der neuen Landmarken wird relativ zu der vermeintlich bekannten, korrekten Position der alten Landmarken bestimmt
- Positionsannahme ist inkorrekt
- Verschiebung der Position der 'alten' Landmarken wird geschätzt und korrigiert sowie auf die Position der neuen Landmarken angewandt

6.8.5 Aufbau eines SLAM-Graphen

- Sämtliche Messvorgänge sind fehlerbehaftet, auch die Positionsbestimmung der Landmarken
- Die Unsicherheit wird in der folgenden Abbildung als Fehlerellipse dargestellt.
- Roboter schätzt die Landmarken **A** und **B**
- nach Bewegung des Roboters nimmt die Genauigkeit der Lokalisierung ab
- Die Unsicherheit der Positionsschätzung der Landmarken **C** und **D** steigt
- Der Roboter erkennt eine bereits zuvor gesehene Landmarke
- Eine Verknüpfung mit der früheren Information über die Landmarke reduziert die Unsicherheit bei der Positionsbestimmung und damit auch die Unsicherheit über die zugehörigen früheren Roboterpositionen

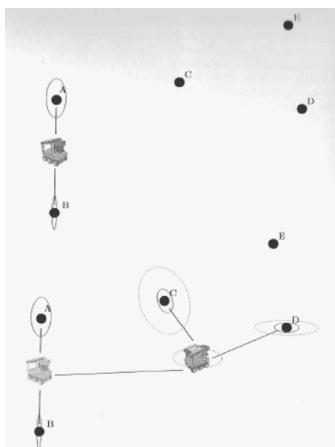


Figure 6.6

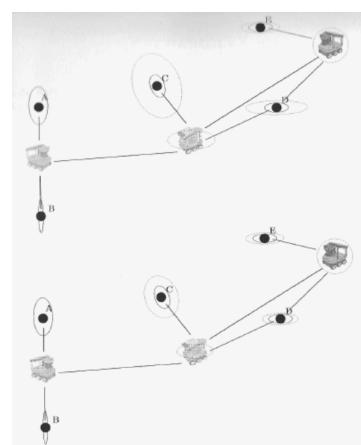


Figure 6.7

6.8.6 Varianten von SLAM

Vollständiges SLAM

- Roboter schätzt eine Umgebungskarte m
- Roboter schätzt seine aktuelle Pose x_t und **alle** zurückliegenden Posen x_{t-1} bis x_1
- Grundlage sind die bisher wahrgenommenen Sensordaten $z_1 : t$
- Sowie alle ausgeführten Aktionen $u_1 : t-1$
- Es muss die Verteilung $P(m, x_1 : t | z_1 : t, u_1 : t-1)$

Inkrementelles Slam

- Roboter schätzt nur die Karte m sowie die aktuelle Position x_t
- Es muss die Verteilung $P(m, x_t | z_1 : t, u_1 : t-1)$ geschätzt werden

6.8.7 Bayesian Netzwerk für landmarkenbasiertes SLAM

- Die einzelnen Landmarken sind unabhängig
- Gegeben sind die Roboterposen

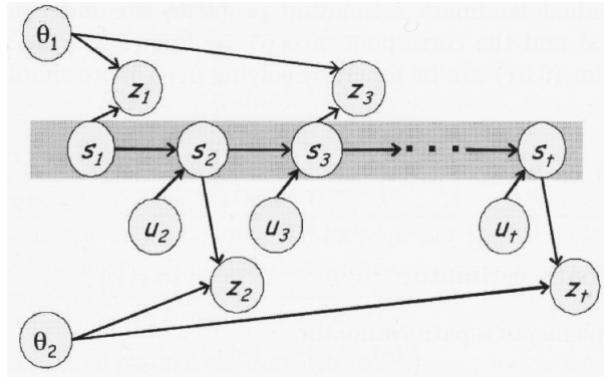


Figure 6.8: Bayes Netzwerk

Modell von Variablen und deren Abhängigkeiten als dynamisches Bayes-Netzwerk.

- Kern des Modells bilden die
 - Zeitreihe der Roboterzustände s_1, s_2, \dots, s_t
 - die Positionen der Landmarken θ_k
 - die Kontrollvariablen u_t
 - und die gemessenen, beobachteten Landmarken Positionen z_t
- Der Roboter bewegt sich von s_1 nach s_t mit einer Folge Kontrolleingaben u_2, \dots, u_t
- Der Roboterzustand s_t zum Zeitpunkt t ist lediglich vom Roboterzustand s_{t-1} zum vorhergehenden Zeitpunkt und dem ausgeführten Steuerkommando u_t des Roboters abhängig
- Zum Zeitpunkt $t = 1$ beobachtet der Roboter die Landmarkenpositionen θ_1 mittels z_1 zum Zeitpunkt $t = 2$ beobachtet er θ_2 via z_2 und zum Zeitpunkt $t = 3$ wieder θ_1
- Die Beobachtung z_t ist abhängig von der globalen Position der Landmarke θ_k und dem aktuellen Roboterzustand s_t
- **FastSLAM** zerlegt das Problem
 - in die **Lokalisation** (Wissen über den vom Roboter zurückgelegten weg s_1, \dots, s_t)
 - und einer Sammlung von einzelnen **Landmarken-schätzungen** z_k , die von der geschätzter Roboterpose abhängen
- Zeitkomplexität von **FastSLAM** ist $O(fM)$
 - f konstanter Faktor
 - M Anzahl der Landmarken

7 Schwarmrobotik und Evolutionäre Robotik

7.1 Schwärme und deren Verhalten in der Natur

Schwarmdefinition Der Begriff **Schwarm** bezeichnet einen Verband von fliegenden oder schwimmenden Lebewesen, der sich koordiniert bewegt. Im Unterschied zu anderen Gruppen zeigt er ein sogenanntes **Schwarmverhalten**

7.1.1 Computersimulation von Schwärmen - Algorithmus von Craig Reynolds

Die einzelnen Individuen agieren in Abhängigkeit von der Position und der Geschwindigkeit der benachbarten Boids nach folgenden Regeln:

Separation Bewege dich weg sobald dir andere zu nahe kommen

Alignment Bewege dich in die gleiche Richtung wie deine Nachbarn

Cohesion Bewege dich zum Mittelpunkt der benachbarten Vögel

Voraussetzung Reynolds setzte voraus, dass **alle** Vögel innerhalb eines fixen gegebenen Radius interagieren. Die Nachbarschaft ist bei Reynolds charakterisiert durch einen Abstand vom Zentrum des Vogels und durch einen bestimmten Winkel ausgehend von der Flugrichtung. Tiere außerhalb dieser Nachbarschaft werden ignoriert.

7.2 Schwarmintelligenz

Unter **Schwarmintelligenz** versteht man Systeme bestehend aus vielen primitiven, mobilen Agenten, die:

- gemeinsam agieren
- miteinander kommunizieren können
- im Kollektiv ein komplexes Problem lösen
- ohne zentrale Steuerung sich selbst organisieren

Kollektive Intelligenz Die Individuen agieren ziemlich beschränkt, die Gesellschaften dagegen sind ungemein leistungsfähig. Geeignet zur **Lösung schwieriger Optimisierungsprobleme**

7.3 Multi Robot Systems

Einsatz von simplen Robotern, deren Handlungsmöglichkeiten und Wahrnehmungssysteme stark begrenzt sind.

Vorteile

- **robust**
- **skalierbar**
- **flexibel**
- **Kosten** statt eines euren einzelnen Roboters, der eventuell nicht so leicht oder schnell zu ersetzen ist, werden billige Komponenten eingesetzt.
- **Verlässlichkeit** wenn ein einzelner Roboter oder Softwareagent ausfällt übernehmen andere Roboter dessen Aufgabe und fügen sich neu ins Kollektiv
- **Flexibilität** viele kleine kooperierende Roboter können bei sinnvoller Zusammenarbeit Probleme bewältigen, die ein großer Roboter alleine eventuell nicht bewältigen kann.

Problem Das Schwarmverhalten ist aufgrund des Einzelverhaltens nur schwer vorhersagbar.

7.4 Ameisenalgorithmen

7.4.1 Optimaler Weg bei futtersbeschaffenden Ameisen

Funktionsweise

- Eine Ameise verlässt den Bau, das nest (N) und sucht Futter auf einem **zufälligen Weg**
- Es gibt mehrere Zweige zur Futterquelle
- Weg wird mit **Pheromon**, einer chemischen Substanz markiert.
- Findet die Ameise Futter, schleppt sie das Futter auf dem gleichen oder einem anderen Weg zurück, der Weg wird dabei ev. ein weiteres Mal markiert.
- Weitere Ameisen, die zur Futtersuche starten, **orientieren sich** bei der Futtersuche **an den Pheromonspuren**
- Ameisen folgen **beworzugt**, aber nicht immer den markierten Wegen
- Auf langen Wegen ist die Ameisendichte wegen der größeren Entfernung geringer, das Pheromon verdunstet schneller.
- Wenn ein Ausreißer einen kürzeren Weg findet und einige andere Ameisen beginnen diesem Weg zu folgen, wird die Ameisendichte auf dem längeren Weg immer geringer und der kürzere Weg setzt sich durch

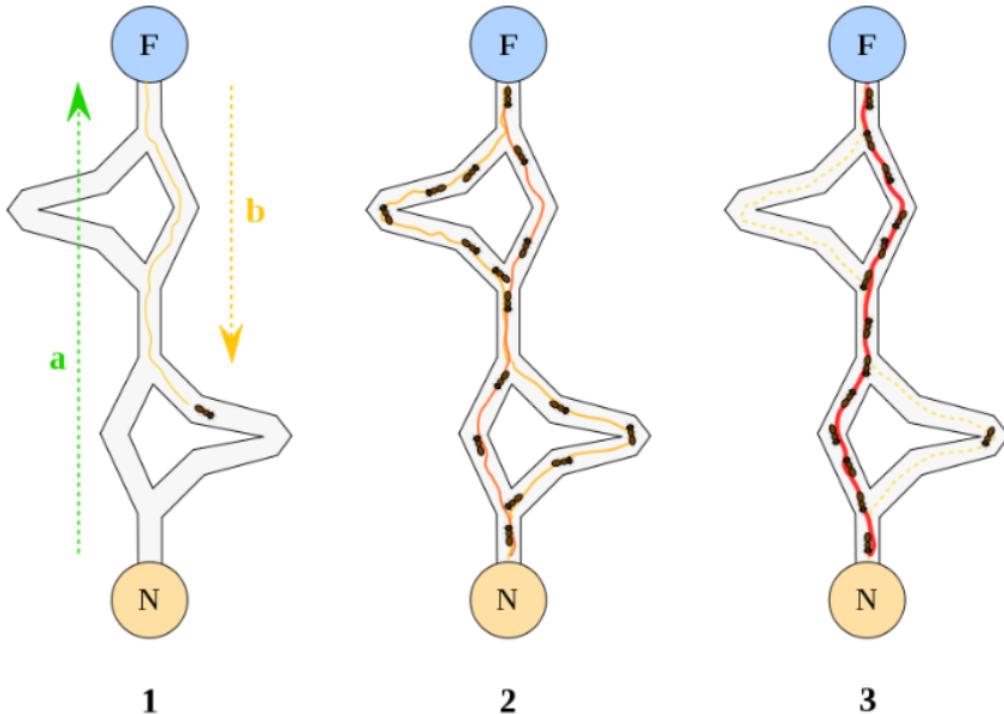


Figure 7.1: Darstellung des Ameisenalgorithmus Prinzips

7.4.2 Ant Colony Optimization Algorithm

- **Ant Colony Optimization(ACO)** ist der Überbegriff für Ameisen-basierende Algorithmen

Kategorien

- **Tourenplanung (Routing)**: ⇒ Travelling Salesman Problem
- **Zuordnung (Assignment)**: optimale Zuordnung von Personen oder Betriebsmitteln auf Stellen oder Aufgaben
- **Ablaufplanung (Scheduling)**: Verteilung von knappen Ressourcen auf Prozesse die zeitlich begrenzt sind
- **Teilmengen Problem (Subset)**: aus einer Menge von Objekten muss eine Teilmenge gefunden werden, damit eine vorgegebene Bedingung erfüllt und eine Zielfunktion optimiert wird.

Eigenschaften

- optimaler Weg ist der **kürzeste Weg** zwischen zwei Punkten
- **globale Information**: Belegung mit künstlichen Pheromonen als zentrale Idee
- Wahrscheinlichkeits-gestützte, **lokale Entscheidungen** - Ameise erkennt unmittelbare Nachbarschaft

Funktionsweise

1. Ameisen laufen entlang des Graphen

2. Eine Ameise erzeugt eine Lösung gemäß lokaler Information und Pheromon
3. Update beinhaltet neu aufgetragene Pheromone und Verdunstung bereits vorhandener Pheromone
4. Operationen, die globales Wissen vorraussetzen und damit nicht von einzelnen Ameisen bewerkstelligt werden können
 - Diskretisierung der Zeit t : in einem Zeitschritt erzeugen alle Ameisen eine vollständige Lösung.
 - Eine **Pheromon-Matrix** enthält die Intensität der Pheromone $T_{ij}(t)$ enthält die Intensität der Pheromone auf einer Kante vom Knoten i zum Knoten j im Graphen
 - Eine Matrix für lokale Informationen enthält die Sichtbarkeit der Stadt (d.h. die jeweils reziproke Distanz): $n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$

7.4.3 Traveling Salesman Problem

- Vorhanden: **vollständiger gerichteter Graph**
- Gesucht: **Rundtour durch alle Städte**

Ameisen laufen durch den Graphen, die Kolonie ermittelt den Optimalen Weg.

- Es erweist sich als vorteilhaft, für jede Ameise eine andere zufällig gewählte Stadt als Ausgangspunkt für die Tour zu nehmen

```

for  $t \leftarrow 1, \dots, t_{\max}$  do
    for each Ameise  $k = 1, \dots, m$  do
        Wähle Ausgangsstadt;
        for each unbesuchte Stadt  $i$  do
            Wähle Stadt zufällig gemäß  $p_{ij}^k$ ;
            Trage Pheromonspur auf Pfad auf;
        Verdampfe Pheromone;
    
```

Figure 7.2: Ameisenalgorithmus - Schritte

Algorithmus - Schritte

Entscheidung für nächste Stadt

- Jede Ameise besitzt eine Liste mit gültiger Nachbarschaft N
 - Die Entscheidung in einem Knoten bzgl. der nächsten Stadt fällt gemäß folgender Formel:
- $$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} & \text{für } j \in J_i^k \\ 0 & \text{für } j \notin J_i^k \end{cases}$$
- α und β steuern das Verhältnis zwischen Anteil der Pheromone und lokaler Information

- für α hat man den klassischen Greedy Ansatz

8 Locomotion

8.1 Fortbewegungsarten

- Fortbewegungsarten für Roboter sind oft durch die Natur inspiriert.
- Roboter mit Beinen benötigen in der Regel mehr Freiheitsgrade und sind mechanisch komplexer als Roboter auf Rädern.

8.2 Laufroboter

8.2.1 Vorteile von Laufrobotern

- Können auf unregelmäßigen Untergrund laufen
- Natürliche Fortbewegung
- Keine Umweltveränderung erforderlich

8.2.2 Nachteile von Laufrobotern

- Komplizierte Mechanik
- Anspruchsvolle Steuerungssoftware
- Mehrere Freiheitsgrade pro Bein
- Vielzahl an Sensoren erforderlich
 - interne Sensoren wie Potentiometer, Inkrementalsensoren, ...
 - externe Sensoren wie Stoßdämpfer, Stereo-Kamera, Infrarot, Ultraschall, ...

8.2.3 Freiheitsgrade für Roboterbeine

- Um ein Bein bewegen zu können, sind mindestens zwei Freiheitsgrade notwendig
- Die meisten Laufroboter haben mehrgliedrige Beine mit mindestens drei Freiheitsgraden pro Bein

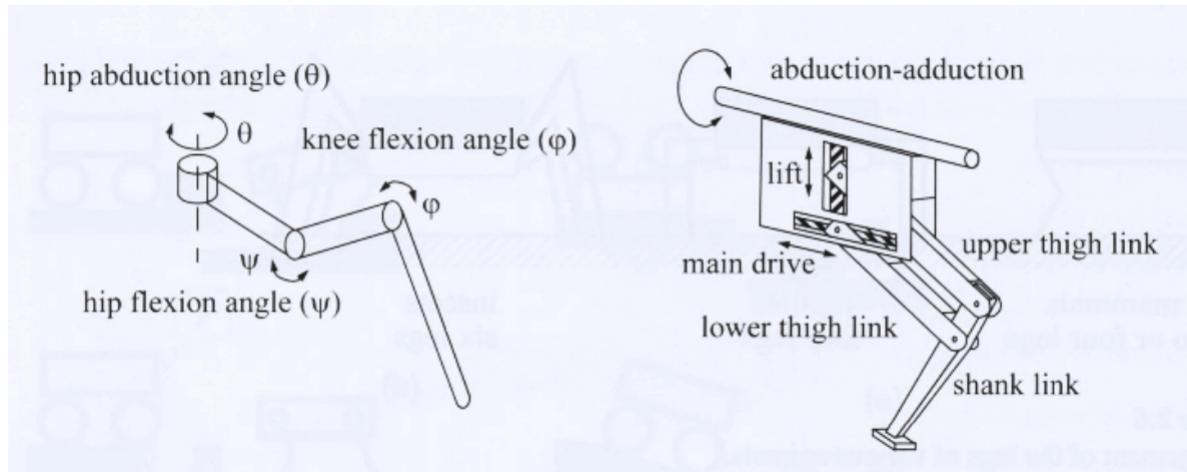


Figure 8.1: Freiheitsgrade für Roboterbeine

8.2.4 Freiheitsgrade für Zweibeiner

- Zweibeiner haben meist sechs Freiheitsgrade pro Bein
- Menschliches Bein hat 7 Freiheitsgrade
- Die Zahl der unterschiedlichen Gangarten hängt von der Zahl der Beine ab.
- Ein Zweibeiner (mit $k = 2$) hat $N = (2 \cdot k - 1)! = 6!$ unterschiedliche Gangarten

8.2.5 Laufverhalten

- Das Geh- und Laufverhalten kann in **statisch und dynamisch stabile Gangarten** eingeteilt werden
- Funktioniert nur für sehr langsame Bewegungen

Definition: Statisches stabiles Gehen bedeutet, dass sich der Roboter zu jedem Zeitpunkt in einem statischen Körperschwerpunkt ist so über den Füßen, dass der Körper nicht fallen kann.

Definition: Dynamisch stabiles Gehen bezeichnet Laufbewegungen, mit weniger als drei Füßen in Kontakt mit dem Boden. Dynamisches Gehen arbeitet mit Körperschwingungen: der Körperschwerpunkt befindet sich die meiste Zeit außerhalb von der aufgespannten Gleichgewichtszone.

8.2.6 Statisch stabiles Gehen

- Statische Stabilitätsbedingung: der Masseschwerpunkt (*Center of Gravity*) ist immer über dem Stützpolygon

Stützpolygon ist ein minimales Polygon, das alle Kontaktstellen des Roboters mit dem Boden enthält.

möglich für alle Beinanzahlen \geq zwei

nur langsame Bewegungen möglich

Dreifußgang

- Je drei Beine sind in der Stemmphase und in der Schwingphase
- Verbindet man die drei Beine in der Stemmphase ergibt sich ein Dreieck

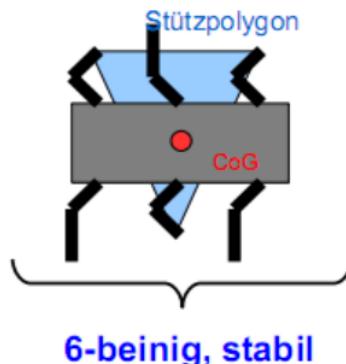


Figure 8.2

8.2.7 Zero Moment Point und Pseudo-Dynamisches Gehen

- Zero Moment Point (ZMP) ist der Punkt auf dem Boden, an dem die Kippmomente null werden
- ZMP dominiert seit 40 Jahren das zweibeinige GEhen
- Bewährt bei glatten Flächen
- Bei zweibeinigen Robotern wird das Stützpolygon ersetzt durch die konvexe Hülle der Bodenkontaktflächen
- **Nachteile des ZMP**

ZMP geregelter Gang kann nicht schneller sein als die Sensorik

ZMP erfordert die genaue Kenntnis der Massenverteilung im Roboter und alle Gelenkstellungen

8.2.8 Steuerungssoftware

Neuronale Netze

- Ähnlich zu biologischen Vorbildern
- Training durch Simulation

Mechatronik und Regelung

- Regelung von Gelenkwinkel und -Geschwindigkeiten
- Trajektorienplanung und -interpolation
- Explizite regelbasierte Laufplanung
- **Vorteil:** Nutzung gut bekannter mechatronischer Prinzipien

- Eigenschaften wie Stabilität sind gut bekannt
- Lernen einfacher Steuerungszusammenhänge im Gegensatz zu Neuronalen Netzen nicht notwendig

Verhaltensbasierte Steuerungen

- Modellierung von Basisverhalten durch Aufbau von Sensor/Motor-Verbindungen
- Zerlegung von komplexem Verhalten zu einer Vielzahl einfacher Ebenen mit zunehmend abstraktem Verhalten
- Verhalten können durch ein überlagertes Verhalten beeinflusst werden
- Mehrere Basisverhalten können zusammen zu einem völlig neuartigem Verhalten führen
- **Jedoch:** Schwierigkeiten bei der Realisierung komplexer Verhalten.

8.3 Radroboter

8.3.1 Stabilität von Radrobotern

- Natürliche Bewegungen wie Kriechen, Laufen, Springen oder Gehen technisch schwer zu imitieren.
- Mehrheit der mobilen Roboter auf Rädern oder Raupen unterwegs
- Alle Räder haben in der Regel Kontakt zum Untergrund
- für **statisch stabile Fahrzeuge** braucht man mindestens drei Räder:
 - Zwei angetriebene Räder auf einer Achse mit einem oder zwei passiv mitlaufenden Stützrädern, die sich frei drehen können
 - Steuerung erfolgt durch verschiedene Geschwindigkeit angetriebener Räder
 - kinematisches Zentrum oft in der Mitte des Fahrzeugs
- **dynamische Stabilität erfordert Bewegung**

8.4 Kinematik mobiler Radroboter

8.4.1 Holonomische Bewegung

Eine Bewegung heißt **holonomisch**, wenn das Objekt seine **Orientierung und seine Position unabhängig voneinander ändern** kann.

Pose System

- Position eines Objekts auf einer Ebene kann mittels zweier Koordinaten angegeben werden
- Die absolute Orientierung des Objektes wird mit einer dritten Koordinate angegeben, was zusammen ein Pose-System ergibt

- Koordinaten des Pose Systems \Rightarrow 2 für die Position in x,y Ebene; 1 für die absolute Orientierung

8.4.2 Kinematik und Positionsveränderung für Zweiradantrieb

- **Vorraussetzung:** kreisförmiger Roboter mit Zweiradantrieb, Bewegung ist nur in der Ebene möglich
- Position: Koordinaten x, y , Orientierung α
- Roboter misst zu diskreten Zeitpunkten t den mit dem linken bzw. mit dem rechten Rad zurückgelegten Weg
- ΔL und ΔR werden von Radwegsensoren ermittelt
- Der Drehwinkel $\Delta\alpha$ ist die Wegdifferenz des rechten und des linken Rades geteilt durch den Radabstand D

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta R - \Delta L}{D}$$
- Die Wegstrecke ist der mittlere Weg

$$\Delta s = \frac{\Delta L + \Delta R}{2}$$
- Positionsänderung bei Geradeausfahrt mit $\Delta L = \Delta R$

$$\Delta x = \Delta R * \cos(\alpha)$$

$$\Delta y = \Delta L * \sin(\alpha)$$

8.4.3 Fortbewegung bei Omnidirektionalem Antrieb

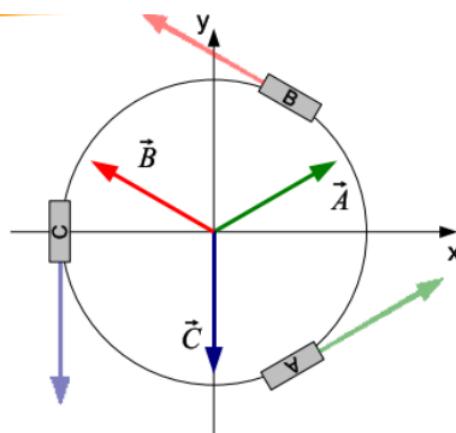


Figure 8.3: Einheitsvektoren

- **Einheitsvektoren** geben die Richtungen an, in denen die Omniwheels von den drei Motoren angetrieben werden.
- **Geschwindigkeitsvektoren** sind die Einheitsvektoren
- Raddrehmomente α, β, γ proportional zur Winkelgeschwindigkeit des jeweiligen Rades
- **Bewegungsvektor** $\vec{V} = \alpha \cdot \vec{A} + \beta \cdot \vec{B} + \gamma \cdot \vec{C}$

9 Industrierobotik

9.1 Industrieroboter

- **Roboterarm** mit Achsen, Gelenken und Antrieben
- Steuerung in einem **Steuerschrank** mit **Bedienerkonsole**
- **Handsteuergerät**

9.1.1 Einsatz

- In wohldefinierter Umgebung, definierte Hindernisse, bekannte Umwelt
- Größtes Einsatzgebiet in der Automobilindustrie und deren Zulieferern (*Schweißen, Lackieren, Beschichten ...*)

9.1.2 Trends

- Industrie 4.0, KI, IoT
- Human-Robot collaboration
- Mobile Roboter und einfachere Bedienung

9.2 Bauform und Komponenten

Roboterarm

- Armelemente bzw. Glieder die über Bewegungssachsen miteinander verbunden sind.
- Ausgleichszylinder ⇒ Motoren werden nicht überlastet, geringere Kräfte sind nötig

Endeffektor, Hand

- Das Arbeitsorgan ⇒ Werkzeug
- Üblicherweise wird die Werkzeugspitze **Tool Center Point (TCP)** genannt

Fahrzeug

- optional
- meist bodengebunden

- ein bis drei Freiheitsgrade
- Bsp.: Verfahrschlitten

9.3 Freiheitsgrade

9.3.1 Definition

Der Freiheitsgrad (DOF) bezeichnet in der Physik die Anzahl der frei wählbaren, voneinander unabhängigen Parameter eines physikalischen Systems, die dessen Zustand eindeutig kennzeichnen.

- In der Mechanik drückt der DOF die Möglichkeit aus im Raum voneinander unabhängig Bewegungen auszuführen
- Anzahl der Freiheitsgrade drückt die translatorischen und rotatorischen Bewegungsmöglichkeiten eines Körpers aus
- Anzahl der Gelenkkachsen \neq Anzahl der Freiheitsgrade

9.4 Bewegungsachsen

9.4.1 Rotatorisch

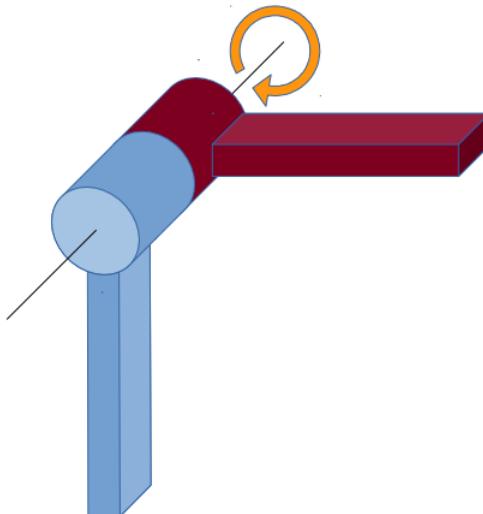


Figure 9.1: Rotatorische Achse

- Für Drehbewegungen
- Freiheitsgrad: 1

9.4.2 Translatorisch

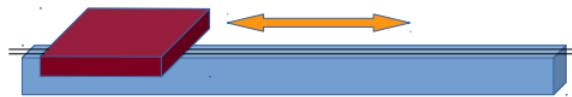


Figure 9.2: Translatorische Achse

- Für Schubbewegungen
- Freiheitsgrad: 1

Hauptachsen

- Zum Positionieren des Effektors im Raum
- Beeinflussen Position des TCP
- Rotatorisch oder Translatorisch

Nebenachsen

- Kopf- oder Handachsen
- Rufen nur kleine Positionsänderungen hervor
- Orientierung des Werkzeugs
- Meist rotatorisch

9.4.3 Rotationsgelenk

Die Drehachse bildet einen rechten Winkel mit den Achsen der beiden angeschlossenen Glieder.

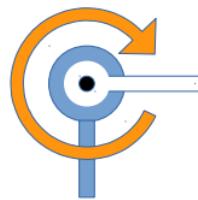


Figure 9.3: Rotationsgelenk

9.4.4 Torsionsgelenk

Die Drehachse verläuft parallel zu den Achsen der beiden Glieder.

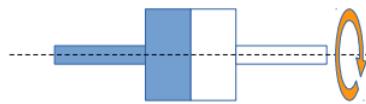


Figure 9.4: Torsionsgelenk

9.4.5 Revolvergelenk

Das Eingangsglied verläuft parallel zur Drehachse, das Ausgangsglied steht im rechten Winkel zur Drehachse.

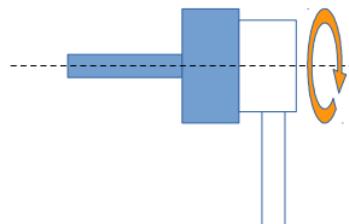


Figure 9.5: Revolvergelenk

9.4.6 Kugelgelenk

Besitzt 3 Freiheitsgrade, wobei die Beweglichkeit stark eingeschränkt ist. Arbeitsbereich der X- und Y-Achse wird durch die Konstruktion auf unter 180 grad limitiert. Die Einkerbung an der Vorderseite lässt an dieser stelle einen 90 grad Winkel zu.



Figure 9.6: Kugelgelenk

9.5 Arbeitsraum

Definition Punkte im 3D-Raum, die von der Roboterhand angefahren werden können.

9.6 Grundtypen von Industrierobotern

9.6.1 Portalroboter

- Steife Struktur \Rightarrow sehr große Arbeitsräume möglich
- Sehr hohe Genauigkeit
- Einfache Steuerung in kartesischen Koordinaten

9.6.2 Horizontal-Knickarmroboter

- **SCARA**: Selective Compliance Assembly Robot Arm
- Aufbau: Ähnlich des menschlichen Arms, horizontaler Gelenkarmroboter
- In der Regel 4 Achsen und Freiheitsgrade $f = 4$
- Hohe Steifigkeit in vertikaler Richtung
- Hohe Geschwindigkeiten möglich

9.6.3 Vertikal-Knickarmroboter

- Klassischer, universell einsetzbarer Industrieroboter
- 4-6 rotatorische Achsen und Freiheitsgrade
- Drei Hauptachsen und drei Nebenachsen

9.6.4 Parallele Roboter

- Bekannt von Flugsimulatoren, Nachbildung der Beschleunigung durch Kippen einer Plattform gegen den Erdbeschleunigungsvektor
- Geschlossene Führungsketten mit fest montierten Antrieben
- Paralleler Roboter, da die Antriebsachsen parallel auf den Endeffektor wirken

Hexapod

- Hohe Stabilität aber geringe Geschwindigkeit
- Aus 6 Linearachsen aufgebaut

Delta-Roboter

- Schnelle Handhabung
- Drei bis vier Gelenkachsen mit stationären Antrieben
- Evtl. Erweiterung mit einer 3-Achs Hand

9.6.5 Leichtbauroboter

- Typ. Massenverhältnis Industrieroboter Last/Eigenmasse: 1:10
- DLR Leichtbauroboter III: Last/Eigenmasse = 1:1

9.7 Effektoren

9.7.1 Endeffektoren

- Arbeitsorgan am Ende eines Roboterarms, mit dem direkt auf ein Werkstück eingewirkt werden kann.
- Angebracht an der entferntesten Stelle einer kinematischen Kette
- **Typen:**
 - Werkzeuge
 - Greifer
 - Prüfmittel
- Zustände der Effektoren werden mit Sensoren erfasst.

9.7.2 Greifersysteme

Ein Griff muss **stabil** sein und **kollisionsfrei** ausgeführt werden können. Objekt darf nicht im Greifer abgleiten oder sich verschieben.

Typen

- **Mechanisch**
- **Vakuum**
- **Magnetisch**

9.7.3 Greifplanung

Ein technischer Griff unterteilt sich in die Sequenzen:

- Herstellen des Kontakts zwischen Greifobjekt und Greifer
- Sichern des Haltens während der Bewegung in allen Richtungen
- Genaues Ablegen des Objekts in der Zielposition und in kürzester Zeit

9.7.4 Greifprinzipien

Formschlüssiger Griff

- Das Objekt liegt lose zwischen den Greifbacken
- Geringe Kräfte auf das Objekt
- Positionserhaltung durch passende Geometrie der Greiferbacken

Stoffschlüssiger Griff

- Zwischen Greifer und Objekt wirken Kräfte in Form von Klebstoffen oder Flüssigkeitsbrücken

Kraftschlüssiger Griff

- Kontakt zwischen Greifer und Objekt durch Punkt- oder Flächenkräfte
- Reibkräfte, Vakuum oder Magnetkräfte
- Aneinander pressen, so dass die Reibungskräfte ein Verschieben der Bauteile gegeneinander verhindern

9.8 Antrieb

9.8.1 Antriebsarten

- Antrieb muss Kräfte und Momente durch das Gewicht der Roboterarme und der Objekte im Effektor kompensieren
- Antrieb besteht aus Motor, Getriebe und Wegmesssystem
- Drei Antriebsarten:
 - pneumatisch
 - hydraulisch
 - elektrisch

9.9 Sensor

Umwandeln einer mechanischen, physikalischen oder chemischen Größe in ein Signal. Gegenteil eines Aktors.

9.9.1 Interne Sensoren

Erfassen interner Zustände des Roboters

- Weg- und Winkelmessung
- Geschwindigkeit

- Batteriespannung

9.9.2 Externe Sensoren

Erfassen von Eigenschaften aus der Umwelt des Roboters.

Passive Sensoren

- Keine störenden Einflüsse in der Umwelt, dafür aber ungenau und umgebungsabhängig

Aktive Sensoren

- Genaue Messungen unter wohldefinierten Bedingungen dafür aber evtl. störende Einflüsse

9.10 Kinematik

Definition Die Kinematik beschreibt nur wie sich ein Körper bewegt und wird daher auch als Bewegungsgeometrie bezeichnet.

9.10.1 Kinematikmodul

- Das Kinematikmodul ist für die Positionierung der Gelenke
- Grundaufgaben

Vorwärtsrechnung: Angeben der Gelenkwinkel durch den Benutzer

Rückwärtsrechnung: Angeben der Pose durch den Benutzer, die der Roboter dann anfährt

Teachen von Punkten und Bahnen

9.10.2 Steuerung und Regelung von Industrierobotern

- Robotersteuerung = Hard- und Software zum korrekten Ansteuern des Manipulators
- Zwei Komponenten: Bewegungssteuerung und Gelenkregelung
 - Steuerung von Effektoren, Berechnung, Steuerung und Überwachung (**Bewegungssteuerung**)
 - Regelung von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung (**Gelenkregelung**)

Anforderung an die Regelung

- Möglichst schnelle Armbewegung
- Kein Abdriften im Ziel
- Kein Überschwingen in Kurven oder im Ziel

9.10.3 Punkt-zu-Punkt Bewegung

Beschreiben einer undefinierten Bahn, die aber bei jeder Wiederholung identisch sein wird.
Schnellste Bewegung zwischen zwei Punkten

Asynchrone PTP: Vollständig unabhängiges Verfahren; Achsen erreichen zu verschiedenen Zeiten das Ziel

Synchrone PTP: Leitachse = Achse mit größter Bahndauer; Geschwindigkeit der anderen Achsen werden so vermindert, dass alle Achsen gleichzeitig im Ziel angekommen; Ziel: Reduktion der mech. Belastung

Vollsynchronre PTP: Gleiche Bahn-, Beschleunigungs- und Bremszeiten für jedes Gelenk.

Linearbewegung

- Angabe von Anfangs- und Endpunkt
- Kürzeste Verbindung von zwei Punkten, aber nicht die Schnellste.

Kurvenbahn

- Angabe von Anfangs-, Zwischen- und Endpunkt
- 3 Stützpunkte, die exakt angefahren werden, beschreiben eine eindeutige Kurvenbahn.
- Exakte Kreisbahn kann problemlos beschrieben werden

9.10.4 Überschleifen

- Mechanischer Verschleiß wird verringert
- Reduktion des Energieverbrauchs

Geschwindigkeitsüberschleifen Das Verfahren zum nächsten Bahnsegment wird erst begonnen, wenn eine definierte Geschwindigkeit überschritten wird.

Positionsüberschleifen Das Verfahren zum nächsten Bahnsegment wird erst begonnen, wenn eine definierte Entfernung zum Zwischenpunkt unterschritten wird.

Positioniergenauigkeit Abweichung der Ist-Position von der Soll-Position: Zielsicherheit; absolutes Genauigkeitsmaß

Wiederholgenauigkeit Streuung der Ist-Position bei mehrmaliger Anfahrt aus derselben Richtung; relatives Genauigkeitsmaß.

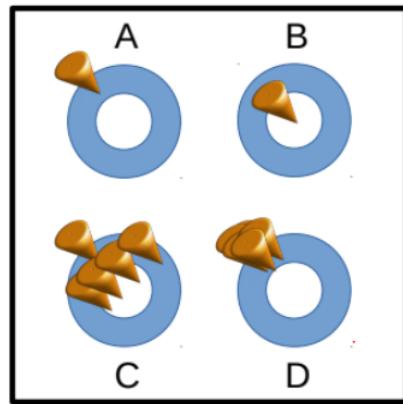


Figure 9.7: Absolut- vs. Wiederholgenauigkeit. A = schlechte AG, B = gute AG, C = schlechte WG, D = gute WG \Rightarrow Kombination aus B und D

9.10.5 Programmierung

Direkte Verfahren - Online Programmierung

- Teach-In Verfahren
- Play-back Verfahren; Programmierer fährt eine Bahn ab, die dann vom Roboter wiederholt wird;
- Master-Slave System; Bediener führt einen Masterarm; Bewegung wird vom Slave simultan kopiert
- CAD-Basiert

Indirekte Verfahren - Offline Programmierung

- Textuelle Programmierung
- Graphische Simulation auf Basis CAD
- Akustische Programmierung, daher Sprachsteuerung
- Aufgabenorientierte Programmierung; Roboter kann Aufgaben erledigen; Programmierer startet Aufgaben

9.11 Kinetic - Berechnungen

9.11.1 Rotationsmatrizen

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

Figure 9.8

Rotationsmatrix:

$${}^j R_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

ZYX-Euler Winkel (α, β, γ) :

$${}^j R_i = \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\beta) & c(\alpha)s(\beta)s(\gamma) - s(\alpha)c(\gamma) & c(\alpha)s(\beta)c(\gamma) + s(\alpha)s(\gamma) \\ s(\alpha)c(\beta) & s(\alpha)s(\beta)s(\gamma) + c(\alpha)c(\gamma) & s(\alpha)s(\beta)c(\gamma) - c(\alpha)s(\gamma) \\ -s(\beta) & c(\beta)s(\gamma) & c(\beta)c(\gamma) \end{pmatrix}$$

Quaternionen (e_0, e_1, e_2, e_3) :

$${}^j R_i = \begin{pmatrix} 1 - 2(e_2^2 + e_3^2) & 2(e_1e_2 - e_0e_3) & 2(e_1e_3 + e_0e_2) \\ 2(e_1e_2 + e_0e_3) & 1 - 2(e_1^2 + e_3^2) & 2(e_2e_3 - e_0e_1) \\ 2(e_1e_3 - e_0e_2) & 2(e_2e_3 + e_0e_1) & 1 - 2(e_1^2 + e_2^2) \end{pmatrix}$$

Figure 9.9

ZYX-Euler Winkel (α, β, γ) :

$$\beta = \text{Atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$$

$$\alpha = \text{Atan2}\left(\frac{r_{21}}{\cos(\beta)}, \frac{r_{11}}{\cos(\beta)}\right)$$

$$\gamma = \text{Atan2}\left(\frac{r_{32}}{\cos(\beta)}, \frac{r_{33}}{\cos(\beta)}\right)$$

Quaternionen (e_0, e_1, e_2, e_3) :

$$e_0 = \frac{1}{2}\sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}}$$

$$e_1 = \frac{r_{32} - r_{23}}{4e_0}$$

$$e_2 = \frac{r_{13} - r_{31}}{4e_0}$$

$$e_3 = \frac{r_{21} - r_{12}}{4e_0}$$

Figure 9.10

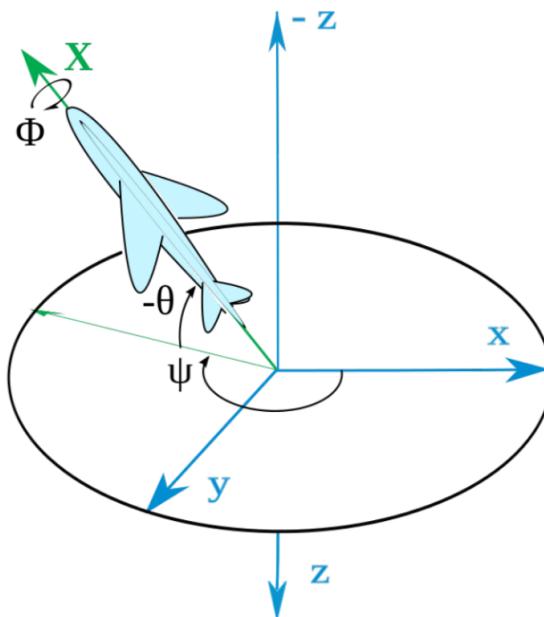
Umwandlung ZYX-Euler Winkel in Quaternionen und zurück

Figure 9.11

Euler Winkel Die Pose des Effektors besteht aus:

- XYZ-Koordinaten
- Orientierung (z.B. im Euler Format)

Homogene Transformation //TODO

9.11.2 Vorwärts Transformation

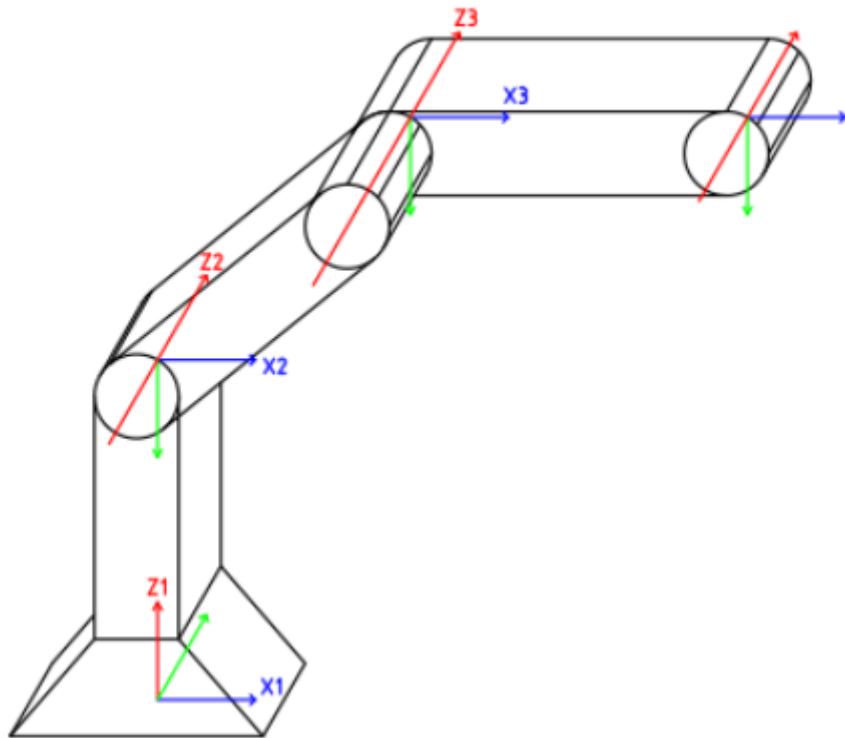


Figure 9.12: Franzkescher 3-Achs Roboter

Bestimmung der Position und Orientierung des Endeffektors anhand der Achswinkel Annahmen:

- XYZ_0 liegt auf XYZ_1
- Die z_i -Achse verläuft entlang der Gelenkachse
- Die x_{i-1} entlang der Normalen zwischen z_{i-1} und z_i
- Die Koordinatensysteme werden seriell transformiert
- ${}^0T_3 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3$

9.11.3 Modifizierte Denavit-Hartenbert Transformation

TODO Really?

9.11.4 Inverses kinematisches Problem

Es gibt mehrere Achsstellungen, die zur gleichen Pose führen würden.

9.11.5 Bestimmung der Achswinkel anhand der Position und Orientierung des Endeffektors

- Bei Robotern mit mehr als sechs Freiheitsgraden ist jede Stellung mehrdeutig.

- Es muss geprüft werden, ob eine gewünschte Position erreichbar ist:

Stellung nicht erreichbar, da Punkt im Raum zu weit entfernt ist.

Unzulässige Positionen, die außerhalb eines zulässigen Achsbereichs liegen

Kollision mit Objekt

- Singularitäten: Berechnung der Achsstellungen nicht möglich

Konfigurationssingularität Beispielweise kann die Drehung einer Achse durch eine andere kompensiert werden. Daher Abhilfe durch Vermeidung von 180deg Stellungen.

Bewegungssingularität Beispielweise müsste beim Verfahren durch einen Punkt eine Achsdrehung mit unendlich hoher Geschwindigkeit erfolgen.

Algebraische Methoden Finden von passenden Gleichungssystemen für jedes Gelenk, beispielsweise der Form: $A\cos(\theta_i) + B\sin(\theta_i) + C = 0$ $A\sin(\theta_i) - B\cos(\theta_i) + D = 0$

Geometrische Methoden Lässt sich in der Robotergeometrie ein Punkt finden, an dem Position und Orientierung getrennt betrachtet werden können.

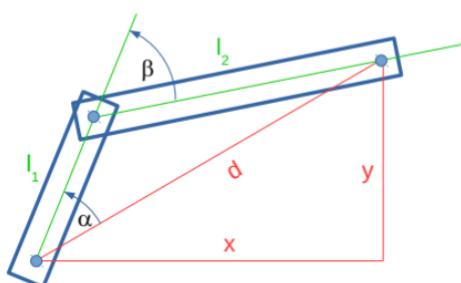


Figure 16: Beispiel zur geometrischen Rückwärtsrechnung mit zwei Achsen

Lösung mit Hilfe des Cosinussatz:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos(\alpha)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos(\beta)$$

Hier:

$$l_2^2 = l_1^2 + d^2 - 2l_1d \cos(\alpha)$$

$$l_1^2 = l_2^2 + d^2 - 2l_2d \cos(\alpha')$$

Mit α' liegt gegenüber α

$$\beta' = 180^\circ - \alpha - \alpha'$$

Figure 9.13

Voraussetzungen für die Anwendung dieser Methoden

- drei aufeinander folgende, sich in einem Punkt schneidende Rotationsachsen
- drei aufeinander folgende parallele Rotationsachsen (z.B. SCARA)

Numerische Methoden

- Berechnung der Achstellungen mit Hilfe von Näherungsverfahren
- Von einem Startpunkt müssen die Koordinaten und Gelenkkoordinaten bekannt sein
- Mit Hilfe der **Jacobi-Matrix** lässt sich anschließend die Gelenkkonfiguration eines naheliegenden Punktes bestimmen
- Verfahren zur Rückwärtsrechnung in Echtzeit eher ungeeignet

9.11.6 Koordinatensysteme

Alle Koordinatensysteme werden als kartesische Rechtssysteme angenommen.

- Weltkoordinaten \Rightarrow Fest mit der Welt verbunden
- Basiskoordinaten \Rightarrow Fest mit dem Sockel des Roboters verbunden.
- Handflanschkoordinaten \Rightarrow Relativ zu den Basiskoordinaten
- Werkzeugkoordinaten \Rightarrow Relativ zu den Handflanschkoordinaten
- Anwenderkoordinaten \Rightarrow Relativ zu Welt- oder Basiskoordinaten
- Werkstückkoordinaten \Rightarrow Mit Werkstück verbunden, relativ zu Anwenderkoordinaten

9.12 Safety

9.13 Roboterprogrammierungen

9.13.1 Programmierung in RAPID

Ein RAPID Programm besteht aus einem oder mehreren Tasks:

- Mindestens ein **Motion Task**
- Eventuell zusätzliche Background Tasks

Konfigurationsmöglichkeiten für einen Task

- **Task in foreground:** Der Task wird erst ausgeführt, wenn der Eltern-Task im Zustand Idle ist
- **Type:**

NORMAL: Task reagiert auf START/STOP und NOT-Aus

STATIC: Läuft bei Neustart an der aktuellen PZ-Position weiter; Reagiert nicht auf START/STOP und NOT-Aus

SEMISTATIC: PZ Rücksetzen bei Neustart; Sonst wie STATIC

9.13.2 Syntax

```

MODULE HAWMain

    PROC main()
        VAR num chosenFunction; !Var decl. am Anfang!!!
        ...
    ENDPROC
    ...
ENDMODULE

```

Figure 9.14

Routinen können Prozeduren, Funktionen oder Traps sein.

Parameterübergabe

- Reguläre Par: **PROC moveToXY(num par1)**
- Optionale Par.: **PROC moveToXY(\num par1)**

Switches

- Switches sind immer optional
- Mehrere Switches sind möglich

```

PROC SwitchTest(\switch on \switch off \switch middle)
    IF Present(middle) THEN
        TPWrite "Middle on";
    ENDIF
    IF Present(off) THEN
        TPWrite "Off on";
    ENDIF
    IF Present(on) THEN
        TPWrite "On on";
    ENDIF
ENDPROC

```

Figure 9.15

Prozedurdeklaration

```

PROC arrayCopy(VAR num arr1[*], VAR num arr2[*])
    FOR i FROM 1 TO dim(arr1, 1) DO
        arr2{i} := arr1{i};
    ENDFOR
ENDPROC

```

Figure 9.16

Funktionsdeklaration

```

FUNC num sum(num arg1, num arg2)
    RETURN arg1 + arg2;
ENDFUNC

```

Figure 9.17

Trapdeklaration

```

TRAP exceptionHandler
    handleExceptionTheRightWay;
    RETURN;
ENDTRAP

```

Figure 9.18

Routinen Aufruf

```

VAR num a1{3} := [1, 2, 3];
VAR num a2{3} := [0, 0, 0];

TPWrite NumToStr(a2{1}, 2);
TPWrite NumToStr(a2{2}, 2);
TPWrite NumToStr(a2{3}, 2);

arrayCopy a1, a2;

TPWrite NumToStr(a2{1}, 2);
TPWrite NumToStr(a2{2}, 2);
TPWrite NumToStr(a2{3}, 2);

TPWrite NumToStr(sum(12,24), 2);

```

Figure 9.19

Datentypen

- Jeder Datentyp ist Value- oder Non-Value
- Atomarer Datentyp
- Zusammengesetzter Datentyp
- Alias
- Signal - Ausnahme Semi-Value

Abfragen Wertbasiert, daher 0,1

Initialisierung und Zuweisung: Set, Reset, PulseDO, SetGO

```
VAR num globaleZahl := 42;
TASK VAR num imTaskGueltigeZahl := 23;
LOCAL VAR num lokaleUnwichtigeZahl := 13;
VAR pos pHome1 := [300, 300, 300];
```

Figure 9.20

Persistente Bsp.: *PERS pos pHome1 := [300, 300, 300];*

- Bleiben auch unter folgenden Umständen erhalten
 - Reboot
 - Open, Close, New Programm
 - Start - Move PP to main
 - Start - Move PP to routine
- Können nur auf Modulebene deklariert werden
- Können auf einen Wert initialisiert werden, aber keine erneute Initialisierung bei Reboot

Konstanten Bsp.: *CONST num euler := 2.7182;*

9.13.3 Bewegungsfunktionen

Move Absolute Joint

- Syntax: MoveAbsJ ToJointPos, Speed, Zone, Tool
- Beispiel: MoveAbsJ pHome1, vMax, fine, tool0;

Move Joint

- Syntax: MoveJ ToPoint, Speed, Zone, Tool
- Beispiel: MoveJ p10, vMax, fine, tool0;

Move Linear

- Syntax: MoveL ToPoint, Speed, Zone, Tool
- Beispiel: MoveL p10, vMax, fine, tool0;

Move Circularly

- Syntax: MoveC CirPoint, ToPoint, Speed, Zone, Tool
- Beispiel: MoveC p10, p20, vMax, fine, tool0;

9.13.4 World Zones

Es ist nötig den Roboter vor Programmausführung in eine definierte Position zu bringen. Programmierer ist für die einschränkung der Bewegungen des Roboters verantwortlich, sodass kein schaden entsteht bspweise durch Kollision. Diese Zone kann sein:

- eine Kugel
- ein Zylinder
- Quader/Box
- festgelegte Bereiche bei den Achswinkeln

Bei Eintritt des Tool Center Points (TCP) in den definierten Weltzonenbereich kann ein Signal gesetzt werden, das mit Hilfe der Software weiterverwendet werden kann. Die benötigten Befehle für eine Kugelbereich sind *WZSphDef* und *WZDOSet*. Das gesetzte Signal ist hier *dolnHome1*, das vorher als IO-Signal definiert wurde.

MODULE BGTask

```

VAR wzstationary service;
CONST robtarget pHome1:=[[374.00,0.00,630.00],[0.707107,2.28879E-15,0.707107,1.6149E
[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
PROC startup()
    VAR shapedata volume;
        WZSphDef \Inside, volume, pHome1.trans, 50;
        WZDOSet \Stat, service \Inside, volume, dolnHome1, 1;
ENDPROC
ENDMODULE

```

Figure 9.21

9.13.5 Bildschirmein- und -ausgabe

Die TP-Funktionen bieten die Möglichkeit einer einfachen Bildschirmausgabe und eingabe. Mögliche Befehle sind **TPReadDnum**, **TPReadFK**, **TPReadNum** und **TPWrite**.

9.13.6 Zeitmessung

- ClkReset - Zurücksetzen / Löschen eines Timers
- ClkStart
- ClkStop
- ClkRead - Auslesen eines (abgelaufenen) Timers

```

PROC MoveZero()
    VAR num diffTime;
    ClkReset timer1;
    ClkStart timer1;
    MoveAbsJ jzero, vmax, fine, tool0;
    ClkStop timer1;
    diffTime := ClkRead(timer1);
    TPWrite "Gemessene Zeit: " + NumToStr(diffTime, 2) + "s"
ENDPROC

```

Figure 9.22

9.13.7 Bewegung relativ

Um die Anzahl der Teachpunkte möglichst gering zu halten, empfiehlt es sich, wenn möglich, weitere Punkte relativ zu anderen Punkten anzugeben.

⇒ Befehl **Offs**, mit dem die Positionskomponente eines Punktes einfach modifiziert werden kann.

VAR robtarget p10 := Offs(pHome, X, Y, Z)

10 Prüfungsfragen (Schiedermeier)

Wie viele Freiheitsgrade besitzt ein Flugzeug 2, 3, 4, 5, 6 (6)

Wie viele Freiheitsgrade besitzt ein Bodenfahrzeug 2 Translatorische und 1 Rotatorischen

Was sind die Vorteile der Subsumption Architektur (multiple choice)

- Die einzelnen Verhalten sind unabhängig voneinander (true)
- Die einzelnen Verhalten sind einfach und leicht zu modellieren (true)
- Es existiert ein umfangreicher Gesamtplan (false)
- Auch mit wachsender Anzahl der Verhalten ist das Gesamtsystem leicht überschaubar und kombinierbar (false)

Für Schwarmrobotik wurden folgende Aussagen formuliert: Wählen Sie die richtigen Antworten aus

- Robertschwärme bestehen aus wenigen, einzelnen Agenten (false)
- Alle Tiere im Schwarm interagieren innerhalb eines fixen Radius (false)
- Schwarmintelligenz wird zur Lösung schwieriger Optimierungsprobleme eingesetzt (true)
- Die einzelnen Roboter im Schwarm besitzen ein einfaches Verhalten (true)
- Jeder einzelne Roboter im Schwarm benutzt auch globale Informationen (false)
- Jeder einzelne Roboter im Schwarm trifft Entscheidungen aufgrund lokaler Informationen (true)
- Das Kollektiv ist intelligenter als das Individuum (true)

Topologische Karten sind gut zur Pfadplanung geeignet, weil viele geeignete Algorithmen für Graphen existieren? Wahr oder falsch? Wahr bsp. Dijkstra, A*

Als Landmarken eignet sich alles, was von unterschiedlichen Positionen aus gut sichtbar ist Wahr

Was sind künstliche Landmarken (multiple choice)

- Fest verbaute Schränke (false)
- farbige Elemente wie z.B. gelbe Tore beim RoboCup (true)
- Ampeln (true)

- Wände (false)
- Peilsender (true)
- Türen (false)
- Barcodestreifen (true)

Zur exakten Positionsbestimmung benötigt der Roboter eine bestimmte Anzahl Landmarken. Wie viele sind es? Landmarken ≥ 2

Wie viele Stützfüße sind notwendig, damit ein Stützpolygon für den Massenschwerpunkt aufgebaut werden kann? 2s

Warum sind beim Dijkstra Algorithmus keine negativen Kantengewichte erlaubt?

Nach welchen Regeln bewegen sich Agenten im Schwarm?

In welcher Reihenfolge werden beim Dijkstra Algorithmus die Knoten aus der Warteschlange entnommen?

Beschreiben Sie mit eigenen Worten das Vorgehen beim Sichtgraph Algorithmus. Welche Nachteile bringt diese Methode mit?

Welche Nachteile haben Voronoi Diagramme gegenüber dem Sichtgraph Algorithmus? (multiple choice)

- Die Planung kann ineffiziente Wege erzeugen. (true)
- Die Wege führen wie beim Sichtgraph Algorithmus nahe an den Hindernissen. (false)
- Bei Voronoi-Diagrammen werden große Freiflächen nur durch wenige Ecken und Verbindungen aufgespannt. (true)
- Der Graph enthält wie beim Sichtgraph Algorithmus viele nutzlose Kanten (false)

Warum finden Bug Algorithmen selten den optimalen Weg zum Ziel?

Laufroboter haben Vorteile gegenüber mobilen Robotern auf Rädern

- Beine kommen mit (einzelnen oder mehreren) Trittstellen aus. (**einzelnen**)
- Beine können über (Geroll und Löcher oder größere Felsbrocken) steigen. (**Geroll und Löcher**)
- Beine kompensieren Unebenheiten durch Anpassung der (Schrittzahl oder Schritthöhe und -länge). (**Schritthöhe und-länge**)