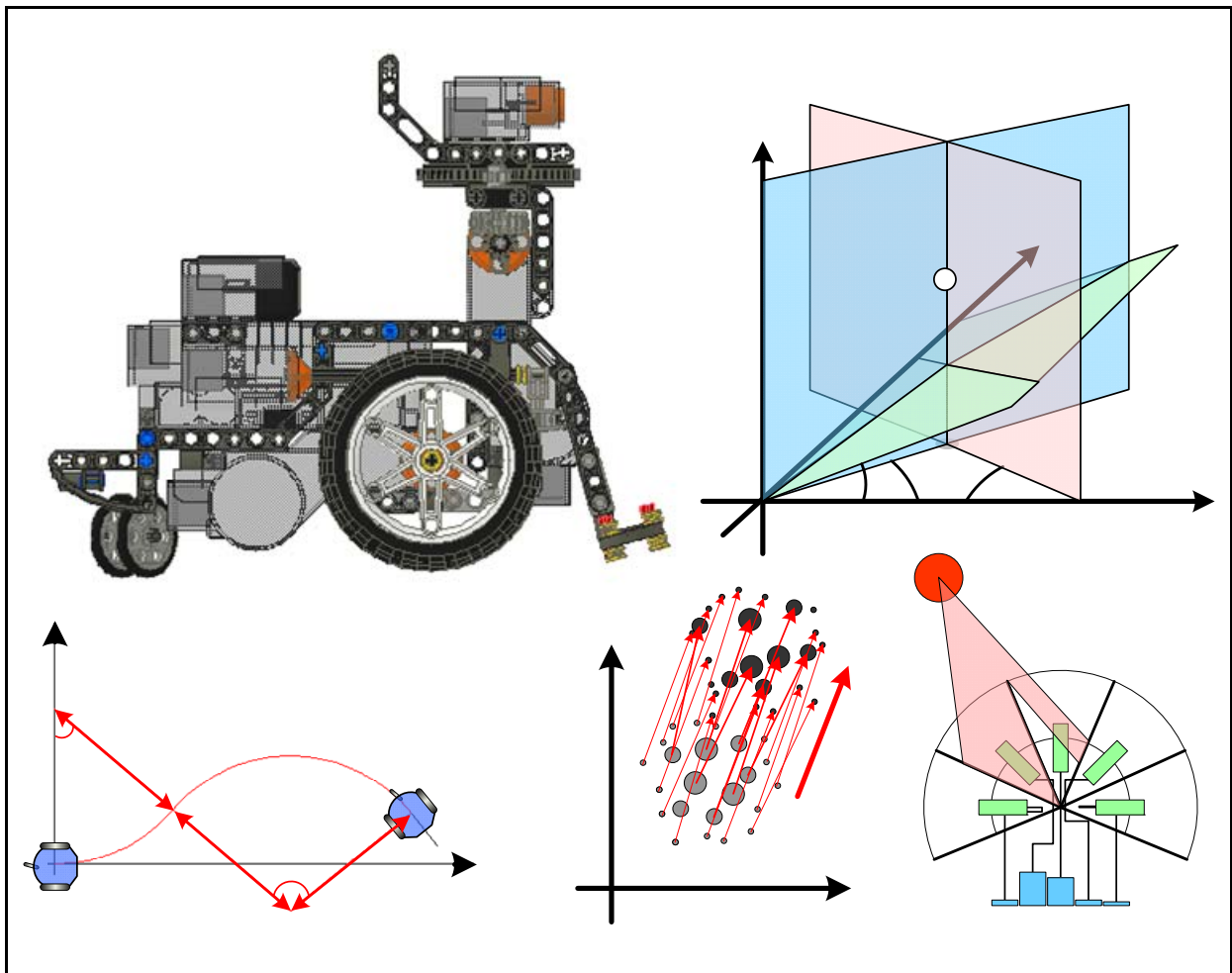


Selbstlokalisierung

Jörg Roth



Selbstlokalisierung

Prof. Dr. habil. Jörg Roth
Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg
Fakultät Informatik
Hohfederstraße 40
90489 Nürnberg

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung der Texte und Abbildungen, auch auszugsweise, ist ohne die schriftliche Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und daher strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen. Es wird darauf hingewiesen, dass die hier verwendeten Soft- und Hardware-Bezeichnungen sowie Markennamen und Produktbezeichnungen der jeweiligen Firmen im Allgemeinen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz unterliegen. Alle Angaben und Programme wurden mit größter Sorgfalt kontrolliert. Der Autor kann jedoch nicht für Schäden haftbar gemacht werden, die in Zusammenhang mit der Verwendung dieser Publikation stehen.

Inhalt

Kapitel 1: Einleitung.....	4
Kapitel 2: Basisverfahren zur Lokalisierung	11
Kapitel 3: Sensorik	26
Kapitel 4: Sensordatenfusion	35
Kapitel 5: Umgebungsmodelle	52
Kapitel 6: Antriebskonfigurationen	64

Selbstlokalisierung

SS2011

Kapitel 1

Einleitung

Kapitel 1: Einleitung

Ziel: Einleitung in die Funktion der Selbstlokalisierung



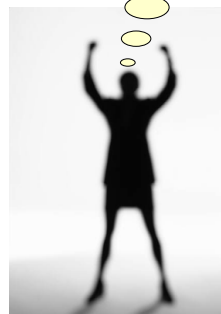
- Einleitung und Motivation
- Ebenen der Positionsbestimmung

Positionsbestimmung

Für viele Szenarien ist es interessant die Position eines Objektes oder einer Person zu kennen

- Mobile Personen insb. Fußgänger
- Fahrzeuge
 - von Personen gesteuerte
 - autonome Systeme
- Kleine Geräte
 - Game-Controller
 - Medizinische Operationswerkzeuge

Wo bin ich???



Kapitel 1, Folie 3

Jörg Roth

Größenordnungen der Positionsbestimmung



Positionsbestimmung außerhalb...



...in Gebäuden...



... und in noch kleinerem Maßstab

Kapitel 1, Folie 4

Jörg Roth

Größenordnungen der Positionsbestimmung

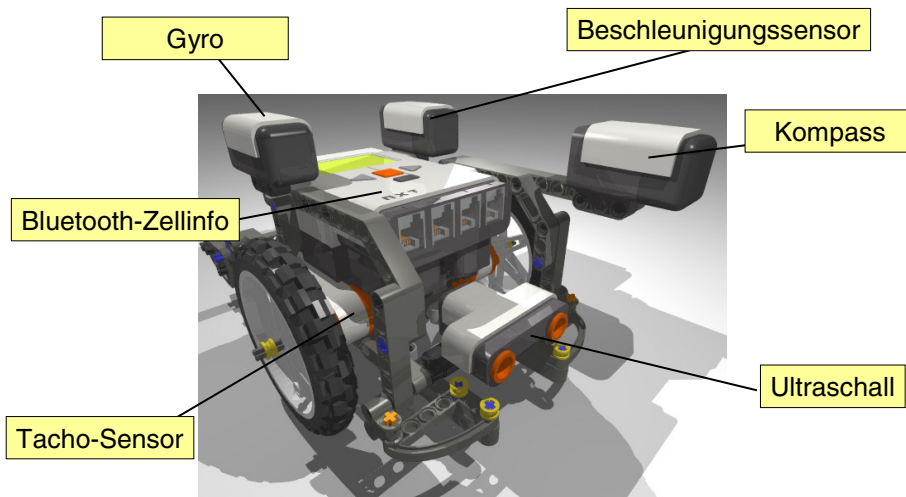
Ortsbezogene Dienste:

- Positionen liegen in der Regel außerhalb von Gebäuden
- Position von Interesse ist in der Regel die Position von mobilen Benutzern oder Kraftfahrzeugen
- In der Regel: Satellitennavigation

In dieser Veranstaltung interessieren wir uns für ein anderes Szenario:

- kleinerer Maßstab
- *keine* absolute Positionsbestimmung über Satelliten
- Position von Interesse ist autonomes Fahrzeug

Ein autonomes Fahrzeug



Einige Positionssensoren von *Brutus*

Selbstlokalisierung

Wir verstehen unter Selbstlokalisierung

- Die automatische, autonome Positionsbestimmung
- eines mobilen Objektes
- auf der Basis von Sensorinformationen
- und Umgebungsmodellen

Mit Kenntnis der Position können Aufgaben ausgeführt werden:

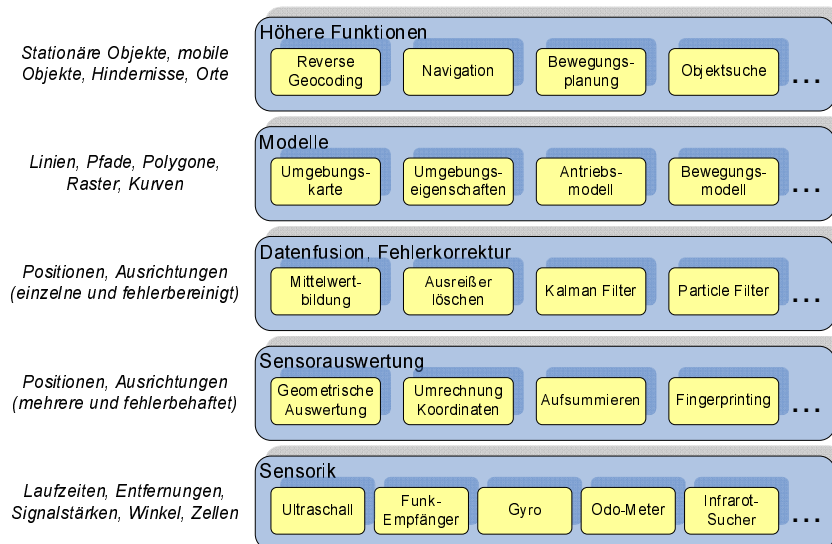
- Zu einem bestimmten Punkt navigieren
- Gegenstände transportieren
- etc.



Kapitel 1, Folie 7

Jörg Roth

Ebenen der Positionsbestimmung



Kapitel 1, Folie 8

Jörg Roth

Ebenen der Positionsbestimmung

Sensorik:

- Messung physikalischer Phänomene, die mit der Position im Zusammenhang stehen
- Beispiel: Signallaufzeiten, Signalstärken, Empfangswinkel
- Messungen können noch nicht *direkt* verwendet werden

Höhere Funktionen

Modelle

Datenfusion, Fehlerkorrektur

Sensorauswertung

Sensorik

Sensor-Auswertung:

- Informationen aus den Sensoren können zu Position und Ausrichtung verrechnet werden
- Beispiel: Zurückgelegter Fahrweg und -richtung können zu einer neuen Position verrechnet werden

Kapitel 1, Folie 9

Jörg Roth

Ebenen der Positionsbestimmung

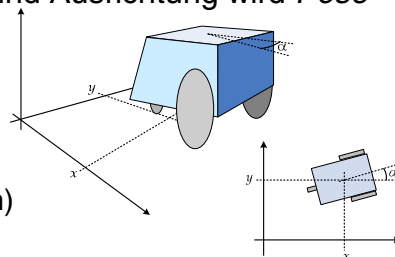
- Sensoren produzieren u.U. widersprüchliche Positions- und Ausrichtungsangaben

- Beispiel:

- der Gyro-Sensor sagt "Drehung um 85° ",
- der Tacho-Sensor sagt "Drehung um 95° "
- in Realität wurde um 90° gedreht

- Die Kombination aus Position und Ausrichtung wird *Pose* genannt

- Häufig 2D-Position (Bewegung auf der Ebene)
- *Gier-Winkel* (z.B. Ausrichtung nach Norden)



Höhere Funktionen

Modelle

Datenfusion, Fehlerkorrektur

Sensorauswertung

Sensorik

Kapitel 1, Folie 10

Jörg Roth

Ebenen der Positionsbestimmung

Datenfusion und Fehlerkorrektur:

- Die u.U. noch mehreren Posen werden zu einer einzelnen verrechnet
- Beispiele:
 - Man berechnet den gewichteten Mittelwert aller Posen – die verlässlichen Angaben werden höher gewichtet
 - Man löscht solche Angaben, die nicht richtig sein können, da beispielsweise eine unmöglich hohe Geschwindigkeit notwendig ist
 - *Statistische Filter* berechnen die *wahrscheinlichste* Pose anhand eines statistischen Modells

Höhere Funktionen

Modelle

Datenfusion, Fehlerkorrektur

Sensorauswertung

Sensorik

Kapitel 1, Folie 11

Jörg Roth

Ebenen der Positionsbestimmung

Modelle:

- Die Umgebung, der Antrieb und Bewegungen werden modelliert
- Primitive: Kurven, Vektoren, Raster, Polygone
- Modelle unterstützen die Positionsbestimmung
- Beispiele für Modellinformationen:
 - Ein Robot kann nicht die Wand durchdringen
 - Ein Auto befindet sich wahrscheinlich auf einer Straße
 - Je nach Antriebskonfiguration sind sehr enge Kurven unmöglich

Höhere Funktionen

Modelle

Datenfusion, Fehlerkorrektur

Sensorauswertung

Sensorik

Kapitel 1, Folie 12

Jörg Roth

Ebenen der Positionsbestimmung	
<p>Höhere Funktionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Man interessiert sich hier für Objekte der realen Welt • Beispiel: Robotfußball <ul style="list-style-type: none"> ▪ Torregion, Gegner, Mitspieler, Spielball • Funktionen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Welche Objekte befinden sich an einer Position (<i>Reverse Geocoding</i>)? ▪ Wie navigiert man zu einem Ziel? ▪ Wo befindet sich der Spielball? 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Höhere Funktionen</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Modelle</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Datenfusion, Fehlerkorrektur</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Sensorauswertung</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Sensorik</div>
Kapitel 1, Folie 13	Jörg Roth

Ebenen der Positionsbestimmung	
<p>Weiteres Vorgehen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kapitel 2 behandelt die <i>Grundlagen der Sensorik</i> und die <i>Sensor-Auswertung</i> • <i>Konkrete Sensoren</i> werden in Kapitel 3 behandelt • Kapitel 4: Verfahren zur Sensordatenfusion • Kapitel 5: Umgebungsmodelle • Kapitel 6: Antriebskonfigurationen 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Höhere Funktionen</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Modelle</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Datenfusion, Fehlerkorrektur</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Sensorauswertung</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Sensorik</div>
Kapitel 1, Folie 14	Jörg Roth

Selbstlokalisierung

SS2011

Kapitel 2

Basisverfahren zur Lokalisierung

Kapitel 2: Basisverfahren zur Lokalisierung

Ziel: Vermitteln der Grundlagen zur sensor-
gestützten Positionsbestimmung



- Prinzipien und Ansätze der sensorgestützten Positionsbestimmung
- Methoden der geometrischen Auswertungen

Positionssensorik

Man unterscheidet unterschiedliche Ansätze:

- *Tracking*: die Position wird von einem Sensornetzwerk ermittelt, das sich nicht am bewegten Objekt befindet. Das Objekt von Interesse hat eine Eigenschaft, die von Sensoren erfasst werden kann.
 - Beispiel: Infrarotball, der über einen Infrarot-Sucher gefunden werden kann
- *Positioning*: Das bewegte Objekt ermittelt die Position selbst anhand von Sensoren, die sich am Objekt befinden.
 - Beispiel: Roboter mit Wegmessung und Kompass

Positionssensorik

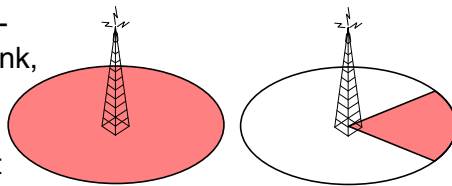
Die Positionsbestimmung durch die Sensorik kann auf einige wenige Prinzipien zurückgeführt werden

- Messung eines lokal begrenzten Effektes
- Winkelmessung eines eintreffenden Signals
- Messung von Laufzeiten
- Messung der Signalstärke
- Messung der Beschleunigung
- Mechanische Wegstreckenmessung

Lokale Effekte

Messung eines lokal begrenzten Effektes

- Es gibt physikalische Effekte, die nur eine begrenzte Ausbreitung haben
- Wenn man diese Effekte misst und darüber hinaus weiß, wo dieser Effekt ausgelöst wurde, kann man grob seine Position ermitteln
- Beispiele:
 - Funkzellen von Kommunikationsverfahren (Mobilfunk, WLAN, Bluetooth). Hier wird der Begriff *COO* (*Cell of Origin*) verwendet



Kapitel 2, Folie 5

Jörg Roth

Lokale Effekte

- Erkennen von Deckenlampen
 - Vorhandensein einer Wand, die mechanische abgetastet wurde
-
- Das Diagramm zeigt eine 3D-Perspektive eines Raumes. Eine gelbe Deckenlampe ist an der Decke montiert und wirft einen gelben Lichtkegel auf den Boden. Eine Wand ist rot gefärbt, was darauf hindeutet, dass sie mechanisch abgetastet wurde. Die Decke ist blau und der Boden ist hellblau.
- Man kann die Position nur bis auf die Ausbreitungsgröße des Effektes genau bestimmen
 - in der Regel nicht sehr genau
 - nur in Kombination mit anderen Verfahren sinnvoll

Kapitel 2, Folie 6

Jörg Roth

Winkelmessung

Winkelmessung eines eintreffenden Signals (engl. *Angle of Arrival, AOA*)

- Bei geradliniger Ausbreitung von Signalen kann man messen, unter welchem Winkel sie eintreffen
- Nach diesem Prinzip navigiert man mit Hilfe von Leuchttürmen
- Auch Radar-Anlagen arbeiten nach diesem Prinzip
 - Problem: drehende Antenne für mobilen Einsatz ungeeignet

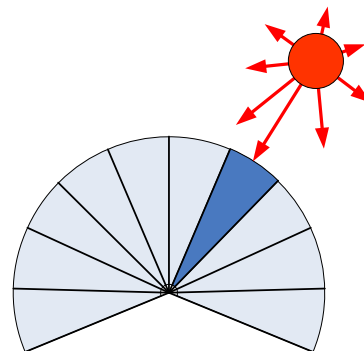
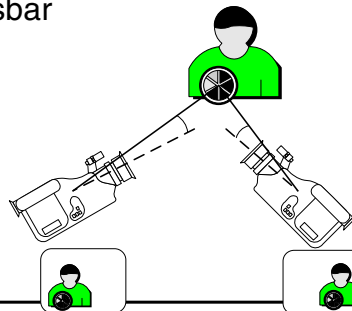


Kapitel 2, Folie 7

Jörg Roth

Winkelmessung

- Beispiele:
 - Array-Funk-Antennen
 - Infrarot-Array
 - Auswertung von Video-Bildern
- Winkel sind in der Regel nur in bestimmten Raster-Stufen messbar



Kapitel 2, Folie 8

Jörg Roth

Laufzeitmessung

Messung von Laufzeiten (engl. *Time of Arrival, TOA*)

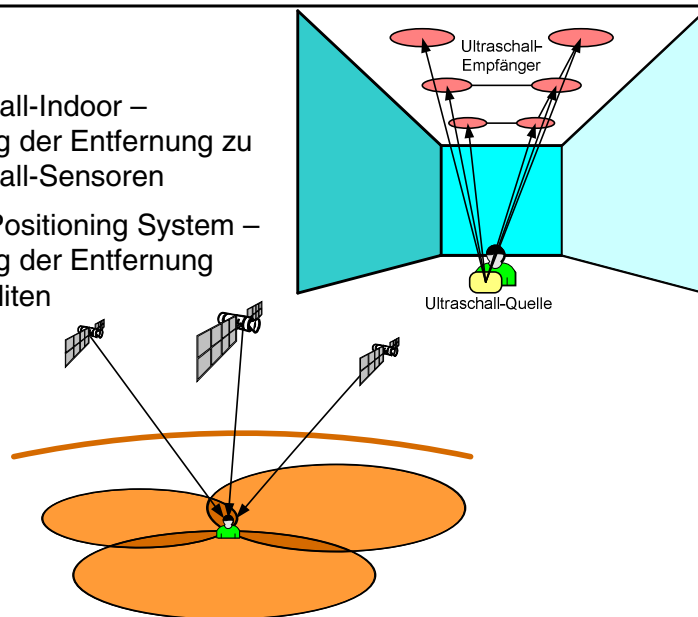
- Die Laufzeit von Signalen kann man relativ genau messen
- Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit und bei bekanntem Aussendezeitpunkt kann man die Entfernung zur Signalquelle berechnen
- Mögliche Signale:
 - Funk und Licht: ca. 300 000 km/s
 - Ultraschall: ca. 343 m/s

Kapitel 2, Folie 9

Jörg Roth

Laufzeitmessung

- Beispiele:
 - Ultraschall-Indoor – Messung der Entfernung zu Ultraschall-Sensoren
 - Global Positioning System – Messung der Entfernung zu Satelliten



Kapitel 2, Folie 10

Jörg Roth

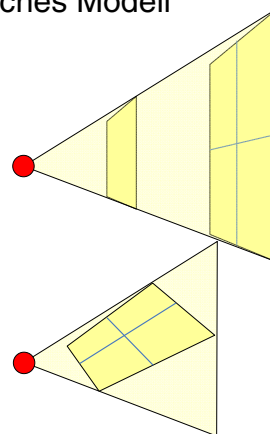
Signalstärke

Messung der Signalstärke

- Signale schwächen sich mit dem Abstand ab, d.h. die empfangene Signalstärke ist ein Maß für den Abstand
- Probleme:
 - die Sendesignalstärke ist häufig unbekannt
 - die Signalstärke wird auch von Umgebungsbedingungen (insb. durch Hindernisse) beeinflusst und nicht nur durch den Abstand
- Beispiele:
 - Signalstärke von Funksignalen
 - Signalstärke von Infrarotsignalen

Signalstärke

- Um direkt von der Signalstärke auf den Abstand schließen zu können, ist ein physikalisches Modell notwendig
 - die Beleuchtungsstärke nimmt quadratisch mit dem Abstand ab
 - hängt aber unglücklicherweise auch von der Ausrichtung des Empfangssensors zur Lichtquelle ab



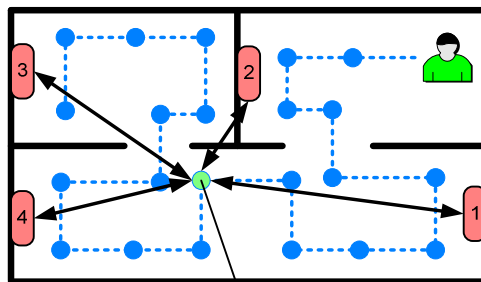
Signalstärke

- Bei Funk nimmt die Wirkung idealisiert auch mit dem Quadrat des Abstandes ab
- In Außenbereichen: reale Abnahme mit der vierten Potenz
Grund: Gelände, Gebäude, Reflexionen, Störquellen
- Mögliche Lösung: *Fingerprinting*
 - In einer *Trainingsphase* nimmt man von hinreichend vielen *bekannt* Positionen ein Signalstärke-Profil auf
 - In der *Positionierungsphase* misst man ein Profil und sucht dasjenige trainierte Profil, das am besten passt

Kapitel 2, Folie 13

Jörg Roth

Fingerprinting



x/ m	y/ m	d/ ^o	SS ₁ / dBm	SS ₂ / dBm	SS ₃ / dBm	SS ₄ / dBm
1.0	3.5	0	20	10	18	25
2.0	3.5	90	25	15	17	25
2.5	3.0	90	15	18	16	16
2.5	1.5	180	6	35	18	20
2.0	2.5	0	12	10	22	14
...

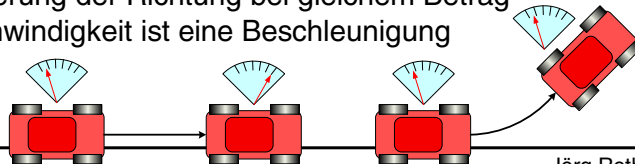
Kapitel 2, Folie 14

Jörg Roth

Beschleunigung

Messung der Beschleunigung

- Eine *Beschleunigung* ist physikalisch messbar und kann in elektrische Signale umgewandelt werden
- Kein "Kontakt" zur Umgebung notwendig
- Eine Beschleunigung ist physikalisch *jede* Änderung der Geschwindigkeit eines Körpers
 - nicht nur Zunahme der Geschwindigkeit (umgangssprachliche "Beschleunigung"), sondern auch Abnahme ("Bremsen")
 - auch Änderung der Richtung bei gleichem Betrag der Geschwindigkeit ist eine Beschleunigung



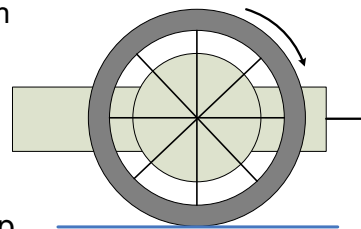
Kapitel 2, Folie 15

Jörg Roth

Wegstreckenmessung

Mechanische Wegstreckenmessung

- Eine *gleichförmige, geradlinige* Bewegung kann nur gemessen werden, wenn man die Relation zu einem festen Bezugssystem heranzieht
- Einfachste Möglichkeit: Kontakt von Rädern zum Boden
 - Durch Radumdrehung kann man die Wegstrecke messen
 - Funktioniert leider nur bei Fahrzeugen
- Prinzipiell arbeitet auch ein Schrittzähler nach diesem Prinzip



Kapitel 2, Folie 16

Jörg Roth

Geometrische Sensorauswertung

Geometrische Sensor-Auswertung:

- Anhand von einzelnen Sensor-Werten soll eine Position berechnet werden
- Beispiel:
 - durch eine Wegstreckenmessung weiß man, dass man 1m gefahren ist
 - durch einen Kompass weiß man, dass man exakt nach Norden gefahren ist
 - die Startposition ist bekannt
 - daraus kann die aktuelle Position berechnet werden
- Die Auswertungen kann man auf einige wenige Berechnungsmuster zurückführen

Höhere Funktionen

Modelle

Datenfusion, Fehlerkorrektur

Sensorauswertung

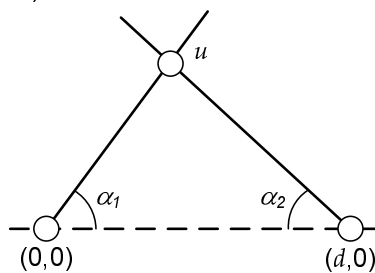
Sensorik

Kapitel 2, Folie 17

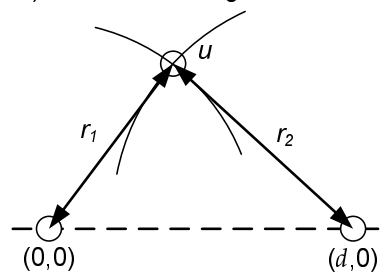
Jörg Roth

Geometrische Sensorauswertung (2D)

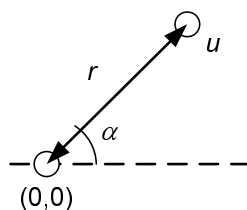
a) Zwei Winkel



b) Zwei Entfernungen



c) Winkel und Entfernung



Kapitel 2, Folie 18

Jörg Roth

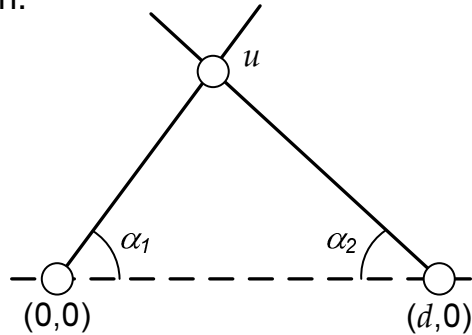
Zwei Winkel

Messung von zwei Winkeln:

Es gilt

$$\frac{u_y}{u_x} = \tan(\alpha_1)$$

$$\frac{u_y}{d - u_x} = \tan(\alpha_2)$$



aufgelöst nach u :

$$u_x = d \cdot \frac{\tan(\alpha_2)}{\tan(\alpha_1) + \tan(\alpha_2)}$$

$$u_y = u_x \cdot \tan(\alpha_1)$$

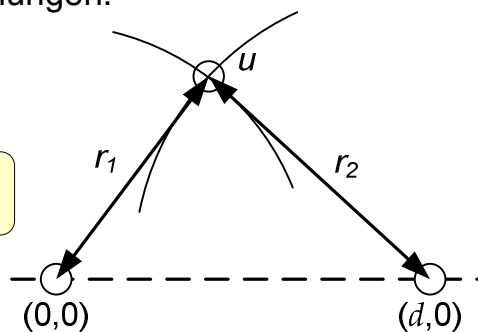
Zwei Entfernungen

Messung von zwei Entfernungen:

Es gilt

$$r_1^2 = u_x^2 + u_y^2$$

$$r_2^2 = (d - u_x)^2 + u_y^2$$



aufgelöst nach u :

$$u_x = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{d} + d \right)$$

$$u_y = \pm \sqrt{r_1^2 - u_x^2}$$

Achtung: es gibt zwei Lösungen

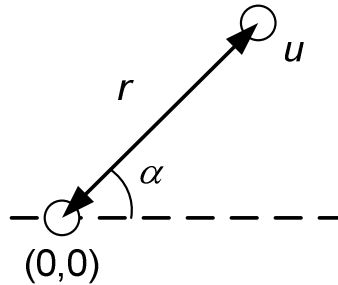
Winkel und Entfernung

Messung von Winkel und Entfernung:

Es gilt:

$$u_x = r \cdot \cos(\alpha)$$

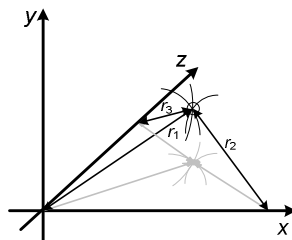
$$u_y = r \cdot \sin(\alpha)$$



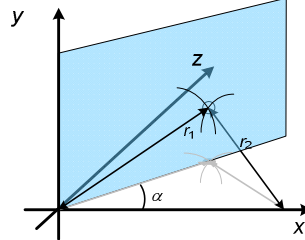
Geometrische Sensorauswertung (3D)

Varianten für 3D (ohne Formeln)

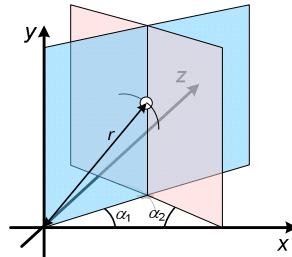
a) Drei Entfernungen



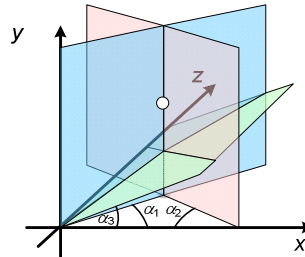
b) Zwei Entfernungen, ein Winkel



c) Eine Entfernung, zwei Winkel



d) Drei Winkel



Koordinatensysteme

Koordinatensysteme:

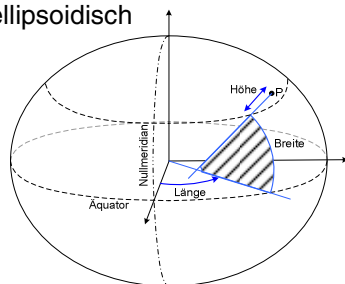
- Positionen müssen ggfs. noch zwischen verschiedenen Koordinatensystemen umgerechnet werden
- Im großen Maßstab (ab mehreren zig km) sollte die Erdkrümmung berücksichtigt werden
 - u.U. sehr komplizierte Umrechnungen auf einem Ellipsoiden (Großkreise, Flächen auf Ellipsoiden)
 - verschiedene Koordinatensysteme haben unterschiedliche Vor- und Nachteile

Kapitel 2, Folie 23

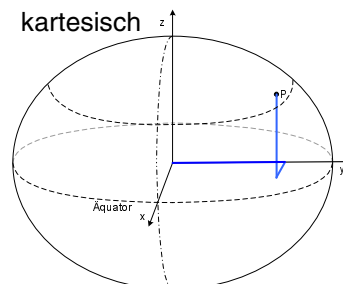
Jörg Roth

Koordinatensysteme

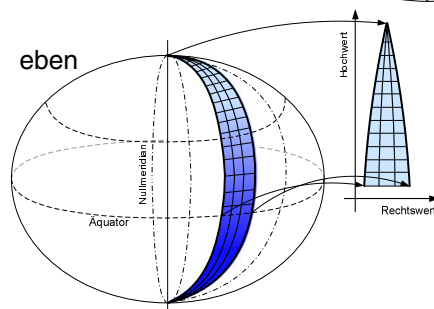
ellipsoidisch



kartesisch



eben



Kapitel 2, Folie 24

Jörg Roth

Koordinatensysteme

Innerhalb Gebäuden und in städtischen Größenordnungen kann man im kartesischen Koordinatensystem rechnen.

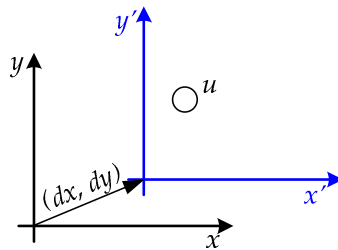
Abbildungen:

- Verschiebung
- Drehung
- Skalierung

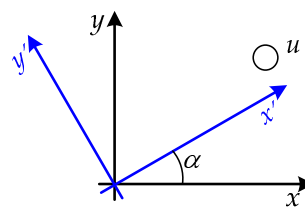
Die Verallgemeinerung dieser Abbildungen sind die *affinen Abbildungen*

Abbildungen zwischen Koordinatensystemen

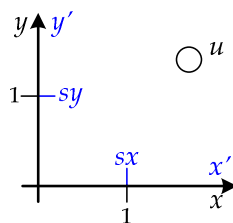
a) Verschiebung



b) Drehung



c) Skalierung



Abbildungen zwischen Koordinatensystemen

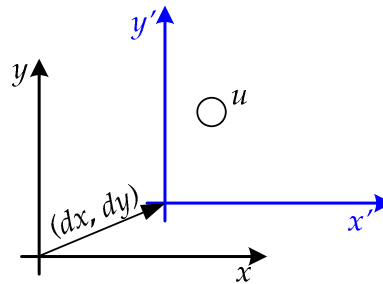
Sei

- (u_x, u_y) der Punkt in dem Koordinatensystem x/y
- $(u_{x'}, u_{y'})$ der Punkt in dem verschobenen/gedrehten/
skalierten Koordinatensystem x'/y'

Verschiebung:

$$u_{x'} = u_x - dx$$

$$u_{y'} = u_y - dy$$



Kapitel 2, Folie 27

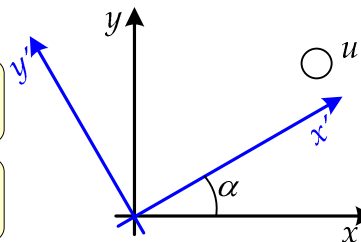
Jörg Roth

Abbildungen zwischen Koordinatensystemen

Drehung:

$$u_{x'} = u_x \cdot \cos(\alpha) + u_y \cdot \sin(\alpha)$$

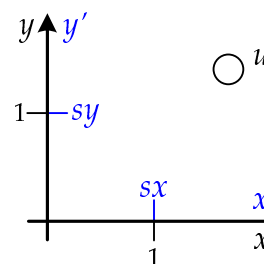
$$u_{y'} = -u_x \cdot \sin(\alpha) + u_y \cdot \cos(\alpha)$$



Skalierung:

$$u_{x'} = u_x \cdot sx$$

$$u_{y'} = u_y \cdot sy$$



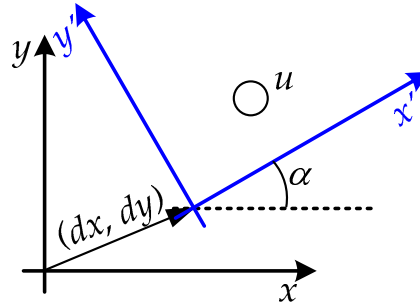
Kapitel 2, Folie 28

Jörg Roth

Abbildungen zwischen Koordinatensystemen

Diese Abbildungen können auch in Kombination vorkommen.

- Beispiel: Verschiebung und Drehung



$$u_{x'} = (u_x - dx) \cdot \cos(\alpha) + (u_y - dy) \cdot \sin(\alpha)$$

$$u_{y'} = -(u_x - dx) \cdot \sin(\alpha) + (u_y - dy) \cdot \cos(\alpha)$$

Selbstlokalisierung

SS2011

Kapitel 3

Sensorik

Kapitel 3: Sensorik

Ziel: Beschreibung verschiedener
Positionssensoren

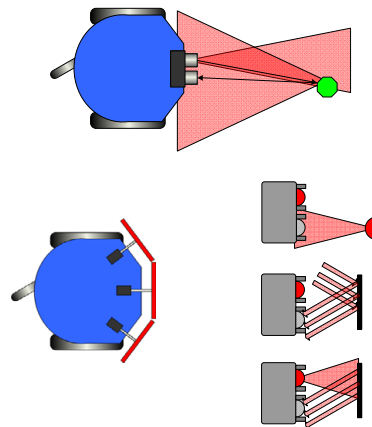


- Beschreibung einiger physikalischer Grundlagen
- Eigenschaften von Positionssensoren
- Vergleich der Sensoren

Positionssensoren

Die folgenden Sensoren können verwendet werden, um Informationen über die aktuelle Position zu erhalten:

- Taktile-Sensor
 - Ultraschall-Sensor
 - Kompass
 - Beschleunigungssensor
 - Gyro-Sensor
 - Tacho-Sensor
 - Infrarot-Sucher
 - Helligkeitssensor
- (Liste nicht komplett)



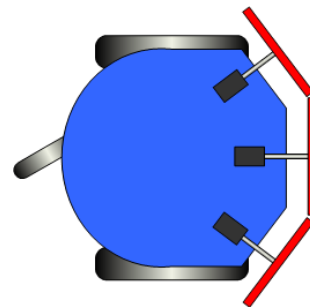
Kapitel 3, Folie 3

Jörg Roth

Taktile-Sensor

Taktile-Sensor

- Ein Schalter wird durch eine mechanische Kraft geschlossen
- Auslöser ist z.B. ein Hindernis, gegen das gefahren wird
- Wirkungsvoll im Nahbereich, wenn andere Sensoren ein Hindernis nicht erkennen
- Ein maximal zuverlässiger Sensor: Wenn ein Schalter geschlossen wird, ist ein Hindernis vorhanden
- Sinnvoll: in Fahrtrichtung die volle Breite abdecken



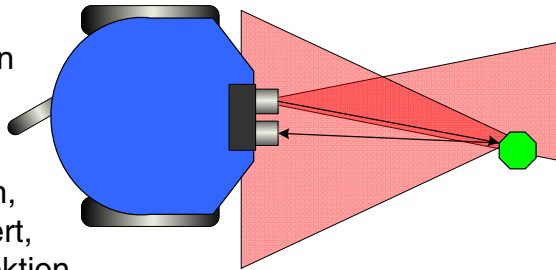
Kapitel 3, Folie 4

Jörg Roth

Ultraschall-Sensor

Ultraschall-Sensor

- Periodisch wird ein Ultraschall-Signal ausgesendet
- Es wird gemessen, wie lange es dauert, bis die *erste* Reflektion eintrifft
- Achtung: es wird *nicht* die Entfernung in gerader Blickrichtung gemessen – bei schrägen liegenden Objekten wird er *nächste Punkt innerhalb des Sendekegels* ermittelt
- Genauigkeit: im cm-Bereich



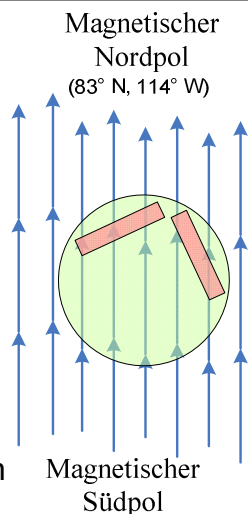
Kapitel 3, Folie 5

Jörg Roth

Kompass-Sensor

Kompass-Sensor

- Die Erde produziert ein (schwaches) Magnetfeld
- "Mechanische" Kompass sind für den mobilen Einsatz ungeeignet
- Elektronische Kompass basieren auf Platten, die ihren elektrischen Widerstand durch ein äußeres Magnetfeld ändern
- Nord-Süd kann durch eine Platte gemessen werden, aber nicht West-Ost – daher sind zwei Platten notwendig, die um 90° gegeneinander gedreht sind
- Leider wird das Erd-Magnetfeld lokal sehr leicht gestört



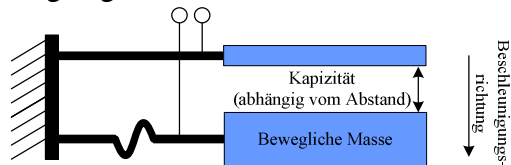
Kapitel 3, Folie 6

Jörg Roth

Beschleunigungssensor

Beschleunigungssensor

- Der Effekt einer *Beschleunigung* kann elektrisch gemessen werden, z.B. über die Veränderung der Kapazität eines Kondensators



- Durch mehrere Einzelsensoren kann die Beschleunigung in drei Dimensionen berechnet werden
- Die Beschleunigung a ist physikalisch die Änderung der Geschwindigkeit v , diese ist wiederum die Änderung des Ortes r , also

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2}$$

Beschleunigungssensor

- Umgekehrt ist dann

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a dt$$

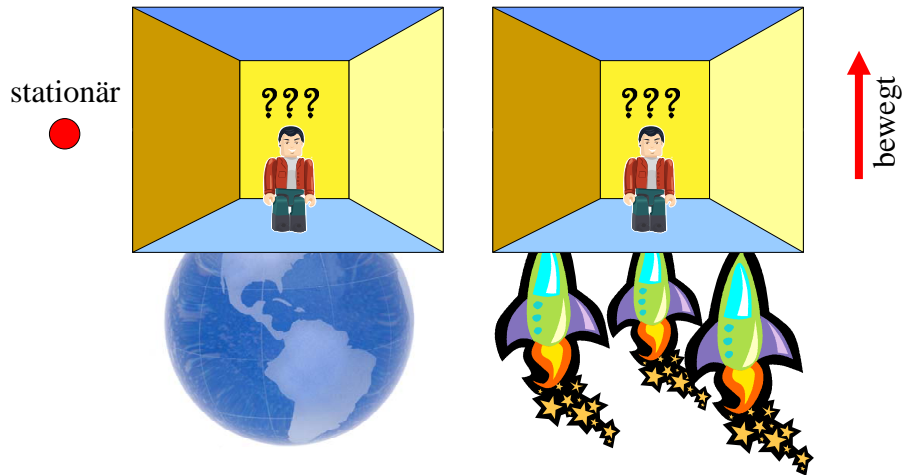
- Wenn $v_0=0$ gilt weiter

$$r(t) = r_0 + \int_0^t \int_0^t a dt$$

- Damit kann man den zurückgelegten Weg über die zweifache Integration der Beschleunigung berechnen
- Achtung: Messfehler kumulieren sich – Korrektur über andere Verfahren sinnvoll

Beschleunigungssensor

- Physikalisch kann der Effekt der Gravitation nicht von einer Geschwindigkeitsänderung unterschieden werden



Kapitel 3, Folie 9

Jörg Roth

Beschleunigungssensor

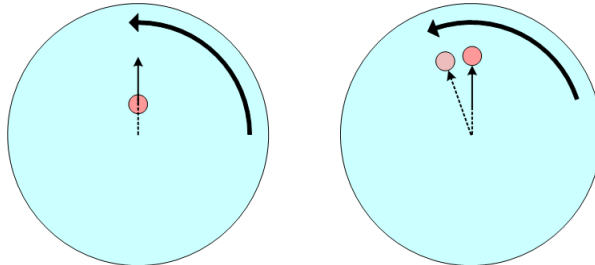
- Eine Person in einem geschlossenen Raum kann nicht entscheiden, ob
 - sich der Raum in Ruhe auf der Erde befindet
 - oder ob mit $9,81 \text{ m/s}^2$ im Weltraum beschleunigt wird (fernab jeder Gravitation)
- Daher kann der Beschleunigungssensor auch verwendet werden, um Neigungen zu messen
- Der Beschleunigungssensor wird daher manchmal auch *Tilt-Sensor* genannt

Kapitel 3, Folie 10

Jörg Roth

Gyro-Sensor

- Der Gyroskop-Sensor misst die *Winkelgeschwindigkeit*
- Die Messung basiert auf der *Coriolis-Kraft*



- In rotierenden Systemen erfahren Objekte, die sich nach außen bewegen, eine Kraft *entgegen* der Drehrichtung
- Diese Kraft kann gemessen werden

Kapitel 3, Folie 11

Jörg Roth

Gyro-Sensor

- Eine große mechanische Bewegung wie im "Kreiselkompass" wird in Sensoren durch sehr kleine Vibrationsbewegungen ersetzt (z.B. piezoelektrisch)
- Die Winkelgeschwindigkeit ω ist die Ableitung des Winkels α , also

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

- Umgekehrt gilt damit

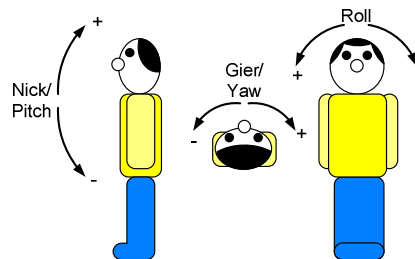
$$\alpha(t) = \alpha_0 + \int_0^t \omega dt$$

Kapitel 3, Folie 12

Jörg Roth

Gyro-Sensor

- Bei bekanntem α_0 kann man somit den aktuellen Winkel über Integration berechnen
- Achtung: Messfehler kumulieren sich – Korrektur über andere Verfahren sinnvoll
- Typische Sensoren messen drei Winkelgeschwindigkeiten von paarweise rechtwinklig aufeinander stehenden Drehachsen



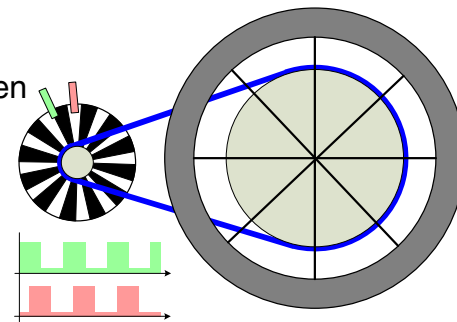
Kapitel 3, Folie 13

Jörg Roth

Tacho-Sensor

Tacho-Sensor

- Messung von Umdrehungen
- Ein optischer Sensor zählt Teilschritte auf einer Encoder-Scheibe
- Durch einen zweiten optischen Sensor kann man darüber hinaus die Drehrichtung ermitteln
- Wichtig: Übersetzung sinnvoll (Encoder-Scheibe dreht sich häufiger als das zu messende Rad)
- Typischer Einsatz: Ermitteln von Radumdrehungen der Antriebsräder – in diesem Fall spricht man von *Odometrie*



Kapitel 3, Folie 14

Jörg Roth

Tacho-Sensor

- Kennt man den Radumfang u und den Winkel α , so erhält man die gefahrene Strecke r durch

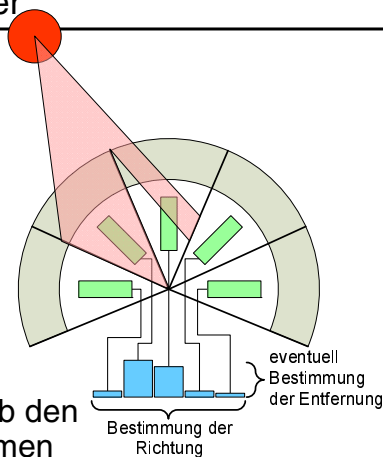
$$r = u \frac{\alpha}{360}$$

- Achtung: durch Schlupf ist der *gemessene Weg* in der Regel größer als der tatsächliche Weg
- Bei zwei angetriebenen Rädern kann man über die Tacho-Messung beider Räder die Fahrtroute berechnen
 - In der Regel liegt die Route dann auf einem Kreisbogen
 - Grenzfall: Geradeausfahrt

Infrarot-Sucher

Infrarot-Sucher

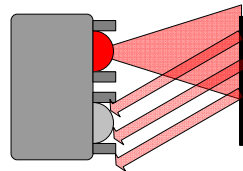
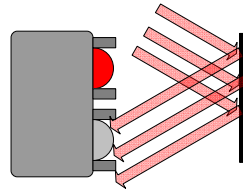
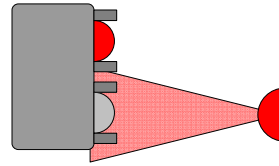
- Künstliche Infrarot-Quellen kann man (zumindest in Räumen) gut von anderem Licht unterscheiden
- Möglichkeit: *moduliertes* Infrarot-Licht (benutzen z.B. Fernbedienungen)
- Über segmentartig angeordnete Infrarot-Empfänger kann man grob den Winkel zur Infrarot-Quelle bestimmen
- Über Interpolation kann man ca. doppelt so viele Winkelstufen wie Infrarot-Segmente unterscheiden
- Ist die Signalstärke der Infrarot-Quelle bekannt, kann man auch die Entfernung abschätzen



Helligkeitssensor

Helligkeitssensor:

- Messung der optischen Eigenschaft "Helligkeit"
- Möglichkeiten:
 - Messung der Beleuchtungsstärke einer Lichtquelle
 - Messung der Reflektion des Umgebungslichts an einem nahen Objekt
 - Messung der Reflektion von einem selbst ausgestrahlten Testlicht (Vorteil: Lichtstärke bekannt)



Kapitel 3, Folie 17

Jörg Roth

Übersicht über die Sensoren

Sensor	Messung	Messprinzip	Bemerkung/Probleme
Taktil-Sensor	Hindernis	Lokaler Effekt	Geringe Fehlerquote
Ultraschall	Entfernung	Laufzeitmessung	Schräge Objekte
Kompass	Winkel zum Erdmagnetfeld	Winkelmessung	Viele Störungen
Beschleunigung	gradlinige Beschleunigung	Beschleunigung	Doppelte Integration fehleranfällig
Gyro	Drehgeschwind.	Beschleunigung	Integration fehleranfällig
Tacho	Wegstrecke	Wegstrecke	Schlupf
Infrarot-Sucher	Winkel zur Infrarotquelle	Winkelmessung, Signalstärke	Nur einige Winkelstufen
Helligkeit	Helligkeit	Lokaler Effekt, Signalstärke	Objekteigenschaften nur Nahbereich

Kapitel 3, Folie 18

Jörg Roth

Selbstlokalisierung

SS2011

Kapitel 4

Sensordatenfusion

Kapitel 4: Sensordatenfusion

Ziel: Vermitteln von Grundkenntnissen
der Sensordatenfusion



- Einfache Ansätze
- Statistische Methoden

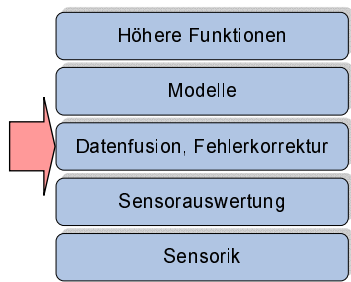
Sensordatenfusion

Durch Auswertung von Sensorwerten leiten wir Positionen ab

- Mehrere Sensoren führen u.U. zu mehreren *verschiedenen* Positionsangaben
- Die abgeleiteten Positionen unterliegen Messfehlern

Ziel:

- eine einzige Position pro Zeitpunkt bereitstellen
- Messfehler korrigieren



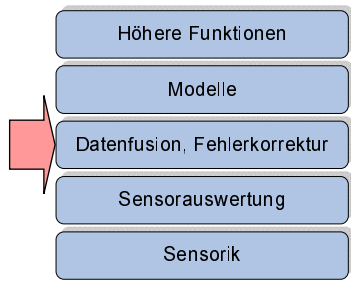
Kapitel 4, Folie 3 Jörg Roth

Sensordatenfusion

Über verschiedene Verfahren können mehrere Positionen zu einer einzigen verrechnet werden

Folgende Möglichkeiten werden vorgestellt:

- Einfache Durchschnittsbildung
- Particle Filter
- Kalman Filter
- Geometrische Sensordatenfusion



Kapitel 4, Folie 4 Jörg Roth

Durchschnittsbildung

Ein einfacher Ansatz – Bilden des Durchschnitts:

- Werden durch die Sensoren mehrere Positionen gemessen, kann man einfach den Durchschnitt berechnen
- Individuelle Messfehler werden dadurch abgeschwächt
- Sensoren mit hoher Verlässlichkeit können höher gewichtet werden. Seien p_i die gemessenen Positionen und g_i Gewichte, dann kann man die Durchschnittsposition p wie folgt berechnen

$$p = \frac{\sum_i (p_i \cdot g_i)}{\sum_i g_i}$$

Kapitel 4, Folie 5

Jörg Roth

Durchschnittsbildung

Nachteile des Ansatzes

- Nur *absolute* Messungen können einfließen, keine Messungen über relative Positionsänderungen
- Positionsdimensionen (x, y, α) werden unabhängig betrachtet
- Die Historie der Messungen wird nicht betrachtet
- Kein echtes statistisches Modell – Ausreißer von verlässlichen Sensoren werden stark gewichtet

Kompliziertere Ansätze sind der Particle und Kalman Filter

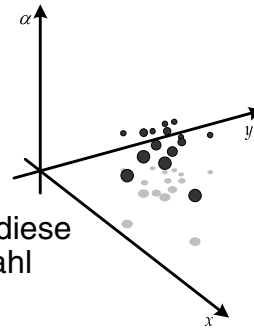
Kapitel 4, Folie 6

Jörg Roth

Particle Filter

Particle Filter:

- Mögliche Zustände werden durch *Partikel* in einem Zustandsraum repräsentiert
- Jede Dimension im Zustandsraum repräsentiert eine Dimension der Position oder Pose. Beispiel:
 - x, y, α für 2D-Position und Ausrichtung
- Es gibt zwar unendlich viele mögliche Zustände, wir repräsentieren diese aber durch *endlich* viele Partikel. Die Zahl der Partikel sollte groß sein.
- Ein Partikel hat ein *Gewicht*, das die Wahrscheinlichkeit für diese Zustand repräsentiert



Kapitel 4, Folie 7

Jörg Roth

Particle Filter

Idee:

- Eine konkrete Wahrscheinlichkeitsverteilung wird durch eine Partikelwolke repräsentiert
- Jeder Partikel repräsentiert einen *möglichen* Zustand. Beispiel:
 - Man vermutet den Roboter an der Position (10cm, 10cm). Man kennt die Position aber nicht exakt.
 - Daher werden neben dem Partikel (10, 10) z.B. auch Partikel (11, 10), (9, 10), (11, 9) eingetragen
 - Von den unendlichen Möglichkeiten werden aber nur endlich viele durch Partikel repräsentiert.
- Von den Partikeln soll nur derjenige "überleben", der die richtige Vermutung repräsentierte

Kapitel 4, Folie 8

Jörg Roth

Particle Filter

- Messungen über die Position modifizieren diese Wolke.
Generelle Möglichkeiten:
 - Ändern der Gewichte
 - Bewegen der Partikel
 - Auswahl von Partikeln (Löschen der übrigen)
- Der wahrscheinliche Zustand kann nach allen relevanten Messungen aus der Wolke abgeleitet werden, z.B.
 - bilde Schwerpunkt der Wolke
 - wähle Partikel mit dem größten Gewicht

Kapitel 4, Folie 9

Jörg Roth

Particle Filter

Man unterscheidet zwei Arten von Messungen:

- solche, die die Partikel im Zustandsraum bewegen
 - Messen von *relativen* Bewegungen
 - Messungen von *relativen* Drehungen

Der Einfluss dieser Messungen auf die Zustände wird durch das *Motion Model* beschrieben

- solche, die Partikel im Zustandsraum nicht bewegen aber neu gewichten
 - Messen von *absoluten* Positionen
 - Messen von *absoluten* Ausrichtungen

Der Einfluss dieser Messungen auf die Zustände wird durch das *Perceptual Model* beschrieben

Kapitel 4, Folie 10

Jörg Roth

Particle Filter

Die Idee des Particle Filters stellt nur ein Rahmenwerk dar. Die konkreten Implementierungen können sehr unterschiedlich sein.

Beispiel:

- Der Zustandsraum umfasst nur die 2D-Position (x, y)
- *Motion Model*: Relative Bewegungen werden anhand von Odometrie und Kompass ermittelt
- *Perceptual Model*: Die absolute Position wird anhand von Ultraschall-Sensoren ermittelt, die die Entfernung zu bekannten Wänden messen

Particle Filter

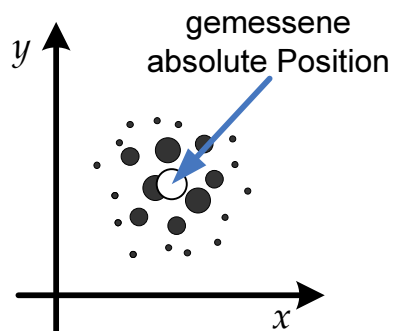
Weitere Details:

- Wir kennen die Verteilungen der Messfehler des Kompass-Sensors und der Odometrie. Wenn diese Sensoren eine Bewegung messen, können wir daraus ableiten, wie wahrscheinlich eine bestimmte reale Bewegung war.
- Wir kennen die Verteilung der Messfehler der Ultraschall-Sensoren. Wenn diese Sensoren eine Position messen, können wir daraus ableiten, wie wahrscheinlich eine bestimmte reale Position war.

Particle Filter

Mögliche Vorgehensweise:

- Die absolute Position wird gemessen. Anhand des bekannten Messfehlers wird eine Partikelwolke generiert. Hierzu wird ein Zufallszahlengenerator verwendet, der die gewünschte Wahrscheinlichkeitsverteilung besitzt.

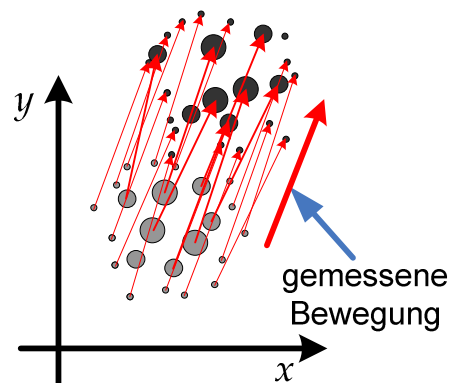


Kapitel 4, Folie 13

Jörg Roth

Particle Filter

- Die relative Bewegung wird gemessen. Jeder Partikel wird dabei anhand des Bewegungsvektors verschoben. Der Endpunkt wird allerdings anhand eines Zufallszahlengenerators modifiziert, der die Verteilung der Bewegungsmessung berücksichtigt.

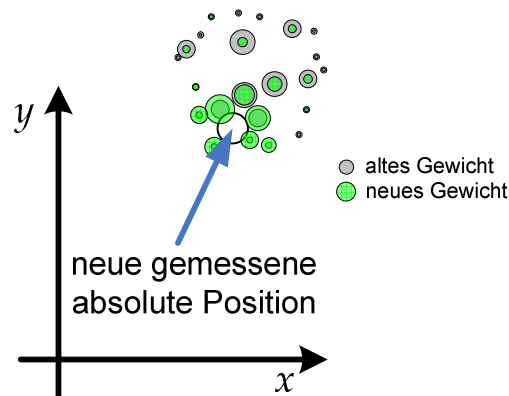


Kapitel 4, Folie 14

Jörg Roth

Particle Filter

- Bei einer neuen absoluten Messung werden die vorhandenen Partikel neu gewichtet (Partikel nahe an der Messung bekommen größere Gewichte)



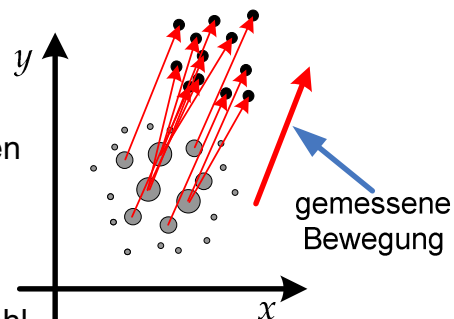
Kapitel 4, Folie 15

Jörg Roth

Particle Filter

Andere Möglichkeit, eine relative Bewegung auszuwerten:

- Man wählt *einen* Partikel anhand des Gewichtes zufällig aus (Partikel mit großem Gewicht werden häufiger ausgewählt)
- Man bewegt den Partikel anhand des Bewegungsvektors und einer zufälligen Modifikation gemäß des Motion Models
- Man wiederholt das, bis die gewünschte Partikelzahl erzeugt wurde

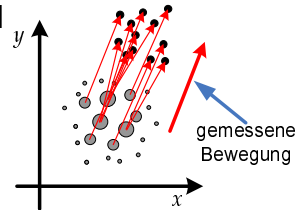


Kapitel 4, Folie 16

Jörg Roth

Particle Filter

- Jeder Zielpartikel bekommt dasselbe Gewicht
- Die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird jetzt nicht durch die Gewichte sondern durch die *Partikeldichte* repräsentiert
- Das Verrechnen einer absoluten Messung ist jetzt einfacher:
 - einfach den Partikeln das Gewicht gemäß des Perceptual Models zuweisen
 - Weiterer Vorteil: für wahrscheinliche Zustände werden mehrere Bewegungen probiert (in der ersten Variante wurde für jeden Zustand nur eine einzige Bewegung probiert)



Kapitel 4, Folie 17

Jörg Roth

Particle Filter

Resampling:

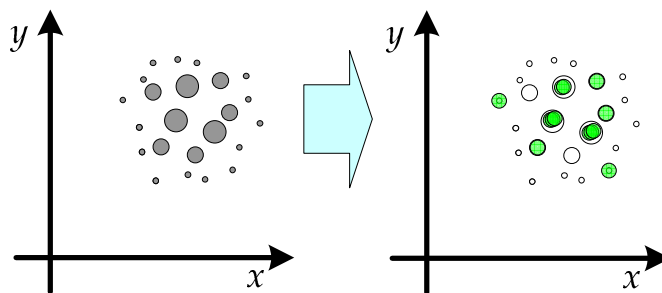
- Nach einige Schritten kann es sein, dass nur noch ein Partikel mit nennenswertem Gewicht existiert – alle anderen haben ein Gewicht ungefähr 0
- Dieses Szenario ist kritisch, da nicht mehr hinreichend viele "Vermutungen" durchprobiert werden
- Bei einer degenerierten Partikelwolke muss daher ein *Resampling* durchgeführt werden
- Mögliches Verfahren:
 - Wähle anhand der Gewichte zufällig einen Partikel aus
 - Generiere einen neuen Partikel mit neuem festen Gewicht
 - Wiederhole, bis hinreichend viele Partikel generiert wurden

Kapitel 4, Folie 18

Jörg Roth

Particle Filter

- Jeder Partikel hat danach dasselbe Gewicht (insb. signifikant größer als 0)
- Einige Zustände werden durch mehrere Partikel repräsentiert



Kapitel 4, Folie 19

Jörg Roth

Kalman Filter

Kalman Filter:

- Unter bestimmten (strengen) Randbedingungen kann man einen *geschlossenen Ausdruck* für die wahrscheinliche Position angeben
- Der *Kalman Filter* leitet solch einen geschlossenen Ausdruck her. Wie der Particle Filter ist der Kalman Filter ein Rahmenwerk, das viele Freiheitsgrade hat. Wir zeigen hier die einfache Variante.
- Modell:
 - man beobachtet das System zu diskreten Zeitpunkten k .
 - Es gibt einen Zustandsvektor x_k . Dieser ist unbekannt.
 - Über Messungen erhält man Werte z_k .

Kapitel 4, Folie 20

Jörg Roth

Kalman Filter

- Zwischen diskreten Zeitpunkten wird der Zustand wie folgt "weitergeschaltet"

$$x_k = A \cdot x_{k-1}$$

hierbei ist A die Transformationsmatrix zwischen den Zuständen

- Zwischen dem Zustand und der Messung gilt folgender Zusammenhang:

$$z_k = H \cdot x_k + v_{k-1}$$

Hierbei ist H die Transformationsmatrix zwischen Zustand und Messung und v_k ein *normalverteilter* Messfehler.

Kalman Filter

Beispiel:

- Der Zustand x_k sei durch eine Position p_{xk}, p_{yk} sowie durch einen Geschwindigkeitsvektor v_{xk}, v_{yk} beschrieben
- Das Objekt bewegt sich unbeschleunigt, d.h.

$$p_x = p_{xk-1} + v_{xk-1} \cdot \Delta t$$

$$v_{kx} = v_{kx-1}$$

$$p_y = p_{yk-1} + v_{yk-1} \cdot \Delta t$$

$$v_{ky} = v_{ky-1}$$

Δt sei die Zeit zwischen zwei Zeitpunkten $k-1$ und k .

- Damit gilt

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Kalman Filter

- Wir messen durch Sensoren vom Zustand nur die Position, die Geschwindigkeit sei von außen nicht messbar.

Also gilt

$$z_{xk} = p_{xk}$$

$$z_{yk} = p_{yk}$$

damit

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Der Messfehler wird durch eine Kovarianzmatrix R angegeben. Wenn σ_x und σ_y die Varianzen der Messfehler sind, gilt

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{pmatrix}$$

Kalman Filter

Der Kalman Filter arbeitet wie folgt:

- Wir beginnen mit einer Schätzung des Zustands \hat{x}_k und einer Schätzung der Fehlerkovarianz P_k
- Wenn der Zustand n Dimensionen hat, ist P_k eine nxn -Matrix
- Wenn wir nichts über den Anfangszustand und die Fehler wissen, können wir als Anfangsbelegung wählen

$$\hat{x}_k = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$P_k = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & & 0 \\ \dots & & \dots & \\ 0 & 0 & & 1 \end{pmatrix}$$

Kalman Filter

- Bei einem neuen Zeitpunkt messen wir z_k .
Wir führen dann folgende Zuweisungen aus

$$\hat{x}_k^- = A \cdot \hat{x}_{k-1}$$

$$P_k^- = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T$$

$$K_k = P_k^- \cdot H^T \cdot (H \cdot P_k^- \cdot H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot (z_k - H \cdot \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k^-$$

Die gesuchte neue Schätzung ist hierbei \hat{x}_k .

\hat{x}_k und P_k gehen im nächsten Schritt in die neue Rechnung ein. A , H und R sind bekannt.

Kalman Filter

Zur Berechnung benötigen wir

- die *Multiplikation* und *Addition* von Matrizen

- die *Einheitsmatrix*

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & & 0 \\ \dots & & \dots & \\ 0 & 0 & & 1 \end{pmatrix}$$

- die *transponierten Matrizen* A^T von A und H^T von H
Zur Erinnerung: die Transponierte ist die an der Hauptdiagonalen gespiegelte Matrix.

- die Berechnung der *inversen Matrix* $()^{-1}$
Zur Erinnerung: Für die Inverse X^{-1} einer Matrix X gilt

$$X \cdot X^{-1} = I$$

Kalman Filter

Bemerkung:

- Wir haben hier nur das einfache Rezept angegeben. Der Kalman Filter lässt sehr viele Möglichkeiten zu, ein System zu modellieren.

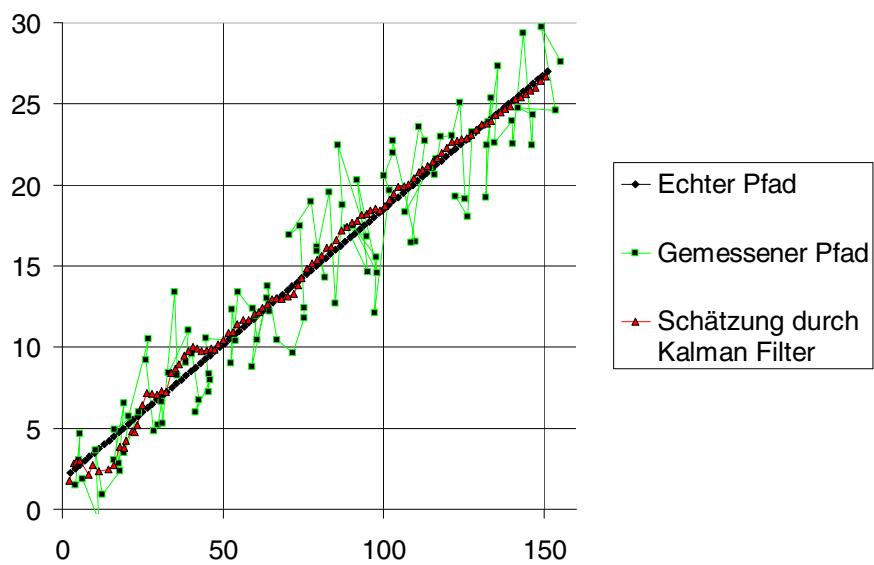
Simulation:

- Wir simulieren eine Bewegung und eine Positionsmessung mit Messfehler
- Der Messfehler wird simuliert, indem wir eine Positionsangabe durch einen normalverteilten Zufallswert verändern

Kapitel 4, Folie 27

Jörg Roth

Kalman Filter



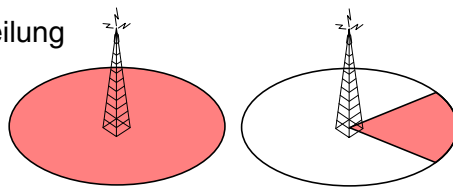
Kapitel 4, Folie 28

Jörg Roth

Geometrische Sensordatenfusion

Nachteile der bisherigen Verfahren:

- Es wurde eine Normalverteilung der Sensorwerte um einen Mittelwert (der echten Position) angenommen.
- Für Positionsverfahren, die auf lokal begrenzten Effekten beruhen (insb. COO) passt diese Annahme nicht:
 - man weiß nur, dass man innerhalb einer Zelle ist, aber nicht wo
 - es gibt keinen Mittelwert
 - es gibt keine Normalverteilung



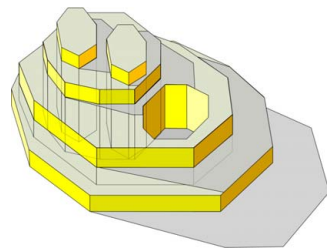
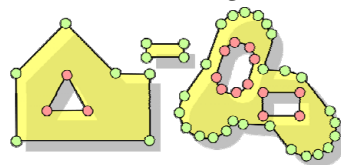
Kapitel 4, Folie 29

Jörg Roth

Geometrische Sensordatenfusion

Lösung: ein *geometrischer Ansatz* zur Modellierung von Dichten:

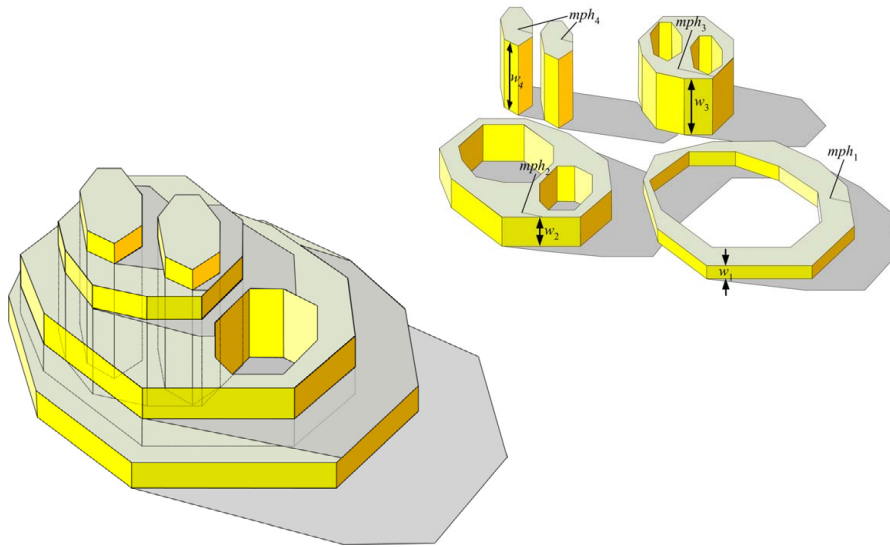
- basieren auf *mphs* (*Multipolygons with Holes*)
- Vorteil: effiziente Realisierung möglich
- Beliebige Dichten werden als Summe von *mphs* aufgefasst
 - die Höhe über einem Punkt gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass man sich an diesem Punkt befindet



Kapitel 4, Folie 30

Jörg Roth

Geometrische Sensordatenfusion

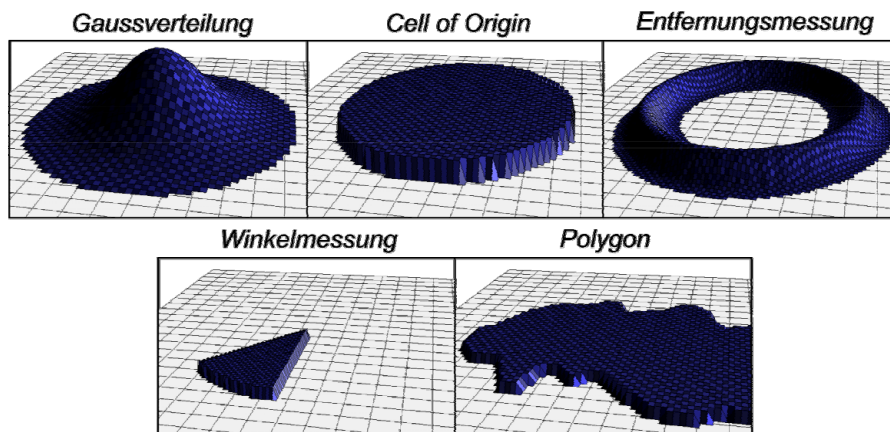


Kapitel 4, Folie 31

Jörg Roth

Geometrische Sensordatenfusion

- Für jeden Sensor gibt man eine Dichteverteilung gemäß diesem Modell an.



Kapitel 4, Folie 32

Jörg Roth

Geometrische Sensordatenfusion

- Problem: das Verrechnen von Dichten muss auf geometrische Operationen abgebildet werden, insb.
 - die Multiplikation von Dichten
 - die *Faltung* von Dichten (*convolution*)

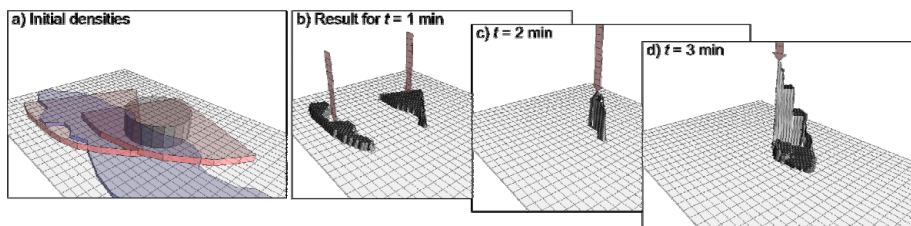
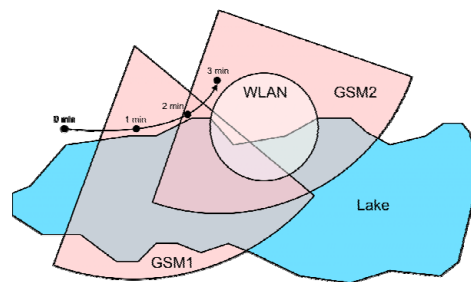
density ops	mph ops							
	point in area	\cup	\cap	\setminus	surface area	buffer	cen-troid	dist.
<i>prob. of pos.</i>	x							
<i>resample density</i>		x			x			
<i>multiply densities</i>			x					
<i>convolution</i>		x	x	x	x	x	x	
<i>multiply negation</i>			x	x				
<i>centroid of density</i>					x		x	
<i>maxima of density</i>		x					x	x
<i>area with prob. >0</i>		x						

Kapitel 4, Folie 33

Jörg Roth

Geometrische Sensordatenfusion

Simulation:



Kapitel 4, Folie 34

Jörg Roth

Selbstlokalisierung

SS2011

Kapitel 5

Umgebungsmodelle

Kapitel 5: Umgebungsmodelle

Ziel: Beschreibung von Eigenschaften und Nutzen von Umgebungsmodellen



- Eigenschaften von Umgebungsmodellen
- Beschreibung durch Geometrien
- Beschreibung durch Topologien
- Prinzipien der Navigation

Umgebungsmodelle

Umgebungsmodelle haben verschiedene Aufgaben:

- Als Mittel der Positionsbestimmung
Beispiel:
 - Aus den Entfernungen zu bekannten Wänden kann man die eigene Position berechnen
- Zur Verbesserung der Positionsbestimmung
Beispiel:
 - Liegt die berechnete Position innerhalb eines bekannten Hindernisses, kann man sie in den Freiraum projizieren

Kapitel 5, Folie 3 Jörg Roth

Umgebungsmodelle

- Ausführungen von höheren Funktionen. Beispiele:
 - Navigation zu einer entfernten Position
 - Generierung eines flächendeckenden Reinigungsplans

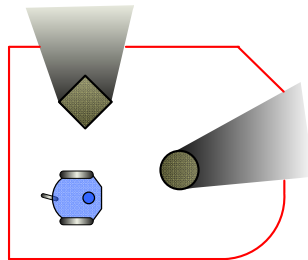
Kapitel 5, Folie 4 Jörg Roth

Umgebungsmodelle

Was kann man modellieren:

- Die *Geometrie* der Umwelt: Wie kann die Welt durch geometrische Primitive (z.B. Linien) beschrieben werden?
Beispiel:

- Geometrie von Hindernissen und Freiräumen
- Bodenneigung, Treppen, Löcher
- Welcher Bereich ist schon erkundet, welcher unbekannt?



Kapitel 5, Folie 5

Jörg Roth

Umgebungsmodelle

- Die *Topologie* der Umwelt: Wie kann die Welt durch Knoten und Kanten beschrieben werden?

Beispiel:

- Knoten entsprechen Zimmern; Kanten zwischen Zimmern bedeuten: es gibt eine Tür oder einen Durchgang

- *Sonstige Eigenschaften* der Umwelt:

Beispiele:

- Bodenbeschaffenheit, wie groß ist der Schlupf
- Farbe von Wänden, Rauigkeit, Reflektionseigenschaften bezüglich Ultraschall
- Namen, Bezeichnungen – insb. wichtig für die Kommunikation mit Benutzern
- Sind Hindernisse mobil oder stationär?

Kapitel 5, Folie 6

Jörg Roth

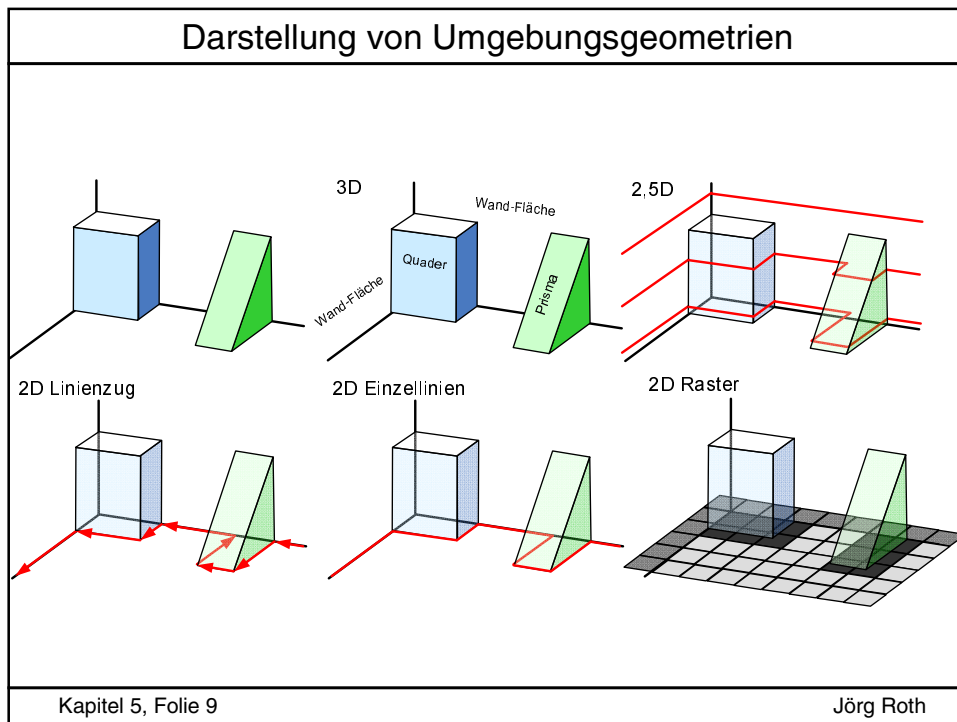
Generierung von Umgebungsmodellen

Wie kann ein Modell generiert werden:

- Es kann komplett vorgegeben werden. Hierzu greift man auf vorhandene Informationen (z.B. einen Grundrissplan) zu und stellt sie im gewünschten Format zur Verfügung.
 - Vorteil: Modell exakt
 - Nachteil: aufwändig
- Es kann durch das bewegte Objekt (z.B. den Roboter) erstellt werden. Dazu benötigt man eine Positionsbestimmung, die vom Umgebungsmodell *unabhängig* ist.
 - Vorteil: direkt im gewünschten Format, keine Vorbereitung notwendig
 - Nachteil: Präzision wird durch die Sensorik beschränkt

Generierung von Umgebungsmodellen

- Zeitgleiches Kartografieren und Lokalisieren (*SLAM, Simultaneous Localization And Mapping*): Man verfügt *nicht* über eine vom Umgebungsmodell unabhängige Positionsbestimmung und ermittelt während der Fahrt sowohl die Position als auch das Umgebungsmodell:
 - Vorteil: höchster Komfort
 - Nachteil: konzeptionell sehr anspruchsvoll (Henne-Ei-Problem)



Darstellung von Umgebungsgeometrien

Umgebungsgeometrien:

- Hauptaufgabe: Trennung von Hindernissen und Freiraum
- Wo kann man sich hinbewegen, wo nicht
- Eventuell Wahrscheinlichkeitsaussagen ("mit 50% Wahrscheinlichkeit befindet sich hier ein Hindernis")

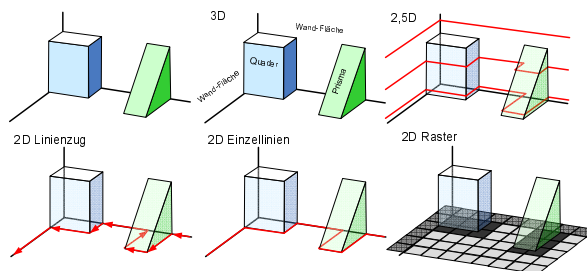
Klassifizierung von Geometrien:

- Dimensionen:
 - 2D: Grundrissplan: sinnvoll bei bewegten Objekten, die sich nur in der Ebene bewegen können
 - 2,5D: Mehrere Ebenen, aber nicht volles 3D
 - 3D: Vollständige Darstellung in drei Dimensionen

Kapitel 5, Folie 10 Jörg Roth

Darstellung von Umgebungsgeometrien

- Geometrische Primitive:
 - Raster: Die Umwelt wird durch Rasterpunkte angenähert
 - Linien, Linienzug: Die Umwelt wird durch Linien angenähert. Bei einem Linienzug kann man durch die Richtung Freiraum und Hindernis trennen
 - Objekte: es gibt geometrische Objekte (Quader, Prisma), aus denen die Umwelt aufgebaut ist.



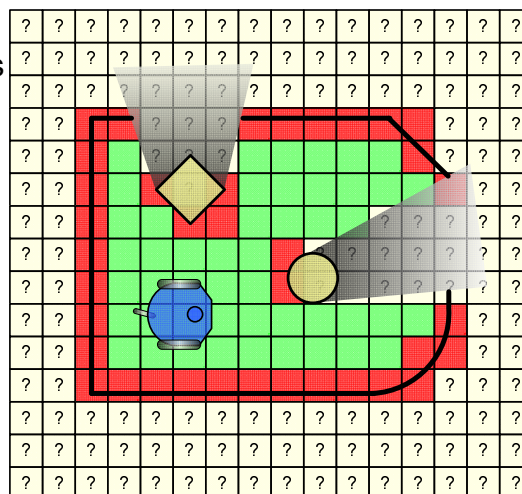
Kapitel 5, Folie 11

Jörg Roth

Darstellung von Umgebungsgeometrien

Wichtig: in der Regel sind geometrische Aussagen über Hindernisse 3-wertig

- Hier *ist* ein Hindernis
- Hier *ist* Freiraum
- Man weiß es noch nicht



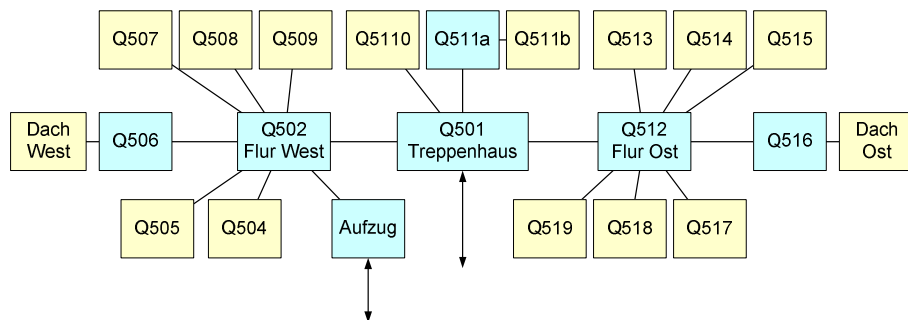
Kapitel 5, Folie 12

Jörg Roth

Topologie der Umwelt

Topologien stellen Beziehungen zwischen Objekten der Umwelt dar:

- Beispiel: Topologie des 5. Stocks des Informatik-Gebäudes – Wie sind die Räume untereinander verbunden



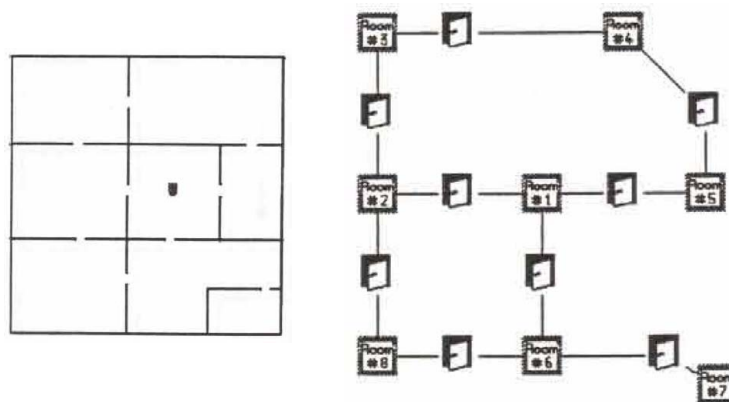
Kapitel 5, Folie 13

Jörg Roth

Topologie der Umwelt

Möglichkeiten für Beziehungen:

- Knoten entsprechen den Räumen, Kanten bedeuten: man kann sich direkt zwischen den Räumen bewegen

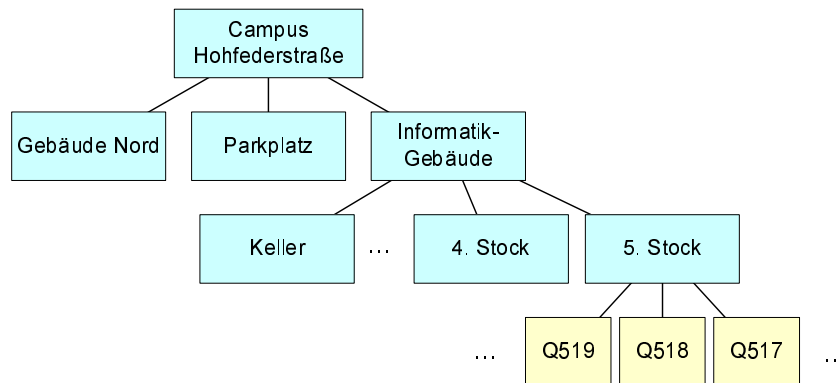


Kapitel 5, Folie 14

Jörg Roth

Topologie der Umwelt

- Knoten entsprechen Objekten wie Zimmer, Gebäude etc. und eine Kante bedeutet: ein Objekt befindet sich innerhalb eines anderen Objektes (hierarchisches Umweltmodell)



Kapitel 5, Folie 15

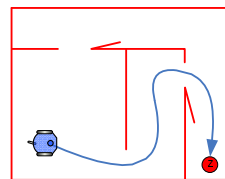
Jörg Roth

Navigation

Eine wichtige Funktion, die auf Umweltmodellen ausgeführt wird, ist die Navigation:

Allgemeine Vorgehensweise:

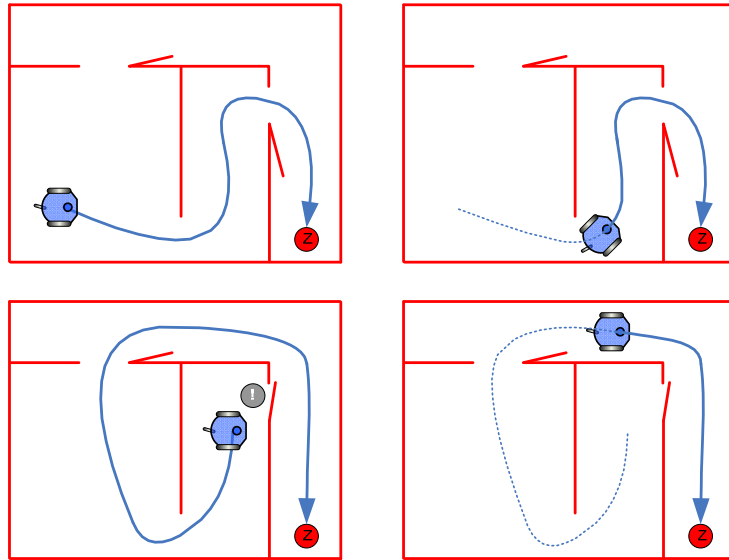
- Anhand eines internen Modells wird ein kürzester Weg zum Ziel berechnet
- Man fährt diesen Weg ab und überprüft während dessen, ob das Modell und Sensordaten noch übereinstimmen
- Bei Abweichung wird das Modell korrigiert und erneut ein kürzester Weg berechnet
- Das wird solange gemacht, bis man das Ziel erreicht hat



Kapitel 5, Folie 16

Jörg Roth

Navigation



Kapitel 5, Folie 17

Jörg Roth

Navigation

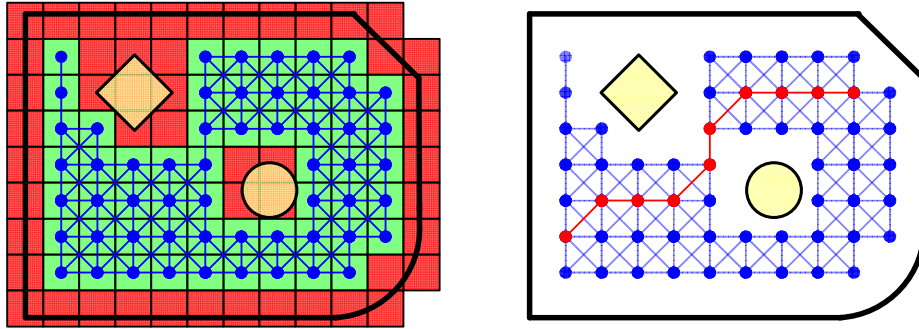
Natur des Problems:

- Kürzeste-Wege-Algorithmen arbeiten auf Graphen, z.B.
 - Dijkstra
 - A*
- Deshalb sind topologische Umweltmodelle zur Navigation geeignet – insb. zur Grobplanung (Raum-zu-Raum)
- Problem: aus geometrischen Strukturen kann man nicht einfach eine Topologie ableiten
 - Vorschlag bei Rastern: jeder Raster-Punkt ist ein Knoten – sind benachbarte Knoten erreichbar, werden sie verbunden
 - Nachteil: kürzeste Routen verlaufen "eckig"

Kapitel 5, Folie 18

Jörg Roth

Navigation



Kapitel 5, Folie 19

Jörg Roth

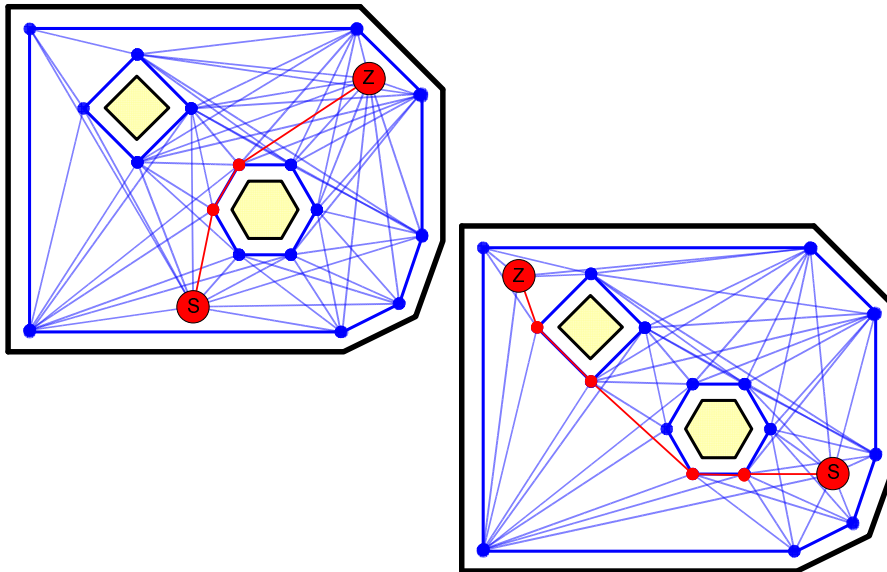
Navigation

- Auf linienförmigen Geometrien ist es noch schwieriger, geeignete Knoten zu identifizieren. Möglichkeiten:
 - Man legt Knoten auf ein Raster wie bei Raster-Geometrien
 - Man generiert künstlich einen Graphen, z.B. ein *Voronoi-Diagramm* oder einen *Sichtbarkeitsgraphen* und verwendet dessen Knoten
- Beispiel Sichtbarkeitsgraph:
 - Knoten sind "Start", "Ziel" und alle Linienendpunkte
 - Kanten verbinden solche Knoten, die eine Sichtverbindung haben, die also ohne Hindernis geradlinig verbunden sind
 - Damit eine ausreichende Fahrbreite zur Verfügung steht, werden die Hindernisse und Wände künstlich vergrößert

Kapitel 5, Folie 20

Jörg Roth

Navigation mit Sichtbarkeitsgraph

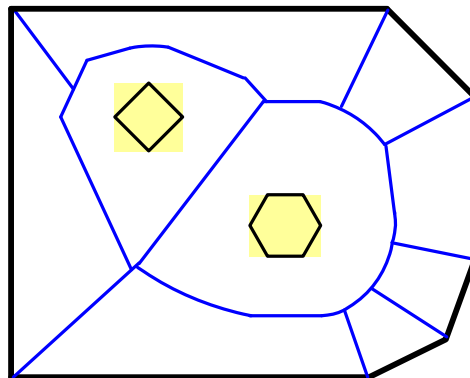


Kapitel 5, Folie 21

Jörg Roth

Navigation mit Voronoi-Diagramm

- Beispiel Voronoi-Diagramm:
 - Ein Voronoi-Diagramm besteht aus *Voronoi-Regionen*. Eine Voronoi-Region beinhalten die Punkte, die zu einem bestimmten Objekt eine kürzere Entfernung haben, als zu jedem anderen Objekt.

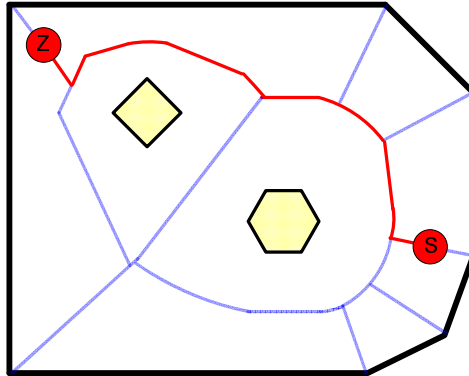


Kapitel 5, Folie 22

Jörg Roth

Navigation mit Voronoi-Diagramm

- Die Begrenzungen von Voronoi-Regionen können als potentielle Wege verwendet werden.
 - Vorteil: maximal breite Wege
 - Nachteil: suboptimal kurze Wege



Selbstlokalisierung

SS2011

Kapitel 6

Antriebskonfigurationen

Kapitel 6: Antriebskonfigurationen

Ziel: Vorstellung verschiedener Konfigurationen, die es erlauben, ein Fahrzeug kontrolliert fortzubewegen



- Darstellung von Antriebskonfiguration
- Beispiel einer Pfadberechnung
- Antriebe für unebenes Gelände

Antriebe

Es reicht nicht nur, seine Position zu kennen – man muss auch in der Lage sein, eine bestimmte Position *aktiv* anzusteuern. Beispiele für Antriebsarten:

- Zwei Antriebsräder
- Ein gelenktes angetriebenes Rad
- Ein gelenktes Rad, andere Räder angetrieben
- Synchrodrive
- Panzerantrieb
- 4 Räder

Regel: für eine 2-dimensionale Bewegung braucht man mindestens zwei unabhängige Motoren

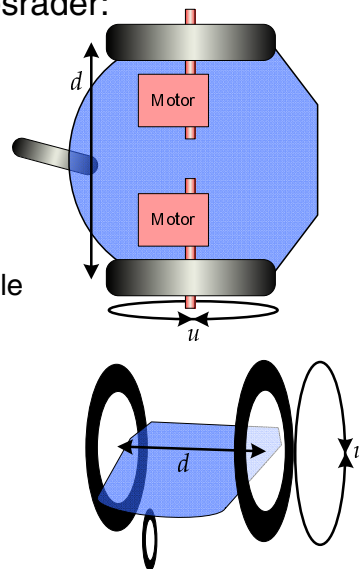
Kapitel 5, Folie 3

Jörg Roth

Zwei getrennt angetriebene Antriebsräder

Zwei getrennt angetriebene Antriebsräder:

- Je ein Motor treibt ein Rad an. Das ermöglicht
 - unterschiedliche Geschwindigkeiten
 - unterschiedliche Drehrichtungen
 - Kurvenfahren, Drehen auf der Stelle
- Mindestens ein weiteres Rad läuft passiv mit
 - dreht sich ohne Widerstand mit
 - dreht sich in die gewünschte Fahrtrichtung



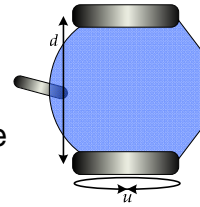
Kapitel 5, Folie 4

Jörg Roth

Zwei getrennt angetriebene Antriebsräder

Die Geometrie ist vollständig durch Radumfang und Radabstand definiert. Sei

- u der Radumfang beider Antriebsräder
- d der Abstand der Antriebsräder (genauer: der Abstand der Kontaktpunkte zum Boden)



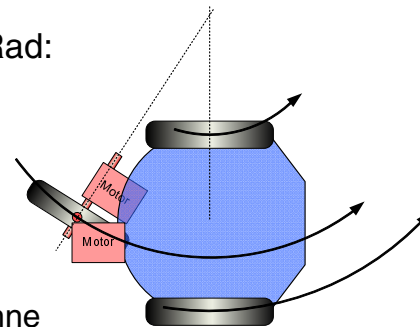
Annahme

- Ein Rad berührt den Boden in exakt einem Punkt
- In der Realität ist es eine Fläche, diese sollte aber möglichst klein sein

Gelenktes, angetriebenes Rad

Ein gelenktes, angetriebenes Rad:

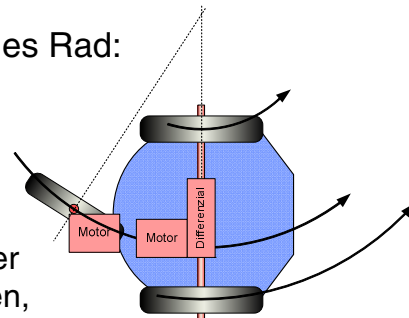
- Ein Motor treibt ein Rad an
- Dieses Rad wird auch gelenkt
- Der Lenk-Motor muss präzise Winkel einstellen können
- Die passiven Räder drehen ohne Widerstand mit, dürfen aber nicht ihre Ausrichtung ändern
- Im Allgemeinen ergibt sich eine Kurvenfahrt. Der Mittelpunkt der Kurve ist dabei der Schnittpunkt aller Radachsen.
- Drehen auf der Stelle ist möglich



Gelenktes, nicht-angetriebenes Rad

Ein gelenktes, nicht-angetriebenes Rad:

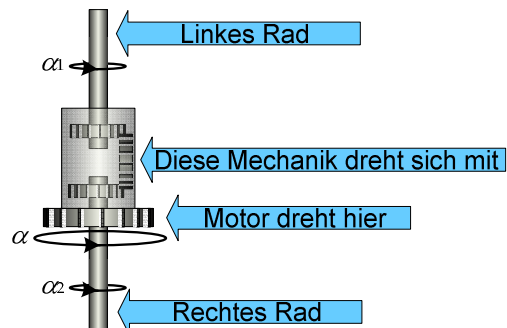
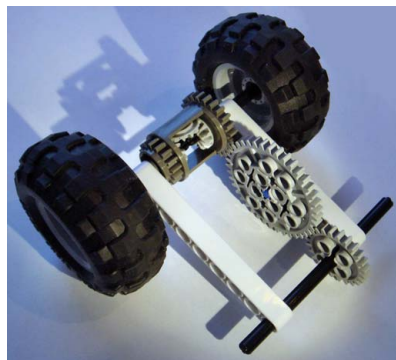
- Ein Motor lenkt ein Rad
- Ein weiterer Motor treibt zwei Antriebsräder an
- Zum Ausgleich unterschiedlicher Umdrehungen bei Kurvenfahrten, sind die Antriebsräder über ein *Differenzial* angebunden
- Wie beim gelenkten, angetriebenen Rad ergibt sich im Allgemeinen eine Kurvenfahrt
- Der Gangunterschied zwischen den Antriebsrädern darf nicht zu groß sein – keine engen Kurven, kein Drehen auf der Stelle möglich



Kapitel 5, Folie 7

Jörg Roth

Differenzial



Kapitel 5, Folie 8

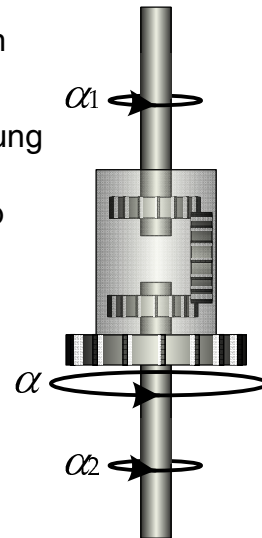
Jörg Roth

Differenzial

Ein Differenzial hat folgende Eigenschaften:

- Die gesamte Mechanik wird durch einen Motor um einen Winkel α gedreht
- Findet eine gleichmäßige Kraftübertragung auf beide Räder statt, drehen sich die beiden Räder auch um α , dann gilt also
 $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$
- Bei ungleichmäßiger Kraftübertragung können die Räder auch ungleich drehen. Allgemein gilt aber immer

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$



Kapitel 5, Folie 9

Jörg Roth

Differenzial

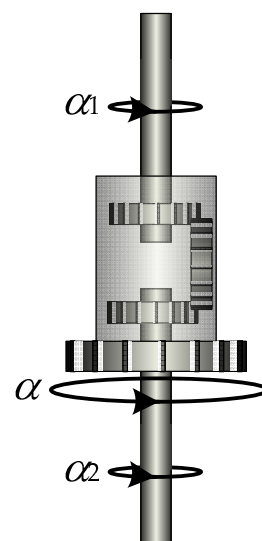
- Im Grenzfall blockiert ein Rad, dann dreht das andere Rad doppelt so schnell, z.B.

für $\alpha_1 = 0$ gilt $\alpha_2 = 2 \cdot \alpha$

- Ein Rad kann auch rückwärts laufen. Im Grenzfall:

für $\alpha = 0$ gilt $\alpha_2 = -\alpha_1$

- Drehen auf der Stelle ist jedoch nur möglich, wenn es durch einen weiteren Antrieb verursacht wird



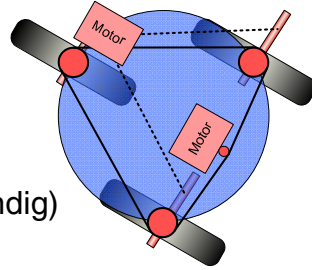
Kapitel 5, Folie 10

Jörg Roth

Synchrodrive

Synchrodrive:

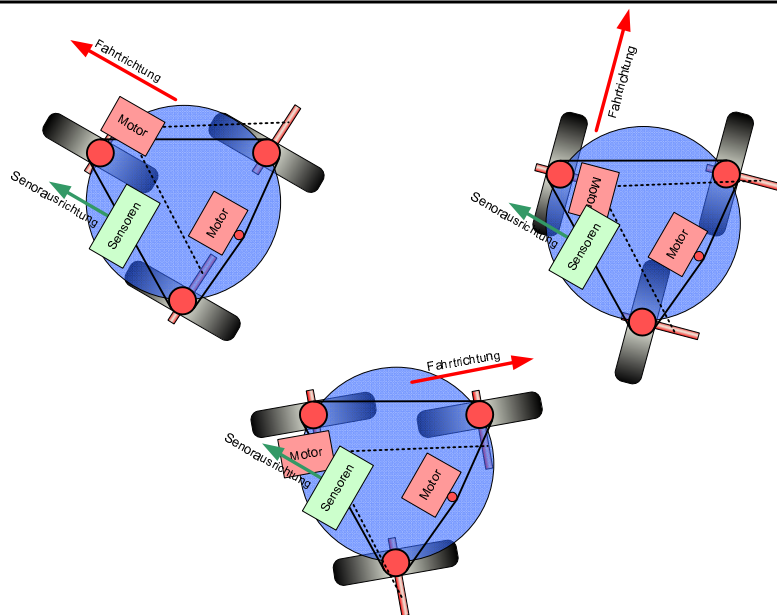
- Alle Räder werden in die gleiche Richtung gelenkt
- Alle Räder werden gleichmäßig angetrieben (kein Differenzial notwendig)
- Nur Geradeausfahrt möglich, aber in jede Richtung
- Die Plattform dreht sich *nicht* mit und hat immer dieselbe Ausrichtung – das kann ein Nachteil sein, wenn auf der Plattform Sensoren angebracht werden



Kapitel 5, Folie 11

Jörg Roth

Synchrodrive



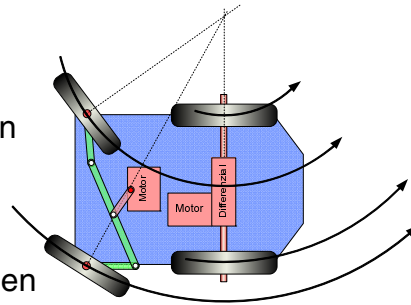
Kapitel 5, Folie 12

Jörg Roth

Weitere Antriebskonfigurationen

Plattformen mit 4 Rädern:

- Statt einem gelenkten Rad kann man auch zwei benutzen
- Dies ergibt eine größere Stabilität
- Die gelenkten oder un gelenkten Räder können angetrieben werden (jeweils über ein Differenzial)
- Problem: die gelenkten Räder werden bei einer Kurvenfahrt unterschiedlich eingeschlagen, damit sich alle Achsen im Kurvenzentrum schneiden. Hierzu sind eine Mechanik oder separate Motoren notwendig.



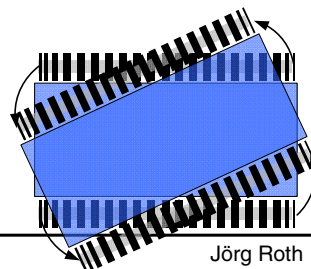
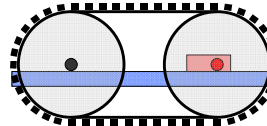
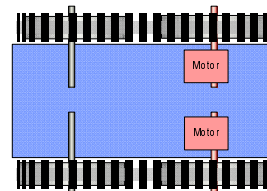
Kapitel 5, Folie 13

Jörg Roth

Weitere Antriebskonfigurationen

Panzer-Antrieb:

- Zwei Motoren treiben unabhängig zwei Ketten an
- Die Standfestigkeit wird durch das von den Ketten aufgespannte Rechteck definiert
- Nur die Geradeausfahrt ist ohne Reibung möglich
- Bei Drehungen werden Teile der Ketten gegen die Fahrtrichtung über den Boden bewegt. Präzise Fahrbewegungen sind daher schwierig.



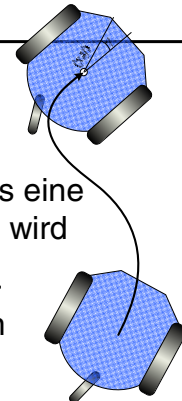
Kapitel 5, Folie 14

Jörg Roth

Berechnungen von Pfaden

Pfade berechnen:

- Ein Ziel ist es nun, auf der Basis der Antriebskonfiguration die Motoren so anzusteuern, dass eine gewünschte Position oder Pose eingenommen wird
- Zu jeder Konfiguration lassen sich Gleichungssysteme aufstellen, die die Motorumdrehungen zu der Position in Beziehung setzen
- Ziel: bei gegebener Position die Gleichungen nach den Motorumdrehungen auflösen. Häufig ergeben sich dabei *nicht-lineare* Gleichungssysteme.



Wir demonstrieren das Vorgehen beispielhaft an der Antriebskonfiguration mit zwei angetriebenen Rädern

Kapitel 5, Folie 15

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Fahrstrecke berechnen

Erste Fragestellung: Wo kommt man hin, wenn die Räder bestimmte Drehungen ausführen?

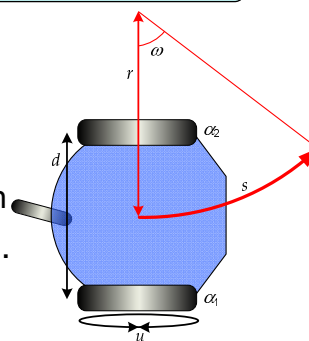
Sei

- α_1, α_2 die gemessenen Winkel der Radumdrehungen
- z.B. 720° für zwei Radumdrehungen

Der Pfad liegt auf einem Kreisbogen.

Gesucht

- die gefahrene Strecke s
- der Winkel des Kreisbogens ω
- die Entfernung r des Mittelpunkts des Kreisbogens



Kapitel 5, Folie 16

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Fahrstrecke berechnen

Es gelten folgende Zusammenhänge:

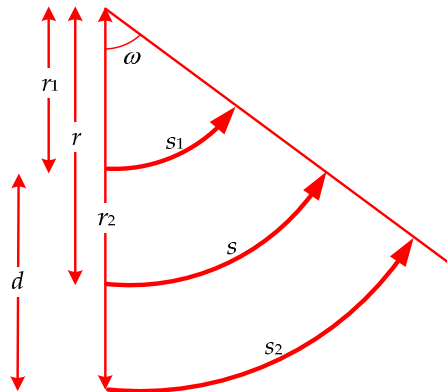
$$s_1 = u \frac{\alpha_1}{360} \quad s_2 = u \frac{\alpha_2}{360}$$

damit $s = \frac{s_1 + s_2}{2} = u \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{720}$

Weiter gilt $\frac{r_1}{s_1} = \frac{r_2}{s_2}$

also $\frac{r - d/2}{s_1} = \frac{r + d/2}{s_2}$

damit $s_2 r - s_2 \frac{d}{2} = s_1 r + s_1 \frac{d}{2}$



Kapitel 5, Folie 17

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Fahrstrecke berechnen

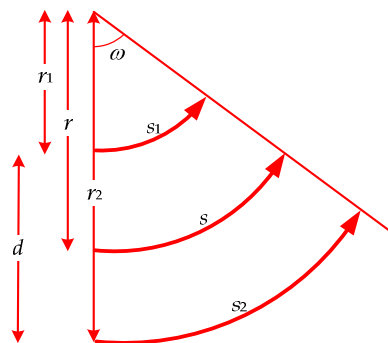
$$(s_2 - s_1) \cdot r = \frac{d}{2} (s_1 + s_2)$$

schließlich

$$r = \frac{d}{2} \cdot \frac{(s_1 + s_2)}{(s_2 - s_1)} = \frac{d}{2} \cdot \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

Den Winkel ω erhält man über Zusammenhänge am Kreisbogen

$$\omega = \frac{s}{r} \cdot \frac{180}{\pi} = \frac{u \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{720}}{\frac{d}{2} \cdot \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{(\alpha_2 - \alpha_1)}} \cdot \frac{180}{\pi} = \frac{u}{d} \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2\pi}$$



Kapitel 5, Folie 18

Jörg Roth

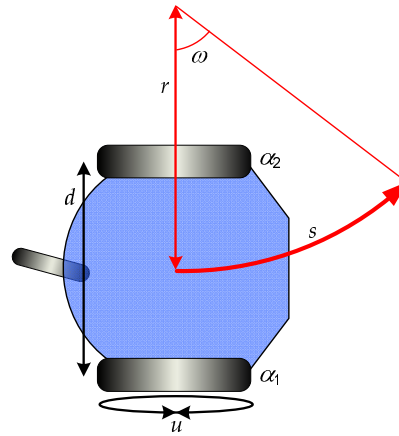
Zwei Antriebsräder – Fahrstrecke berechnen

Zusammengefasst gilt:

$$s = u \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{720}$$

$$\omega = \frac{u}{d} \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2\pi}$$

$$r = \frac{d}{2} \cdot \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$$



Kapitel 5, Folie 19

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Position ansteuern

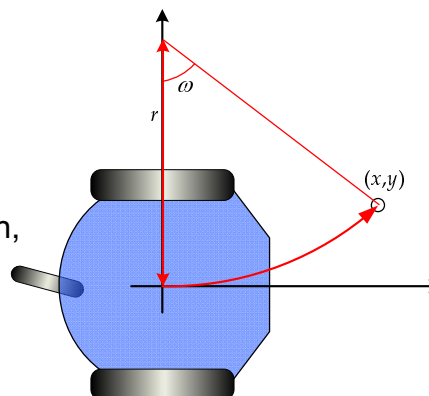
Zweite Fragestellung: Welche Radumdrehungen führen zu einer gewünschten Position?
(Ohne bestimmte Ausrichtung)

Sei also

- x, y eine Koordinate, die angesteuert werden soll

Gesucht

- α_1, α_2 die Radumdrehungen, die den Roboter zu dieser Position bringen



Kapitel 5, Folie 20

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Position ansteuern

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$r^2 = x^2 + (r-y)^2 \quad \text{damit} \quad r = \frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{y} + y \right)$$

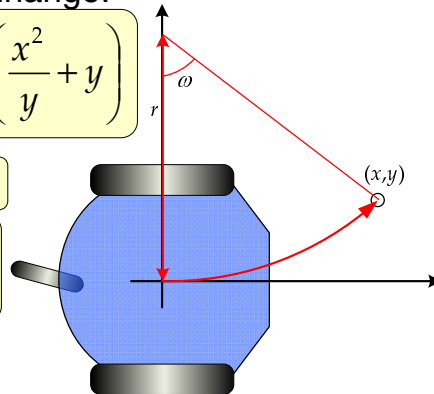
Weiter

$$x = r \cdot \sin(\omega) \quad r - y = r \cdot \cos(\omega)$$

$$\text{damit} \quad \frac{x}{r-y} = \frac{\sin(\omega)}{\cos(\omega)} = \tan(\omega)$$

$$\text{oder} \quad \omega = \arctan \left(\frac{x}{r-y} \right)$$

$$= \arctan \left(\frac{x}{1/2(x^2/y + y) - y} \right) = \arctan \left(\frac{2xy}{x^2 - y^2} \right)$$



Kapitel 5, Folie 21

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Position ansteuern

Wir definieren jetzt $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$

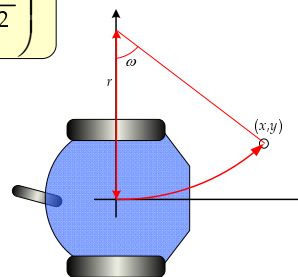
Dann gilt $\omega = \frac{u}{d} \cdot \frac{\Delta\alpha}{2\pi} = \arctan \left(\frac{2xy}{x^2 - y^2} \right)$

damit $\Delta\alpha = \frac{d}{u} \cdot 2\pi \arctan \left(\frac{2xy}{x^2 - y^2} \right)$

Weiter $r = d \cdot \frac{\alpha}{\Delta\alpha} = \frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{y} + y \right)$

damit

$$\alpha = \Delta\alpha \cdot \frac{1}{2d} \left(\frac{x^2}{y} + y \right) = \frac{\pi}{u} \cdot \left(\frac{x^2}{y} + y \right) \cdot \arctan \left(\frac{2xy}{x^2 - y^2} \right)$$



Kapitel 5, Folie 22

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Position ansteuern

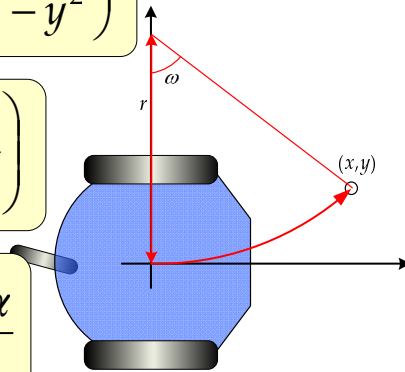
Zusammengefasst gilt:

$$\alpha = \frac{\pi}{u} \cdot \left(\frac{x^2}{y} + y \right) \cdot \arctan \left(\frac{2xy}{x^2 - y^2} \right)$$

$$\Delta\alpha = \frac{d}{u} \cdot 2\pi \cdot \arctan \left(\frac{2xy}{x^2 - y^2} \right)$$

$$\alpha_1 = \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}$$

$$\alpha_2 = \alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}$$

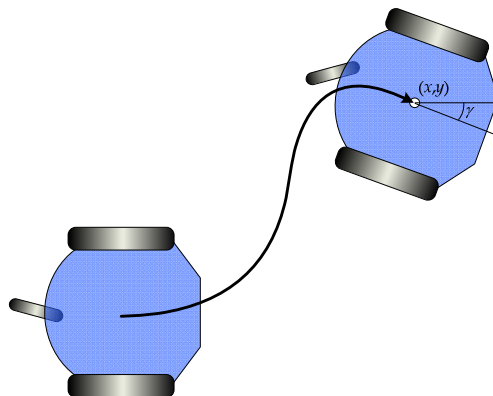


Kapitel 5, Folie 23

Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Position und Ausrichtung ansteuern

Dritte Fragestellung: Welche Radumdrehungen führen zu einer gewünschten Position (x, y) , wenn wir eine bestimmte Ziel-Ausrichtung γ wünschen?



Kapitel 5, Folie 24

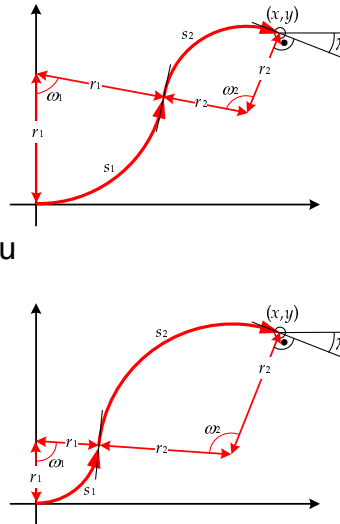
Jörg Roth

Zwei Antriebsräder – Position und Ausrichtung ansteuern

Idee: es werden zwei Kreisbögen abgefahren

- Jeder einzelne Kreisbogen kann über die vorangehenden Betrachtungen berechnet werden
 - Problem: es gibt unendlich viele Möglichkeiten für r_1, r_2 , das Ziel zu erreichen
 - Einschränkende Annahme

$$r_1 = r_2 (= r)$$
- Sinnvolle Annahme, da so enge Kurven vermieden werden



Kapitel 5, Folie 25

Jörg Roth

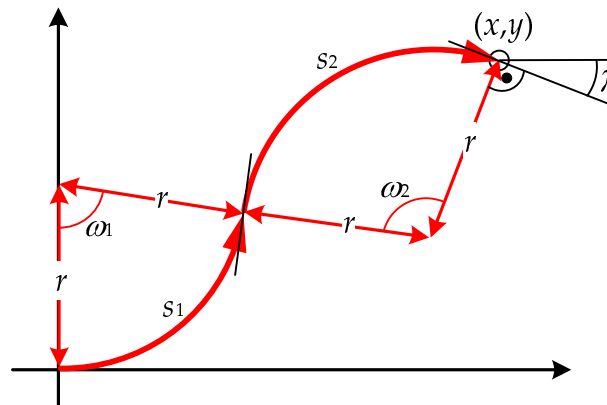
Zwei Antriebsräder – Position und Ausrichtung ansteuern

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$x = 2r \cdot \sin(\omega_1) + r \cdot \sin(\gamma)$$

$$y = r - 2r \cdot \cos(\omega_1) + r \cdot \cos(\gamma)$$

$$\omega_2 = \gamma - \omega_1$$



Kapitel 5, Folie 26

Jörg Roth

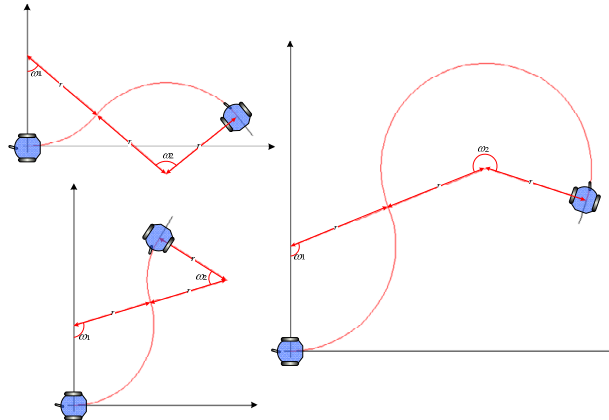
Zwei Antriebsräder – Position und Ausrichtung ansteuern

Nach (sehr) vielen Umrechnungsschritten erhält man:

$$r = \frac{1}{2} \frac{y(1 + \cos(\gamma)) - x \sin(\gamma) - \sqrt{x^2(\sin^2(\gamma) - 2 \cos(\gamma) + 2) + y^2(3 + \cos^2(\gamma)) - 2xy \sin(\gamma)(1 + \cos(\gamma))}}{\cos(\gamma) - 1}$$

$$\omega_1 = \arccos\left(\frac{(1 + \cos(\gamma)) - \frac{y}{2r}}{2}\right)$$

$$\omega_2 = \gamma - \omega_1$$



Kapitel 5, Folie 27

Jörg Roth

Antriebskonfigurationen für unebenes Gelände

Bei bisherige Antriebskonfigurationen liegen die Antriebspunkte auf einer Ebene

- geeignet für Straße oder in Gebäuden
- der Raddurchmesser bestimmt die Größe der überfahrbaren Hindernisse

Ziel bei unebenem Gelände

- möglichst viele Antriebspunkte sollen auf dem Boden aufsetzen
- Einsatz: Exploration (z.B. Mars), Einsatz in Gefahrenzonen, Bergung

Problem:

Selbstlokalisierung durch Odometrie sehr schwierig

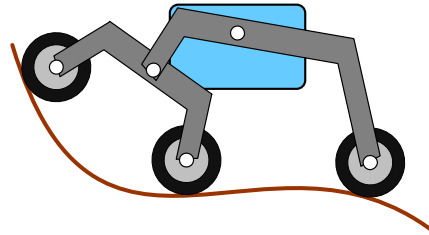
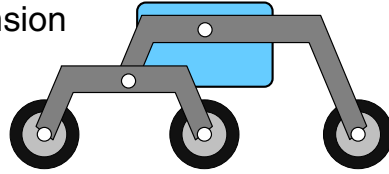
Kapitel 5, Folie 28

Jörg Roth

Antriebskonfigurationen für unebenes Gelände

Beispiel 1: Rocker-Bogie-Suspension

- 6-Rad-Antrieb
- Alle Räder können unabhängig voneinander gehoben oder abgesenkt werden
- Keine beliebigen 4 Räder müssen sich in einer Ebene befinden
- Keine Federn, keine Motoren notwendig in den 4 Gelenken
- Wird jedes Rad angetrieben, können Hindernisse überwunden werden, die größer als die Räder sind

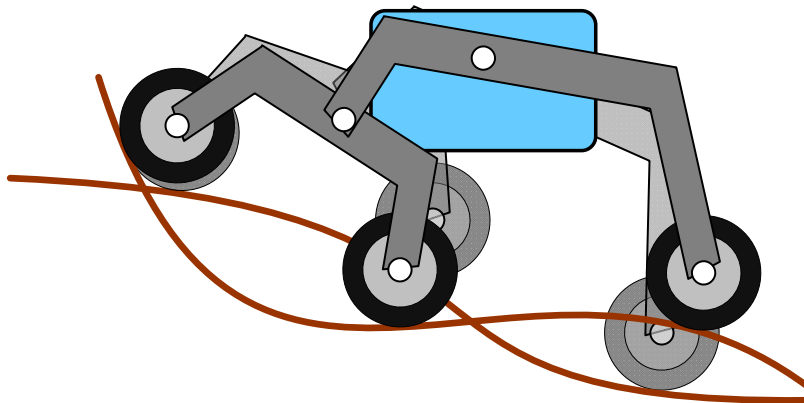


Kapitel 5, Folie 29

Jörg Roth

Antriebskonfigurationen für unebenes Gelände

- Das Gelände auf der rechten und linken Seite muss sich nicht synchron ändern



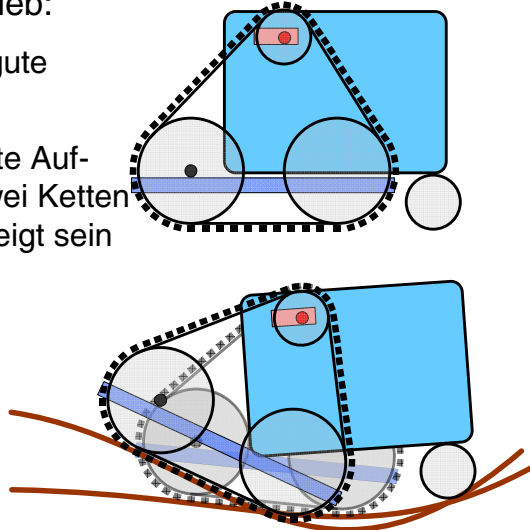
Kapitel 5, Folie 30

Jörg Roth

Antriebskonfigurationen für unebenes Gelände

Beispiel 2: Kettenantrieb:

- Ketten haben eine gute Bodenhaftung
- Durch eine geeignete Aufhängung können zwei Ketten unterschiedlich geneigt sein
- Häufig: Stützrad



Kapitel 5, Folie 31

Jörg Roth

Das Ende

- Wir haben jetzt Grundprinzipien für die Selbstlokalisierung kennen gelernt
- Innovationen für die Zukunft:
 - Verbesserung der Sensorik
 - Erhöhung der lokalen Rechenleistung
 - Verbesserungen der Umweltmodellierung
 - Verbesserung der Sensor-Auswertungen, statistisch oder mit Mitteln der künstlichen Intelligenz



Kapitel 5, Folie 32

Jörg Roth