

Positionsbestimmung

Seminar Mobile Systeme, WS 2004/2005

Universität Koblenz-Landau

Markus Pinl

mpinl@uni-koblenz.de

Zusammenfassung

Eine funktionierende Positionsbestimmung ist eine grundlegende Voraussetzung für autonomes Fahren. Wegen der Komplexität der Anforderungen ist eine Kategorisierung vorhandener oder gerade entwickelter Verfahren zur Positionsbestimmung wichtig.

Eine Einführung in das Themengebiet der Positionsbestimmung sowie einige Kategorisierungsmöglichkeiten werden in dieser Arbeit gegeben. Der Fokus liegt auf bezugspunktbasierten Verfahren. Trilateration und Triangulation sind dabei verbreitete Berechnungsverfahren, die auf der Vermessung mehrerer Bezugspunkte durch das mobile System basieren und deren Anwendung in der Praxis an Hand von zwei Beispielen erläutert wird. Ein drittes Beispiel wird zeigen, dass sich auch ein Verfahren ohne Vermessung mehrerer Bezugspunkte realisieren lässt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
1 Einleitung.....	3
1.1 Motivation.....	3
1.2 Rolle der Positionsbestimmung.....	3
1.3 Ziel dieser Arbeit.....	4
2 Grundlagen der Positionsbestimmung.....	4
2.1 Maßstab.....	4
2.2 Auflösungsfähigkeit.....	5
2.3 Anzahl lokalisierbarer mobiler Systeme.....	5
2.4 Skalierung des Einsatzgebiets.....	6
2.5 Echtzeitfähigkeit und Aktualisierungsrate.....	7
2.6 Robustheit.....	7
3 Modellentwicklung.....	8
3.1 Berechnungsverfahren.....	9
3.2 Trilateration.....	9
3.2.1 Hyperbelverfahren.....	11
3.2.2 Pseudoentfernungen.....	12
3.3 Triangulation.....	13
4 Kategorisierung.....	14
4.1 CONAC.....	15
4.2 PRUNS.....	17
4.3 Beacon Localizer.....	20
4.4 Fazit.....	23
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	25
Literatur.....	27

1 Einleitung

Das autonome Fahren ist eine Idee, welche die Menschen seit sehr langer Zeit fasziniert träumen lässt. Schon ältere Fernsehserien wie *Knight Rider* oder Filme wie *Demolition Man* zeigen Fahrzeuge, die ohne menschlichen Eingriff durch Städte und über Landstraßen navigieren.

1.1 Motivation

In der Realität wie auch in der Fiktion dreht sich die Zielsetzung meist um erhöhten Komfort und verbesserte Sicherheit. Neben einer besseren Auslastung von zur Verfügung stehenden Kapazitäten sind dies die wichtigsten Anwendungsschwerpunkte. Auch das US-Militär lässt auf diesem Gebiet forschen, und unbemannte satellitengestützte Spionagesonden sind bereits im Einsatz, während auf der *Grand Challenge* Forscherteams in Wettbewerben autonome Bodenfahrzeuge auf einen Hindernisparcours durch die Wüste schicken. Dies dient dazu, Fahrzeuge zu entwickeln, die „helfen, auf dem Schlachtfeld amerikanische Leben zu retten“ ([GrandCh05], Übersetzung des Autors). Es steht also letzten Endes wiederum die Sicherheit im Vordergrund. In Flugzeugen wird schon seit vielen Jahren der Autopilot eingesetzt, um einen bestimmten Kurs zu halten und die Piloten zu entlasten. Untereinander kommunizierende Autos könnten vorhandenen Verkehrsraum durch kürzere Sicherheitsabstände besser ausnutzen (vgl. [Nett02]).

Dieses Forschungsgebiet ist sehr weit und umfasst eine Vielzahl unterschiedlichster Bereiche. Angefangen bei der Modellbildung des Systems, der Umwelt und der Steuerung über Künstliche Intelligenz zur Pfadplanung, Aufgabenausführung und Reaktion auf die Umgebung, endet es noch nicht beim hardwareseitigen Aufbau der mobilen Systeme. Die Wahl der Sensoren und Aktoren, also den Bindegliedern zwischen der Umwelt und dem Prozessor, hängt unter anderem vom Einsatzgebiet, aber auch weiteren Einschränkungen wie Gewicht und Größe, dem Energieverbrauch, der Robustheit in Bezug auf veränderte Umweltsituationen und nicht zuletzt von den Kosten der Hardware ab.

1.2 Rolle der Positionsbestimmung

Eine sehr wichtige Rolle kommt dem Teilgebiet der Positionsbestimmung zu, welches den Kern dieser Arbeit bildet. Wenn ein Fahrzeug nicht weiß, wo es sich befindet, ist es unmöglich, effiziente Bewegungen zu planen, bestimmte Objekte zu finden oder eine Zielposition zu erreichen [Azenha02]. Die Positionsbestimmung muss dabei mit einer für den Anwendungsbereich angemessenen Genauigkeit und in Echtzeit stattfinden. Davon abgesehen sind die Anforderungen an die Positionsbestimmung so unterschiedlich wie die möglichen Einsatzgebiete: Für Flugzeuge reicht abseits von

Start und Landung im Allgemeinen eine auf einige hundert Meter genaue Position, die über GPS¹ überall auf der Welt bestimmt werden kann, wogegen für ein Fahrzeug, welches in einer Lagerhalle zwischen den Regalen navigieren muss, lediglich die genaue Position innerhalb dieser Halle von Bedeutung ist. Wo auf der Welt es sich befindet, ist irrelevant. Ein Auto, welches automatisch einparken kann, muss seine Position nur relativ zur erkannten Parklücke und etwaigen Hindernissen kennen – die Grenzen zur Hinderniserkennung durch zum Beispiel reine Näherungssensoren sind oft fließend.

1.3 Ziel dieser Arbeit

Es soll eine Einführung in den komplexen Bereich der Positionsbestimmung gegeben werden. Einige Kriterien zur Einordnung bestehender Positionierungssysteme werden genannt sowie besondere Anforderungen an solche Systeme im Hinblick auf das autonome Fahren von mobilen Systemen beschrieben. Mobile Systeme sind alle Arten von Fahr- oder Flugzeugen, die einen eigenen Antrieb besitzen. Anschließend sollen einige Methoden, die sich entweder bereits im Einsatz oder gerade in der Entwicklung befinden, genauer betrachtet werden.

2 Grundlagen der Positionsbestimmung

Es folgt eine überblicksartige Einführung in den Bereich der Positionsbestimmung. Es sollen Kriterien zur Bewertung und Einordnung von Positionierungssystemen genannt werden.

2.1 Maßstab

Es gibt, wie oben angedeutet, also unterschiedliche Maßstäbe in der Positionsbestimmung ([Azenha02], S. 3). Für manche Anwendungsgebiete ist eine globale Positionsbestimmung nötig, andere brauchen eine Position innerhalb eines engeren Kontextes, wie zum Beispiel einer Lagerhalle, und wieder andere setzen voraus, dass das mobile System weiß, aus welchen Teilen es besteht und wo bzw. in welcher Stellung sich diese einzelnen Teile befinden. Dieser letzte Punkt ist die personale Position, die beispielsweise für ein autonom fahrendes LKW-Gespänn interessant ist: In welchem Winkel stehen Zugmaschine und Anhänger zueinander?

Dieses Beispiel zeigt, dass unter einer Position nicht nur ein Ort innerhalb eines zwei- oder dreidimensionalen Koordinatensystems verstanden werden muss, sondern auch die Ausrichtung des mobilen Systems oder auch von Teilen davon eine Rolle spielt: Ein mobiles System kann nur eine bestimmte Richtung ansteuern, wenn es weiß, in welche Richtung das Fahrzeug momentan aus-

¹ Global Positioning System, satellitengestützt, siehe [Tomaszek03].

gerichtet ist. Viele Ansätze zur Positionsbestimmung können diese Information – also die Ausrichtung – gleichzeitig mit der Position bestimmen, andere sind auf zusätzliche Hilfsmittel wie zum Beispiel einen Kompass angewiesen (vgl. [Borenstein96], Kapitel 2).

In konkreten Anwendungen sind die Grenzen vor allem zwischen globaler und lokaler Position meist fließend. Erstens geschieht eine globale Positionsbestimmung in den meisten Fällen so, dass die relative Position zu einem Fixpunkt mit bekannter Position in einem globalen Koordinatensystem bestimmt wird. Anschließend lässt sich diese relative Position in eine globale umrechnen. Zweitens kann es in bestimmten Situationen notwendig werden, die Position mit einer höheren Auflösung in einem engeren Gebiet zu kennen, während eine globale Position bei derselben Anwendung für andere Zwecke benötigt wird. Ist das eingesetzte global arbeitende Positionierungssystem aber zu ungenau, muss innerhalb dieses engeren Gebiets ein anderes System benutzt werden. Ein Beispiel dafür wäre ein autonom agierendes Flugzeug, was in der Luft die Position per GPS bestimmt (vgl. [Boebel99]) und bei der Landung auf andere Systeme umschaltet, die eine genauere Position innerhalb des gültigen Anflugkorridors liefert. Beide Systeme existieren unabhängig voneinander: Neben dem bereits angesprochenen GPS für die globale Ortung das sogenannte Instrument Landing System (ILS) für den Landeanflug.

2.2 Auflösungsfähigkeit

Es wurde bereits das Thema unterschiedlich hoher Auflösungen angesprochen. Damit ist die Genauigkeit der Positionsbestimmung gemeint. Die Anforderungen in diesem Bereich variieren stark mit dem Anwendungszweck, und meist können sehr genaue Systeme nur auf einem kleinen Areal eingesetzt werden, wogegen Systeme für weitläufige Einsatzgebiete meist ungenauer in der Positionsbestimmung werden. Da jedoch in erster Näherung für die benötigte Auflösung die Größe des mobilen Systems angenommen werden kann, relativiert sich diese Einschränkung, da sehr kleine mobile Systemen meist nur sehr kleine Gebiete befahren können: Ein autonomes mobiles System muss seine eigene Position mindestens in einer Auflösung, die in etwa seinen eigenen Dimensionen entspricht, bestimmen können, damit es navigieren und mit der Umwelt interagieren kann (vgl. [Azenha02], S. 3).

2.3 Anzahl lokalisierbarer mobiler Systeme

Große Unterschiede sowohl in den Anforderungen als auch in den Fähigkeiten etablierter Positionierungssysteme existieren auch in der Anzahl der lokalisierbaren mobilen Systeme. Während im Anflug auf eine bestimmte Landebahn im Normalfall lediglich ein Flugzeug lokalisiert werden

muss, befinden sich im Luftraum eines Landes eine Vielzahl an Luftfahrzeugen auf unterschiedlichen Kursen in unterschiedlichen Höhen.

Wie gut die eingesetzten Positionierungssysteme mit der Anzahl an zu lokalisierenden mobilen Systemen skalieren, hängt maßgeblich von der Arbeitsweise der Positionierungssysteme ab. Je nach gewählter Arbeitsweise leiden die Systeme unterschiedlich stark unter Abschattung und Übersprechen der Signale. Ist ein Punkt erreicht, in dem durch zu viel Aktivität im Einsatzgebiet der Kontakt zu einzelnen mobilen Systemen verloren geht, weil sie durch andere verdeckt werden, so müssen Notfalllösungen implementiert sein, die es den betroffenen mobilen Systemen dennoch erlauben zu agieren.

Viel größer werden jedoch die Probleme durch übersprechende Signale. Es wird davon ausgegangen, dass sich alle mobilen Systeme einen gemeinsamen Bereich teilen, in dem sie Signale zur Positionsbestimmung austauschen. Das kann das Medium Luft sein, in der sich Schallwellen ausbreiten (siehe Kapitel 4.2) oder in der mittels Lichtimpulsen Entfernungen gemessen werden oder aber auch etwas abstrakter ein Kommunikationskanal, über den Positionierungsdaten ausgetauscht werden. Auf der Annahme aufbauend, dass für ein einzelnes mobiles System die ausgetauschten Signale aller anderen Systeme auf diesem gemeinsamen Medium Störsignale, also Rauschen darstellen, verschlechtert sich mit jedem weiteren aktiven mobilen System das Signal-Rauschverhältnis² für das einzelne mobile System. Ist eine kritische Schwelle unterschritten, sind die Nutzsignale aus dem Rauschen der anderen mobilen Systeme nicht mehr zu extrahieren und eine Positionsbestimmung damit unmöglich, die kritische Grenze der Anzahl an mobilen Systemen ist dann bereits überschritten.

2.4 Skalierung des Einsatzgebiets

Der zweite Aspekt der Skalierungsfähigkeiten eines Systems zur Positionsbestimmung ist der der möglichen Vergrößerung des Einsatzgebietes. Systeme zur globalen Ortung bieten dort prinzipiell wenige Möglichkeiten. Da zum Beispiel GPS global auf der Erdoberfläche und im Luftraum funktioniert, wäre allenfalls eine Erweiterung in den Bereich der Unterwasserortung denkbar, was jedoch auf Grund der Arbeitsweise nicht möglich ist³. Andere Ortungssysteme decken nur einen kleinen Bereich ab, können aber mehrere dieser Bereiche zu einem größeren verbinden und auf diese Weise prinzipiell beliebig große⁴ Areale abdecken (vgl. [Borenstein96], S. 164, *RO-*

2 Signal to noise ration (SNR), hier im übertragenen Sinne gebraucht, da es nicht direkt um Signalstärken geht

3 Die abgegebene elektromagnetische Strahlung wird durch Hindernisse (Häuser, Wasser etc.) blockiert

4 Solange die Uhren synchronisiert arbeiten, diese Aufgabe wird mit zunehmender Entfernung schwieriger

BOSENSE). Wieder andere unterstützen dies nicht und können somit nicht mit dem Einsatzgebiet mitwachsen.

2.5 Echtzeitfähigkeit und Aktualisierungsrate

Durch den Anwendungsbereich des autonomen Fahrens sind zwei weitere Punkte von Bedeutung, die ergänzend zu beachten sind: die Echtzeitfähigkeit und die Aktualisierungsrate der Position. Echtzeitfähigkeit bedeutet, dass zwischen der Messung der Sensordaten und der darauf aufbauenden aktualisierten Position nur eine maximale Zeitspanne verstreichen darf. Sie hängt eng zusammen mit der Aktualisierungsrate, die beschreibt, wie häufig in der Sekunde eine neu berechnete Position vom Ortungssystem geliefert werden kann. In Abhängigkeit vor allem von der angepeilten Fortbewegungsgeschwindigkeit des mobilen Systems entstehen gerade bei der Aktualisierungsrate sehr unterschiedliche von der Anwendung abhängige Anforderungen, während für die Bedingung der Echtzeitfähigkeit immer eine recht kurze Zeitdauer einzuhalten ist.

In diesem Zusammenhang ist auch die Zeitdauer interessant, welche die Sensoren benötigen, um die notwendigen Informationen aus der Umwelt zu ermitteln (siehe Kapitel 3). Bewegt sich ein mobiles System mit einer vergleichsweise hohen Geschwindigkeit fort, so leidet die Genauigkeit der Positionsbestimmung, da sich die Position noch während der Messung verändert. Soll eine hohe Genauigkeit mit hoher Fortbewegungsgeschwindigkeit gekoppelt werden, muss zwangsläufig diese Zeitspanne möglichst kurz gehalten werden.

2.6 Robustheit

Die Störanfälligkeit oder – positiv ausgedrückt – Robustheit eines Positionierungssystems in Bezug auf Umwelteinflüsse ist eine weitere Einschränkung, die von der jeweiligen Anwendung abhängt. Während kleine mobile Systeme, die in kontrollierten Umgebungen arbeiten, genauso wie alle nur für den indoor-Bereich, nicht mit großen Störungen durch Umwelteinflüsse rechnen müssen, gilt dies für einen Autopilot eines Flugzeuges genausowenig wie für bei Nebel oder Schneegestöber fahrende Autos ([MacLoed94], S. 40). Sind die Ortungssysteme nicht robust genug, werden sie unter erschwerten Bedingungen im besten Fall ungenauere Daten und im schlimmsten Fall völlig falsche Informationen liefern, die vom mobilen System erkannt und kompensiert werden müssen. In sicherheitskritischen Bereichen ist eine Anwendung eines nicht angemessen stabilen Systems nicht möglich.

Fallen zur Positionsbestimmung notwendige Komponenten aus, so dass das System nicht mehr zuverlässig funktionieren kann, so bietet sich die Integration einer Notfalloption an. Es kann eine

Kombination aus einem Primär- und einem Sekundärsystem zur Positionsbestimmung entwickelt werden, bei dem im normalen Betrieb das Primärsystem arbeitet und im Falle einer Störung das Sekundärsystem als Notfalllösung übernimmt.

3 Modellentwicklung

Nach dieser Einführung in das Themengebiet der Positionsbestimmung folgt nun eine Zusammenstellung grundlegender verbreiteter Ansätze. Es soll ein Modell entwickelt werden, welches den Prozess der Positionsbestimmung im Kontext dieser Arbeit beschreibt.

Alles, was ein mobiles System über seine Umwelt weiß, beruht entweder auf bereits einprogrammiertem Wissen (zum Beispiel einer Landkarte des Einsatzgebietes) oder auf Sensorinformationen. Beide Informationsquellen muss es miteinander verbinden. Die Sensorik kann passiv oder aktiv arbeiten: Während passive Sensoren bereits vorhandene Umweltinformationen aufnehmen und zur Weiterverarbeitung leiten, benutzen aktive einen auf dem mobilen System befindlichen Emitter. Dieser strahlt eine Energieform wie beispielsweise Schall oder Licht aus, so dass die Sensoren die dadurch in der Umwelt hervorgerufenen Reaktionen aufzeichnen können.

Aus diesen Daten erstellt das mobile System ein Abbild der aktuellen Arbeitsumgebung (vgl. [Azenha02], S. 2) und kann daraus – aufbauend auf bekannten Informationen – auf verschiedene Weise seine Position bestimmen: Neben einer vollständigen Vermessung des Raumes und anschließender Einordnung in eine vorhandene Landkarte (vgl. [Borenstein96], Kapitel 8) werden häufig auch nur wenige besondere Merkmale der Umwelt herangezogen: so genannte Landmarken oder Baken (engl.: *beacon*). Der Hauptunterschied zwischen Landmarken und Baken ist, dass erstere passiv in der Umwelt vorhandene (im Falle von natürlichen Landmarken) oder angebrachte (bei künstlichen Landmarken) Objekte sind (beispielsweise Reflektoren für Laserlicht) und letztere aktive Komponenten darstellen, die Signale in die Umwelt aussenden. Ultraschallsender, die periodische Impulse abgeben, gehören beispielsweise zu dieser Art von Baken. Im Folgenden werden beide Arten unter dem Begriff *Bezugspunkt* zusammengefasst.

Ein mobiles System muss also Informationen über die Bezugspunkte aus der Umwelt sammeln können (dies entspricht dem Abbild der Arbeitsumgebung) und kann anschließend durch bereits bekanntes Wissen über die gefundenen Bezugspunkte die eigene Position bestimmen. Dazu muss es nicht nur die Sichtbarkeit⁵ eines Bezugspunkts feststellen können, sondern die einzelnen Be-

⁵ Gemeint ist, ob der Bezugspunkt durch die Sensoren wahrgenommen werden kann.

zugspunkte auch unterscheiden und identifizieren können⁶. Mit Bezugspunkten arbeitende Verfahren stellen den Kernbereich dieser Arbeit dar, wobei auf natürliche Landmarken und Spezialfälle – z.B. kontinuierliche Landmarken (*line-navigation*, vgl. [Azenha02], S. 25) – nicht näher eingegangen werden soll. Nähere Informationen vor allem zu landmarkenbasierten Verfahren befinden sich in [Kind03], [Azenha02], S. 24ff und [Borenstein96], Kapitel 7.

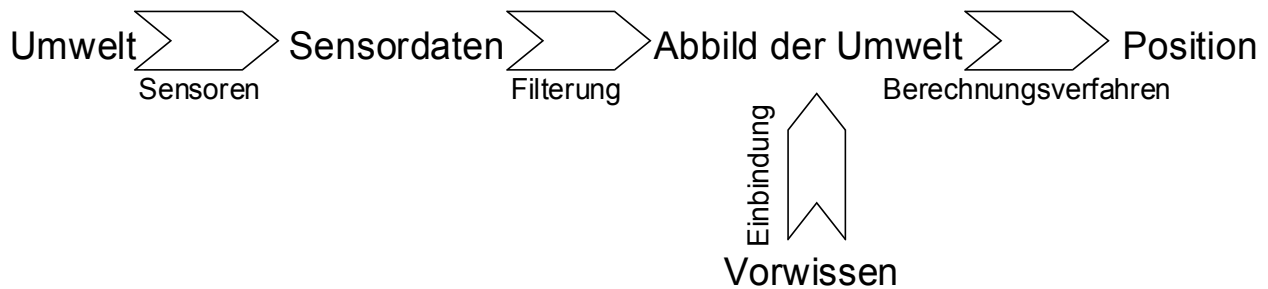


Abbildung 1: Das Modell der Arbeitsweise

Das entworfene Modell in Abbildung 1 entspricht der oben beschriebenen Arbeitsweise.

3.1 Berechnungsverfahren

Das Standardverhalten von auf Bezugspunkten basierenden Positionsbestimmungsverfahren besteht darin, dass das mobile System über die Sensorik sichtbare Bezugspunkte erkennt, identifiziert und eine für das Berechnungsverfahren relevante Kenngröße ermittelt. Das Ergebnis ist ein Abbild der Umgebung, welches die zur Positionsbestimmung relevanten Daten enthält. Anschließend wird durch bereits vorhandenes Wissen über die Bezugspunkte – hauptsächlich deren Position im zu Grunde liegenden Koordinatensystem – aus diesem Umgebungsabbild die aktuelle Position des mobilen Systems ermittelt. Die meisten dabei angewendeten Berechnungsverfahren basieren darauf, entweder Entfernungen oder Winkel zwischen dem mobilen System und den Bezugspunkten zu ermitteln.

3.2 Trilateration

Die Kenngröße für die Trilateration ist die Entfernung zwischen dem mobilen System und einigen Bezugspunkten. Je mehr Messungen zu verschiedenen Bezugspunkten vorliegen, desto genauer kann die Position ermittelt werden, falls aus dem Rahmen fallende Fehlmessungen erkannt und kompensiert werden können (vgl. [Borenstein96], S. 153). Für eine Ortung in einer Ebene müssen zu mindestens drei Bezugspunkten die Entfernungen gemessen werden.

⁶ Es gibt auch Systeme, die nicht auf eine Identifikation einzelner Bezugspunkte angewiesen sind, vgl. [Borenstein96], S. 179.

Entfernungen werden letzten Endes meist durch Messen von Signallaufzeiten ermittelt, wobei zwei verschiedene technische Alternativen erläutert werden sollen: Ein auf dem mobilen System installierter Emitter oder synchronisierte Sender.

Die erste Lösung arbeitet mit impulsartigen Signalen, zum Beispiel einem Lichtblitz, der vom Emitter abgegeben wird. Das Signal wird von den Bezugspunkten beantwortet⁷ und die Sensoren auf dem mobilen System können diese Antwort empfangen und den jeweiligen Bezugspunkten zuordnen (Signal und Echo müssen dabei keine identische Energieform haben). Da die Zeitdauer zwischen dem Abschicken des Signals und dem Eintreffen der Echos gemessen werden kann, lässt sich unter der Voraussetzung, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der gewählten Energieform im aktuellen Medium bekannt ist, die Entfernung berechnen. Sollen mit dieser Methode mehrere mobile Systeme lokalisiert werden, müssen diese nicht nur die Bezugspunkte an Hand der Echos unterscheiden können, sondern auch, ob sie dieses Echo ausgelöst haben oder ob es das Signalecho eines anderen mobilen Systems im Einsatzgebiet war. Die Anzahl an lokalisierbaren Systemen ist damit je nach gewählter genauer Implementierung mehr oder weniger stark begrenzt. Ein möglicher Lösungsansatz wäre, dass die mobilen Systeme sich abwechseln (*round-robin* bzw. TDM⁸). Es entstehen Gleichungen der Form:

$$|B_i - X| = r_i + v_i$$

Der Abstand zwischen Bezugspunkt B_i und Position des Empfängers X beträgt den aus der Signallaufzeit errechneten Wert r_i . Der letzte Summand der Gleichung v_i stellt den Messfehler dar, damit die Gleichung erfüllt sein kann (dies muss in einem überbestimmten Gleichungssystem ohne diesen Summand nicht unbedingt der Fall sein. Da alle Messungen mit Fehlern behaftet sind, könnte der Fall eintreten, dass es keinen gemeinsamen Schnittpunkt gibt). Die Fehler aller Gleichungen sind zu minimieren (vgl. [Yao04], S. 753).

Im Gegensatz dazu ist die Entfernungsmessung mittels direkt gemessener Signallaufzeiten bei der zweiten Methode nicht so einfach möglich, da zwar die Sender untereinander synchronisiert sind und ein Signal mit gleicher Phase aussenden, die mobilen Systeme üblicherweise jedoch asynchron zu den Sendern arbeiten (vgl. [Azenha02], S. 15). Dies bedeutet, dass der Empfänger nicht die absolute Signallaufzeit, sondern entweder die relative Laufzeit der Signale zueinander, also lediglich Laufzeitunterschiede, oder Entfernungen mit einem gewissen Fehler ermitteln kann. Eine Positions-

⁷ Damit ist mehr als eine reine Reflektion gemeint, siehe Kapitel 4.1

⁸ Time Division Multiplexing

bestimmung ist auch in diesem Fall möglich. Dazu existieren zwei Wege: Das Hyperbelverfahren und Pseudoentfernungen.

3.2.1 Hyperbelverfahren

Beim Hyperbelverfahren werden Entfernungsunterschiede bestimmt. Dazu konstruiert das mobile System anschließend hyperbolische Positionsfunktionen (Hyperbelstandlinien) zu einem Senderpaar mit der Eigenschaft, dass alle Positionen auf dieser Funktion denselben gemessenen Laufzeitunterschied zu den Sendern haben. Aus den Schnittpunkten mehrerer dieser Funktionen zu verschiedenen Senderpaaren lässt sich dann die Position errechnen.

Hyperbeln sind in der Mathematik definiert als eine Menge von Punkten. Diese Punkte haben die Eigenschaft, dass ihre Entfernungen zu den zwei Brennpunkten B_1 und B_2 der Hyperbel sich jeweils um eine Konstante unterscheiden (siehe Abbildung 2):

$$hyp = \{ X \mid |\overline{B_1 X} - \overline{B_2 X}| = k \}$$

Wie auf der Abbildung zu erkennen ist, entstehen zwei disjunkte Kurven. Wird der Betrag aus der Definition entfernt, kann mittels des Vorzeichens von k eine der beiden Kurven ausgewählt werden. Es liegt auf der Hand, dass die dann ausgewählte Punktmenge die möglichen Aufenthaltsorte beschreibt, wenn die Brennpunkte auf die Positionen der Sender gelegt werden und die Konstante k dem ermittelten Entfernungsunterschied gleichgesetzt wird.

Die Gleichung einer Hyperbel lässt sich ähnlich der einer Ellipse aufstellen (vgl. [Weisstein04]), wobei zur Vereinfachung der Schnittpunkt der Asymptoten auf den Ursprung des Koordinatensystems gelegt wurde und davon ausgegangen wird, dass die Hyperbel nicht in der Ebene gedreht liegt:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{c^2 - a^2} = 1$$

Die Parameter a und c beschreiben die Lage der Hyperbel: a entspricht dem Abstand zwischen dem Schnittpunkt der Asymptoten und einem Scheitelpunkt der Hyperbel. c ist der Abstand zwischen diesem Schnittpunkt und einem beliebigen Brennpunkt (hier wird die Symmetrie der Hyperbel ausgenutzt).

Wird die zu einer Messung gehörige Hyperbelgleichung aufgestellt, so ist offensichtlich, dass k dem gemessenen Entfernungsunterschied entsprechen muss. Wegen der Symmetrie gilt auch $k = 2a$, also muss für die Gleichung a auf den halben gemessenen Entfernungsunterschied gesetzt werden. Der Parameter c ergibt sich aus der halben Entfernung der Brennpunkte zueinander. Da de-

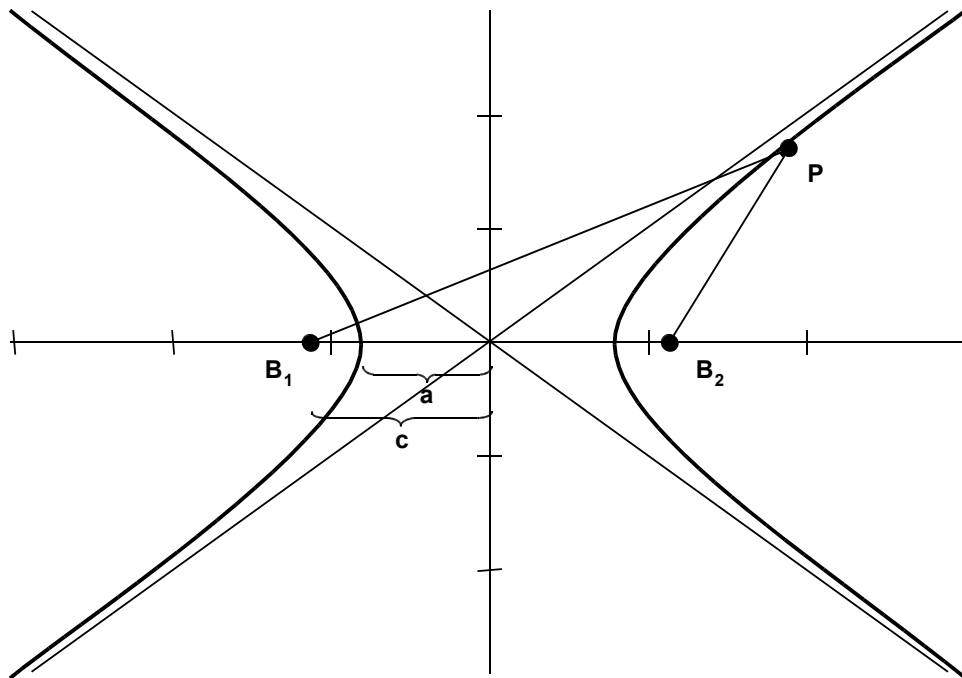


Abbildung 2: Hyperbel

ren Position bekannt ist, kann auch sie berechnet werden. Nach einer geeigneten Koordinatentransformation lässt sich also zu einer Messung der Laufzeitunterschiede eines Senderpaares eine passende Hyperbelgleichung aufstellen, die die Unbekannten x und y enthält. Zu weiteren Senderpaaren müssen ähnliche Gleichungen aufgestellt werden, wobei dann die Koordinatensysteme angepasst werden müssen, da Hyperbeln zu anderen Senderpaaren rotiert auf der Ebene liegen können.

3.2.2 Pseudoentfernungen

Zur Berechnung von Pseudoentfernungen wird angenommen, dass die Uhr des mobilen Systems einem Zeitunterschied Δt zu der Systemuhr der Sender aufweist. Die Pseudoentfernung ist die Entfernung, die mit der falsch laufenden Uhr ermittelt würde. Durch Aufstellung geeigneter Gleichungssysteme lässt sich diese zeitliche Verschiebung jedoch ermitteln und korrigieren. Dies hat den Nebeneffekt, dass die Uhr auf dem Empfänger zur Systemuhr synchronisiert werden kann:

$$r_i: |B_i - P| = p_i - \Delta t \cdot c + v_i$$

Diese Gleichung gilt für den Abstand zwischen Bezugspunkt B_i und der Position des Empfängers P . Die gemessene Pseudodistanz p_i wird um die Zeitabweichung Δt korrigiert, wozu die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Energie c herangezogen wird. Der Zeitfehler ist bei der Vermessung aller Bezugspunkte in einem Schritt identisch, weshalb er durch ein passendes Gleichungssystem (für die Ortung in der Ebene müssen mindestens drei Bezugspunkte vermessen werden) ermittelt werden

kann. Auch hier stellt v_i wieder die Messfehlerkomponente dar, die zu minimieren ist (vgl. [Yao04], S. 753). Näherungsweise lässt sich ein solches Gleichungssystem über das Newtonsche Näherungsverfahren für mehrere Veränderliche (vgl. [Wiki05], [Abel02]). Die Berechnung kann im Vergleich zum Hyperbelverfahren vereinfacht werden, da keine gedreht in der Ebene liegenden Hyperbeln benutzt werden müssen.

Der Nachteil, dass die Empfänger nicht synchronisiert sind und den genauen Sendezeitpunkt nicht kennen, kann auch durch Einsatz von sehr unterschiedlich schnellen Energieformen kompensiert werden (vgl. [Borenstein96], S. 155). So können die Sender gleichzeitig über Funk und Ultraschall einen Impuls aussenden. Die mobilen Systeme benutzen zur Trilateration die Laufzeit des Ultraschalls vom Sender zu ihnen, die sie genau ermitteln können, da der Funkimpuls im Vergleich zum Schall nahezu ohne Verzögerung eintrifft⁹. Eine weitverbreitete praktische Anwendung abseits der Lokalisation ist die Entfernungsbestimmung eines Gewitters, bei der die Zeit zwischen Blitz und Donner gemessen wird. Alle auf synchronisierten Sendern basierenden Positionsbestimmungssysteme skalieren sehr gut, da ein mobiles System lediglich ein passives Element ist und somit kein Rauschen zum Signalmedium hinzufügt.

Bei einer reinen Trilateration werden ausschließlich die Koordinaten des mobilen Systems bestimmt. Die Ausrichtung bleibt üblicherweise ohne Berücksichtigung. Wie bereits angesprochen, kann dies durch zusätzliche Sensoren kompensiert werden. In Kapitel 4.2 wird eine mögliche Alternative für diesen Zweck beschrieben, die für mobile Systeme bestimmter Form umgesetzt werden kann.

3.3 Triangulation

Die zu bestimmende Kenngröße eines Bezugspunktes ist der Winkel zur Längsachse des mobilen Systems¹⁰ (siehe Abbildung 3). Drei dieser Winkel müssen bekannt sein, um daraus eine Position ermitteln zu können, meist inklusive der Ausrichtung.

Die meisten dieser Positionsbestimmungssysteme arbeiten zumindest zu einem Teil auf der optischen Ebene. Wegen der hohen Richtungsstabilität, welche eine wichtige Voraussetzung darstellt, um exakt Winkel bestimmen zu können, wird meist ein rotierender Emitter für Laserlicht auf dem mobilen System installiert. Als Bezugspunkte werden in diesem Fall zum Beispiel Reflektoren eingesetzt, die über einen Strichcode identifiziert werden können (vgl. [Borenstein96], S. 159).

⁹ Elektromagnetische Wellen (Funk) breiten sich etwa eine Million mal schneller aus als Schallwellen.

¹⁰ Für die Berechnung werden Winkel zwischen je zwei Bezugspunkten eingesetzt, die sich jedoch sehr einfach aus den gemessenen Daten errechnen lassen.

Durch den Einsatz von präzisen synchronisierten Motoren mit bekannter Rotationsgeschwindigkeit kann der Winkel zum Bezugspunkt bestimmt werden, sobald das reflektierte Licht den optischen Sensor auf dem mobilen System trifft. Anhand der individuellen Strichcodes können die Bezugspunkte identifiziert werden. Aus den gemessenen Winkeln kann das mobile System die Position berechnen.

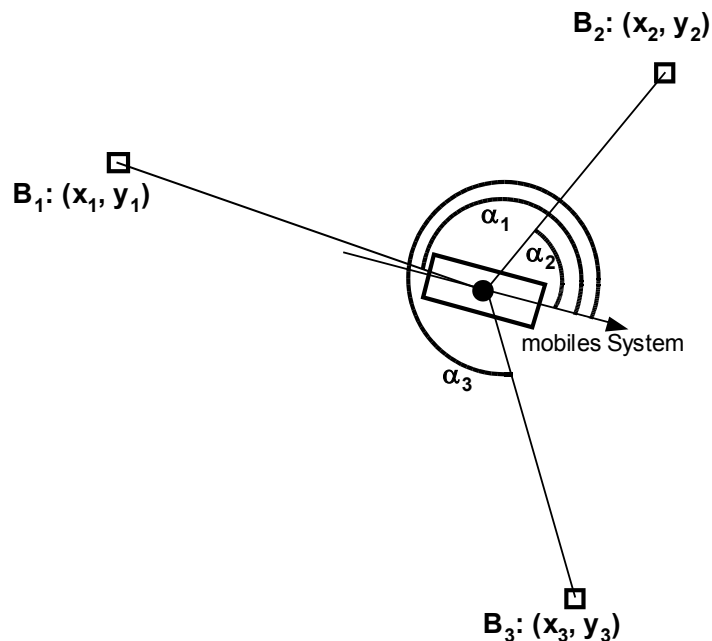


Abbildung 3: Winkelmessung zu drei Bezugspunkten

Eine Alternative zu rotierenden Emittlern-/Empfängereinheiten sind reine rotierende Empfänger. In dieser Konfiguration sind drei oder mehr aktive Bezugspunkte (zum Beispiel Infrarotstrahler) an festen und bekannten Positionen installiert. Ein rotierender Empfänger auf dem mobilen System kann nun die Winkel feststellen, in denen er die Bezugspunkte „sieht“ (vgl. [Borenstein96], S. 152).

Ähnlich wie bei der Trilateration gilt hier, dass die erste Methode schlechter mit mehreren mobilen Systemen zurechtkommt als die zweite. Der Grund ist erneut, dass jeder aktive Emittler auf dem mobilen System das Signal-/Rauschverhältnis verschlechtert und durch Übersprechen und Interferenzen eine genaue Positionsbestimmung unmöglich macht.

4 Kategorisierung

Im folgenden Abschnitt werden drei unterschiedliche bereits in verschiedenen Experimenten eingesetzte Positionsbestimmungssysteme näher betrachtet und kategorisiert. Dabei gibt es mit *CONAC*¹¹ einen Vertreter der Triangulation, während *PRUNS* eine Trilateration basierend auf Pseudoentfernungen einsetzt. Das letzte vorgestellte Verfahren *Beacon Localizer* benutzt keines der beiden etablierten Berechnungsverfahren und spielt deshalb eine besondere Rolle.

4.1 CONAC

Auf dem mobilen System rotiert ein vertikal aufgefächerter Laser¹² mit einer bekannten und konstanten Geschwindigkeit. Im Gegensatz zu anderen laserbasierten Systemen bestehen die Bezugspunkte nicht aus codiertem reflektierendem Material, sondern aus einem Photosensor und einer Signalverarbeitungselektronik. Wird ein Bezugspunkt vom Laser getroffen, sendet er ein Signal entweder drahtgebunden oder über Funk an einen Rechner, welcher die Datenbank der Bezugspunkte enthält. Dieser kann anhand der gemessenen Daten per Triangulation die Position des mobilen Systems ermitteln und über eine Funkstrecke an das System übertragen. Wird kein drahtgebundenes Netzwerk für die Bezugspunkte eingesetzt, kann die Recheneinheit auch auf dem mobilen System platziert werden. Eine Synchronisation zwischen der rotierenden Lasereinheit und dem Rechner ist nicht notwendig, da der erste Treffer eines Bezugspunktes als Referenzimpuls herangezogen wird¹³. Relativ zu dieser gedachten 0°-Linie, die in späteren Umläufen auch an anderer Stelle liegen kann, werden die Winkel zu den restlichen sichtbaren Bezugspunkten bestimmt. Dies ist zur Lokalisierung ausreichend, da Trilaterationsalgorithmen nur Winkel zwischen einzelnen Bezugspunkten benötigen und keine absoluten oder zur Fahrzeuglängsachse relativen Winkel. Jedoch kann auf diese Weise nicht ohne weiteres die Ausrichtung des mobilen Systems berechnet werden, da dazu eine Synchronisation mit der rotierenden Lasereinheit stattfinden müsste, beispielsweise über einen Funkimpuls, der einmal pro Umdrehung gesendet wird. Ist die Recheneinheit auf dem mobilen System platziert, ist eine Synchronisation dagegen problemlos möglich.

Die Lasereinheit kann mit variabler Geschwindigkeit rotieren. In einem Experiment mit einem ferngesteuerten elektrischen Auto wurde eine Frequenz von 50 Umdrehungen pro Sekunde benutzt, um mit einer Aktualisierungsrate von 25 Hz die Position zu bestimmen. Das System erwies sich bei

11 Computerized Opto-electrical Navigation and Control

12 Structured Opto-electrical Acquisition Beacon (STROAB)

13 Die Quellen widersprechen sich in diesem Punkt: Während in [Borenstein96], S. 166 schwammig von einem in die Lasereinheit integrierten Indexsensor gesprochen wird, der einen „*special rotation reference impulse*“ erzeugt, um die Bestimmung der Ausrichtung zu ermöglichen, wird in [MacLoed94], S. 6 das in dieser Arbeit übernommene Verfahren beschrieben, welches die oben dargelegten Konsequenzen impliziert.

diesem Experiment als robust und schnell genug, um auch mit Geschwindigkeiten von rund 22 km/h eine hinreichend genaue Positionsinformation zu liefern (vgl. [Borenstein96], S. 167).

Eine andere experimentelle Anwendung umfasst ein automatisch einem Führungsfahrzeug folgendes Baustellenfahrzeug (vgl. [MacLoed94]). In diesem Fall befindet sich auf dem Führungsfahrzeug die rotierende Lasereinheit, während die aktiven Bezugspunkte und die Elektronik zur Positionsbestimmung auf dem folgenden Fahrzeug angebracht sind. Durch das System ist das Folgefahrzeug in der Lage, in seinem festen Koordinatensystem die Position des Führungsfahrzeugs zu ermitteln. Die Elektronik kann das Folgefahrzeug steuern und so eine bestimmte relative Position zum Führungsfahrzeug einhalten.

Dieses Beispiel zeigt, dass in bestimmten Anwendungskontexten Begriffe wie absolute oder relative Position, mobiles System oder stationäre Komponente aufweichen, da bezogen auf die Umwelt beide Systeme, also Führungs- und Folgefahrzeug, mobil sind. Da die Elektronik nur das hintere Fahrzeug steuern kann, ist im Gegensatz zum ersten Beispiel nicht die Position der Lasereinheit veränderbar, sondern die der Bezugspunkte, was der sehr guten Einsatzmöglichkeit von CONAC aber keinen Abbruch tut. Selbst bei Nebel, Regen und Schnee war ein einwandfreier Betrieb im Experiment möglich (vgl. [MacLoed94], S. 40): CONAC ist also auch für den Außeneinsatz unter erschwerten Bedingungen geeignet. Anzumerken ist natürlich, dass die Sichtbehinderung trotzdem nicht zu stark sein darf und im konkreten Experiment nur relativ geringe Entfernungen zwischen Lasereinheit und Bezugspunkten lagen.

Die Genauigkeit ist sehr hoch: Bis zu wenigen Millimetern beträgt die Auflösung für Indooranwendungen, das Einsatzgebiet kann durch die hohe Empfindlichkeit der Empfänger an den Bezugspunkten ein Gebiet von 33.000 m² (dies entspricht einer quadratischen Fläche mit etwa 181 m Kantenlänge) abdecken, falls freie Sicht auf die drei dazu nötigen Bezugspunkte gewährt ist (vgl. [Borenstein96], S. 166). Die Genauigkeitsangaben werden bei einer höheren Fortbewegungsgeschwindigkeit nicht mehr eingehalten. Wie das zuerst angeführte Experiment jedoch zeigt, war auch in diesen Situationen stets eine hinreichend hohe Auflösung möglich. Größter Schwachpunkt bleibt, dass die Ausrichtung nicht bestimmt werden kann und, was schwerer wiegt, nur ein einzelnes mobiles System lokalisierbar ist. Die Empfänger können nicht zwischen Treffern durch verschiedene mobile Systeme unterscheiden und sie ergo nicht identifizieren. Gerade weil autonomes Fahren einen Großteil des Potentials aber nur im Zusammenwirken mehrerer mobiler Systeme ausspielen kann (vgl. [Nett02]) ist dies bei aller Genauigkeit, trotz der hohen Aktualisierungsrate und

ungeachtet der relativ geringen Kosten (vgl. [Borenstein96], S. 169) ein nicht zu unterschätzender Nachteil.

Die Entwickler haben diesen Schwachpunkt erkannt und ein alternatives System erarbeitet (CONAC Fixed Beacon System), was die Positionsbestimmung mehrerer mobiler Systeme erlaubt. Der aktive Teil des Systems, die rotierende Lasereinheit, wird auf die Bezugspunkte ausgelagert, von denen es in diesem Szenario weniger geben muss als für die meisten anderen Systeme (für einen ordnungsgemäßen Betrieb sind nur deren zwei notwendig), während auf dem mobilen System nur noch eine passive Empfangseinheit installiert wird. Gleichzeitig ist mit etwas verbesserten Lasereinheiten auf den Bezugspunkten sogar eine Ortung im dreidimensionalen Raum möglich. In Experimenten erwies sich die Tauglichkeit mit einer Genauigkeit von 1,3 mm bei einer maximalen Entfernung von 250 m von einem der Bezugspunkte. Diese hohe Genauigkeit wird allerdings nur bei stehendem mobilem System erreicht. Die hohe Aktualisierungsfrequenz von 20 Hz und die Genauigkeit auch bei schnellen Bewegungen erlaubte es jedoch, ein Fahrzeug mit bis zu 108 km/h zu steuern (vgl. [Borenstein96], S. 169). Ob eine Erweiterung mit zusätzlichen Bezugspunkten möglich ist, ist den Beschreibungen nicht zu entnehmen. In vielen Anwendungsgebieten dürfte es jedoch nötig sein, da das System nicht mehr zuverlässig arbeiten kann, wenn auch nur einer der beiden Bezugspunkte verdeckt ist.

4.2 PRUNS

Ein auf Pseudoentfernungsmessung basierendes experimentelles Positionsbestimmungssystem wird in [Yao04] beschrieben. Die prinzipielle Arbeitsweise ist vergleichbar mit der von GPS: Die Bezugspunkte (hier Ultraschallsender anstelle von Satelliten) senden ein synchronisiertes pseudo-zufälliges Signal¹⁴ aus. Zwei Ultraschallempfänger auf dem mobilen System erfassen diese Daten und können aus dem Signal die Pseudoentfernungen berechnen. Durch Trilateration wird anschließend die Position der beiden einzelnen Empfänger berechnet und daraus die Position und Ausrichtung des mobilen Systems abgeleitet. Dazu müssen die Empfänger passend angebracht sein, der Autor sieht beispielsweise die Befestigung an den jeweiligen Enden eines länglichen Fahrzeugs vor.

Jeder Sender erhält einen eindeutigen periodischen pseudo-zufälligen Code. Ein pseudo-zufälliger Code kann hier als eine „Unterschrift“ verstanden werden, die das Signal eines Senders eindeutig macht. Die Unterschrift jedes Senders hat dieselbe Länge und wird auf die abgegebenen Schallwellen im Bereich um 40 KHz aufmoduliert. Da die Sender – wie bereits beschrieben – synchronisiert arbeiten, beginnen sie gleichzeitig mit der Übermittlung der Unterschrift und beenden

¹⁴ Pseudo random code, PRC

sie gleichzeitig. Danach beginnt unmittelbar eine neue Periode, in der ihr pseudo-zufälliger Code erneut gleichzeitig übermittelt wird. Durch unterschiedliche Entfernungen zu den einzelnen Bezugspunkten erreichen die Unterschriften das mobile System, welches jeden vorhandenen pseudo-zufälligen Code kennt, nicht mehr gleichzeitig, sondern zeitlich verschoben (siehe Abbildung 4). Beim so genannten Korrelationsprozess wird auf das empfangene Signal die Unterschrift der einzelnen Sender gelegt und nun zeitlich verschoben, bis der Punkt der höchsten Übereinstimmung ermittelt wurde (vgl. [Yao04], S. 757). Anhand der Verschiebung zum auf dem mobilen System generierten Referenzcode lässt sich die Pseudoentfernung zum jeweiligen Sender ermitteln.

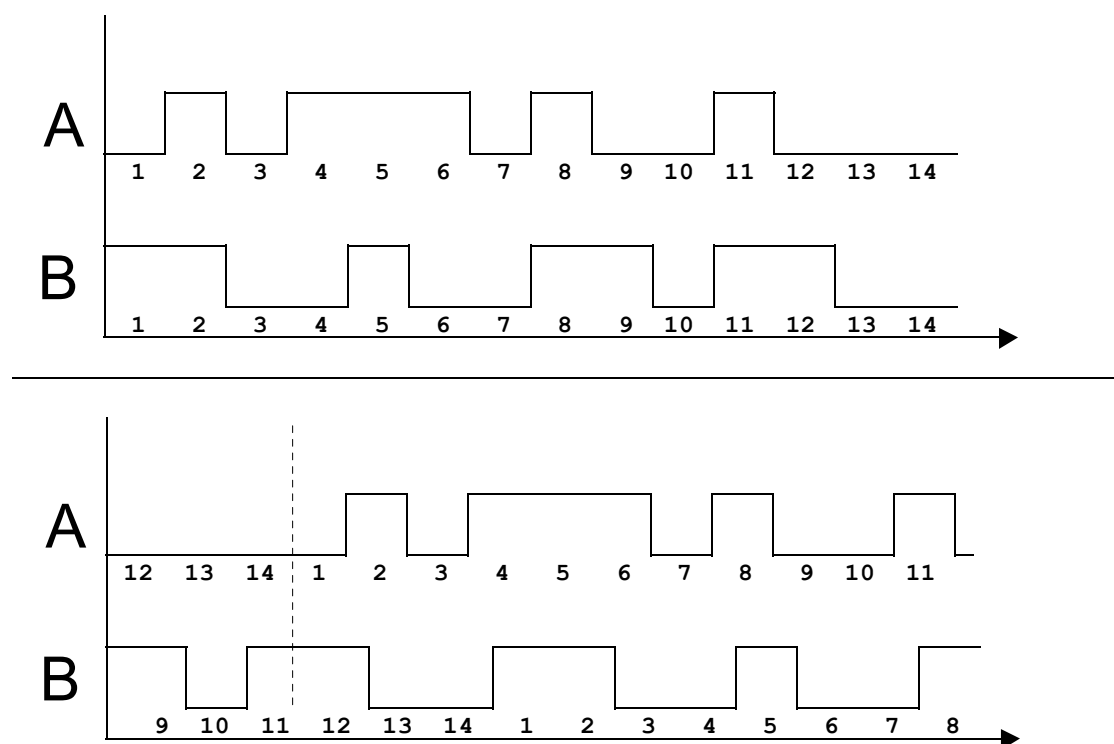


Abbildung 4: Verschiebung der synchronisierten (oben) 14 Bit langen Codes beim Empfänger (unten)

Die meisten auf Ultraschall basierenden Verfahren besitzen nur eine recht geringe Reichweite, leiden verstärkt unter Echos und der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls: Sie hängt maßgeblich von der Temperatur und dem Luftdruck ab. Zudem besteht die Schwierigkeit, dass alle sendenden Bezugspunkte sich abwechseln müssen (vgl. [Yao04], S. 752), weshalb deren Zahl nicht ohne weiteres erhöht werden kann, um die Auflösung bzw. das Einsatzgebiet zu vergrößern.

Einige dieser Probleme konnten gemindert oder sogar beseitigt werden: Die Reichweite der Bezugspunkte konnte in ersten Experimenten auf 30 m vergrößert werden, eine Reichweitenvergröße-

zung auf 50 m ist geplant. Durch den Korrelationsprozess ist es möglich, Echos herauszufiltern (vgl. [Yao04], S. 757). Das Vermischen der Signale mehrerer Sender stellt dank der jeweils eindeutigen Codierung bis zu einer gewissen Grenze kein nennenswertes Problem dar. Selbst aus mehreren überlagerten Signalen ist im Korrelationsprozess die Extraktion der unterschiedlichen Pseudoentfernungen möglich, wenn die pseudo-zufälligen Codes entsprechend günstig gewählt wurden¹⁵. In [Yao04] werden 32 verschiedene pseudo-zufällige Codes eingesetzt, was 32 unterschiedliche Bezugspunkte erlaubt. Dies scheint auf den ersten Blick eine Einschränkung des Einsatzgebiets zu bedeuten, jedoch sieht eine komplexere Systemkonfiguration vor, dass sich mehrere Sender denselben Code teilen, sofern sich ihre Signale nicht überlappen. Da die Reichweite der Sender begrenzt ist, ist eine solche Aufstellung in den meisten Fällen durchführbar. Ein Einsatz ist auch in lauten Umgebungen möglich, da selbst aus einem erhöhten Rauschpegel die Verschiebungen ermittelt werden können.

Wie bei den meisten Systemen, die auf aktiven Bezugspunkten und passiven Empfängern auf den mobilen Systemen arbeiten, skaliert auch das hier angesprochene System sehr gut mit der Anzahl an mobilen Systemen. Erst wenn dauerhaft zu viele Sender verdeckt werden, entstehen Probleme, da davon ausgegangen werden muss, dass der Ultraschall nicht durch die mobilen Systeme dringen kann. Da sich jedoch ein großes Areal abdecken lässt, erlaubt ein solches System dennoch die Positionsbestimmung von sehr vielen mobilen Systemen in großen offenen Operationsgebieten. Vom Autor wurde beispielsweise eine Installation entlang einer mehrspurigen Straße vorgeschlagen. Da – wie bereits angeführt – sich mehrere Sender in genügend großem Abstand einen pseudo-zufälligen Code teilen können, lassen sich so beliebig lange Strecken überbrücken, indem sie in Abschnitte aufgeteilt werden (der Autor spricht von einer Abschnittlänge von 320 m). Den mobilen Systemen muss allerdings auf eine andere Weise bei der initialen Einrichtung mitgeteilt werden, in welchem Abschnitt sie sich befinden. Anschließend können sie die Übergänge in andere Abschnitte eigenständig verfolgen.

Das Projekt befindet sich in einem sehr frühen Stadium, weswegen noch einige Probleme zu lösen sein werden und genaue Daten in Bezug auf Auflösung und mögliches Einsatzgebiet im realen Einsatz nicht vorliegen. In Laborexperimenten jedoch wurde – wie bereits dargelegt – eine Entfernung von 30 m zwischen Sender und Empfänger realisiert. Die Abweichungen bei einem Experiment in kleinerem Raum lag bei etwa 0,72 cm. Anders als bei den meisten bezugspunkt-basierten Systemen wird durch zu viele Bezugspunkte im Empfangsbereich die Positionsbestimmung ungenauer: Je

¹⁵ Eine ungünstige Wahl wäre, wenn sich in der Addition der Ultraschallwellen zwei Codes bereits bei einer geringen Phasenverschiebung gegenseitig auslöschen

mehr Signale sich überlagern, desto schwieriger ist im Korrelationsprozess die korrekte Verschiebung der einzelnen pseudo-zufälligen Codes zu ermitteln. Jeder Sender verschmutzt die Datenlieferung der anderen Sender. Dieser Effekt wird dann deutlich verstärkt, wenn es große Entfernungsdifferenzen zwischen den Sendern gibt ([Yao05]). Weiterhin müssen im mobilen System generell alle 32 pseudo-zufälligen Codes mit dem Signal abgeglichen werden, es sei denn, es wird ein Auswahlmechanismus implementiert, der basierend auf der vorher gemessenen Position nur die pseudo-zufälligen Codes von Sendern bearbeitet, die in einem sinnvollen Bereich liegen. In bisherigen Umsetzungen ist dies auch der Fall. Dort werden nach Ermittlung der Startposition durch ein Auswahlverfahren diejenigen Codes ermittelt, die zu Sendern gehören, die eine gute Positionsbestimmung erlauben.

Das letzte angesprochene Problemfeld ist der Dopplereffekt: Bei einer relativen Bewegung zwischen Sender und Empfänger verschieben sich die Frequenzbereiche der Ultraschallsignale zueinander. Dies muss in der Signalbearbeitung korrigiert werden und hat auch Auswirkungen auf die Empfänger: Arbeiten die dort integrierten Filter zu schmalbandig, werden im ungünstigsten Fall die Signale einiger Sender überhaupt nicht mehr an die Verarbeitungselektronik weitergeleitet und eine starke Verschlechterung der Genauigkeit ist zu vermuten.

4.3 Beacon Localizer

In [Peters00] wird u. a. eine Methode beschrieben, wie autonome Serviceroboter mit flächendeckender Fahrweise in ihrem Operationsgebiet eine genaue Positionsbestimmung vornehmen können, wobei bei der eingesetzten Hardware besonders auf niedrige Kosten geachtet wurde. Die Autoren schlagen einen Einsatz als Bodenreinigungsfahrzeug im Heimbereich vor. Viele derartige Roboter basieren nur auf einer inkrementellen Positionsbestimmung relativ zur vorherigen Position (*Dead Reckoning*, vgl. [Azenha02], S. 10 und [Nebot01]), welche bei zunehmender Einsatzdauer unter steigender Ungenauigkeit leidet, da sich selbst kleine Messfehler mit der Zeit aufsummieren.

Ziel war es demnach, ein kostengünstiges Verfahren zu entwickeln, welches dazu geeignet ist, innerhalb eines klar abgegrenzten Einsatzgebietes eine Position zu ermitteln, ohne dazu Informationen aus vorherigen Positionsberechnungen zu verwenden, um akkumulierende Fehler zu vermeiden. Die durch das inkrementelle Verfahren gewonnenen Daten können dann korrigiert und damit verbessert werden. Dabei sollte kein zusätzlicher Installationsaufwand notwendig sein, um die Installations- und Einsatzkosten gering zu halten, was im Heimbereich eine sehr wichtige Anforderung darstellt. Die Installation zusätzlicher Bezugspunkte, die eine sehr aufwendige Ver-

messung des Einsatzgebiets notwendig gemacht hätte, fällt somit als Möglichkeit aus. Die einzigen Komponenten innerhalb des Systems sind das mobile System und eine mitgelieferte Ladestation¹⁶.

Als verbleibende Lösungen blieben noch *map-matching* (vgl. [Borenstein96], Kapitel 4) und ein auf dem einzigen Bezugspunkt „Ladestation“ basierendes Verfahren. Da der Roboter im Einsatz dynamisch eine variable Umgebungskarte anlegen soll, also keine feste Landkarte besitzt, und der Installationsaufwand niedrig sein soll, was eine genaue Vermessung des Einsatzgebietes verbietet, bleibt nur das zuletzt angedachte Verfahren. Trilateration und Triangulation fallen weiterhin als Berechnungsverfahren heraus, weil beide mehrere Bezugspunkte benötigen. Es muss also abseits der bereits gut erforschten Wege eine geeignete Lösung zur Positionsbestimmung gesucht werden.

Das umgesetzte Verfahren bestimmt Polarkoordinaten, also den Winkel zu einer 0°-Referenzachse und die Entfernung vom Ursprung des Koordinatensystems (siehe Abbildung 5). Zwei auf der Ladestation angebrachte parallele Laser rotieren mit einer bekannten und konstanten Geschwindigkeit. Eine beliebige Ausrichtung der Lasereinheit wird als gedachte 0°-Referenzachse festgelegt. Im mobilen System befindet sich eine mit der Lasereinheit synchronisierte Uhr. Die Synchronität kann entweder über einen Funkimpuls hergestellt werden, der beim Nulldurchgang von der Ladestation abgegeben und vom Roboter empfangen wird oder beim Aufladen der Batterien, wenn direkter Kontakt zwischen der Ladestation und dem Roboter besteht. Werden hinreichend genaue Uhrbausteine benutzt, so ist wegen der beschränkten Einsatzdauer auch dann eine ausreichende Synchronität gegeben. In diesem Fall entsteht nur eine geringe Winkeldrift (vgl. [Peters00], S. 6).

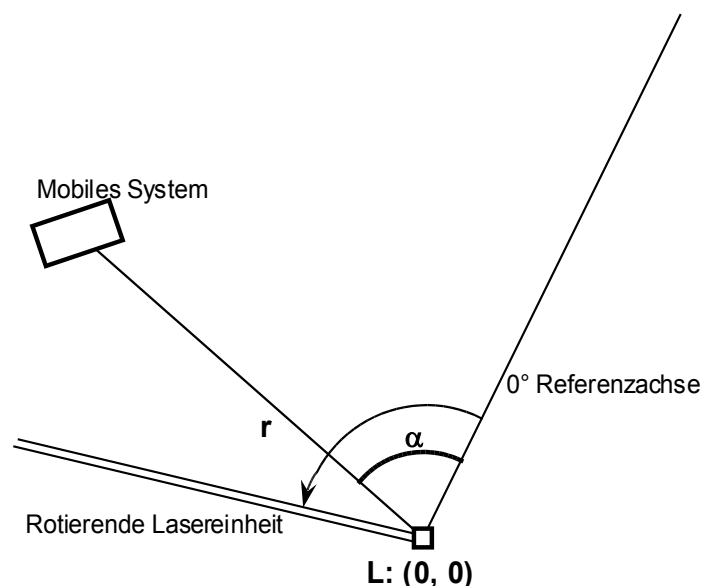


Abbildung 5: Polarkoordinatensystem mit Ladestation L im Ursprung

¹⁶ Ein autonomer Staubsauger benötigt ein ausreichend starkes Aggregat, welches viel Energie verbraucht. Die Einstätze werden also immer durch Ladepausen unterbrochen, vgl. [Peters00], S. 5.

Der Roboter besitzt einen Photodetektor. Von der Signalverarbeitungselektronik kann festgestellt werden, wann die Laserstrahlen diesen Photodetektor treffen. Der Stand der internen Uhr des mobilen Systems entspricht nun genau dem Winkel α im polaren Koordinatensystem: Da die Rotationsgeschwindigkeit bekannt ist, kann aus der verstrichenen Zeit und der Winkelgeschwindigkeit der Lasereinheit dieser Winkel errechnet werden. Die jetzt noch fehlende Koordinate entspricht der Entfernung zwischen Ladestation und Roboter.

Dabei wird ausgenutzt, dass die zwei parallel verlaufenden Laserstrahlen von der Sensorik zu unterschiedlichen Zeiten erkannt werden. Da die Bahngeschwindigkeit mit wachsender Entfernung zunimmt, nimmt die Zeitdifferenz zwischen dem ersten und zweiten Impuls entsprechend ab. Je kürzer die gemessene Differenz ist, desto weiter entfernt von der Basisstation befindet sich der Roboter momentan. Bei der Berechnung wird erneut ausgenutzt, dass die Rotationsgeschwindigkeit bekannt und der Abstand der Laser zueinander unabhängig von der Entfernung konstant ist, da sie parallel verlaufen. Das mobile System muss als weiteren Parameter diesen Abstand kennen.

Aus der Formel für die Bahngeschwindigkeit v bei Radius r und der Winkelgeschwindigkeit ω

$$v = r \omega$$

und der gemessenen Zeitdifferenz Δt zwischen den beiden Impulsen und dem bekannten Abstand der Strahlen d

$$\frac{d}{\Delta t} = v$$

folgt:

$$\frac{d}{\Delta t} = r \omega$$
$$r = \frac{d}{\omega} \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

Beide Polarkoordinaten können also auf diese Weise bestimmt werden. Kritische Bereiche existieren wegen der gewählten Näherung im unmittelbaren Umfeld um die Ladestation und in größerer Entfernung, wenn die zeitliche Auflösung der Messungen zu gering wird.

Im Experiment der Autoren hat sich gezeigt, dass eine Positionsbestimmung innerhalb eines Radius von 10 m mit einer Auflösung von etwa 1 cm möglich ist. Durch Mittelung mehrerer Messungen war eine Vergrößerung des Einsatzgebietes auf 50 m um die Ladestation bei gleichbleibender Ge-

nauigkeit möglich. Die Aktualisierungsrate betrug bei den Experimenten 2 Hz. Die Ausrichtung kann auf diese Weise nicht ermittelt werden, dazu sind weitere Maßnahmen notwendig (vgl. [Peters00], S. 7). In Anbetracht der Tatsache, dass dieses Verfahren relativ einfach aufgebaut ist und arbeitet, sind die Ergebnisse, die die Kopplung von inkrementellem Verfahren mit dem bezugspunktbasierten Verfahren erbracht hat, beachtlich.

Der praktische Nutzen dieser Technik im von den Autoren beschriebenen Anwendungsbereich der Haussäuberung muss allerdings angezweifelt werden. Um die durch das inkrementelle Verfahren bestimmten Koordinaten korrigieren zu können, muss ein direkter Sichtkontakt zwischen der Ladestation und dem mobilen System bestehen. Reflektierende Flächen im Einsatzgebiet würden die Messungen unbrauchbar machen. Der Operationsradius von 10 m bis zu 50 m um die Ladestation klingt anfangs zwar viel versprechend, jedoch wird ein solches Szenario im Heimbereich kaum anzutreffen sein: Wesentlich kleinere Räume, die durch Einrichtungsgegenstände zerklüftet aufgebaut sind, verkleinern den effektiven Sichtbarkeitsbereich der Lasereinheit. Angrenzende Räume profitieren von der erhöhten Genauigkeit ebenfalls nicht. Nur wenn um die Ladestation herum eine relativ große freie Fläche existiert, kann diese Technik ihren vollen Nutzen ausspielen. Autonome Rasenmäher, die mehr chaotisch als systematisch Rasenflächen mähen, existieren bereits (vgl. [Electrolux04]). Wird das Verfahren in diesem Bereich angewendet, so sind meist wiederum gute Voraussetzungen zum Einsatz gegeben. Die Rasenmäher könnten wesentlich effektiver und effizienter arbeiten, da höhere Dienste, wie zum Beispiel das zielgerichtete, geplante und kontrollierte Abfahren einer größeren Fläche, eine genaue Positionsbestimmung als Grundlage benötigen (vgl. [Peters00], S. 1f).

Abseits vom Einsatzgebiet ist ein großer Vorteil, dass mit dieser Technik auch mehrere mobile Systeme problemlos lokalisiert werden können. Solange sich die Roboter nicht dauerhaft gegenseitig verdecken, ist die Positionsbestimmung für jeden Teilnehmer nach wie vor ohne verschlechterte Genauigkeit möglich.

4.4 Fazit

Die Kategorisierung der vorgestellten Positionierungssysteme ergibt untenstehende Tabelle.

	<i>CONAC</i>	<i>PRUNS</i>	<i>Beacon Localizer</i>
Infrastruktur	Bezugspunktbasiert mit durch rotierenden Laser ausgelösten Sendern	Bezugspunktbasiert mit daueraktiven Ultraschallsendern	Bezugspunktbasiert mit einem Bezugspunkt und zwei parallelen rotierenden Lasern
Empfänger	Rotierender Laser	Passiv	Passiv
Berechnungsverfahren	Triangulation	Trilateration mit Pseudoentfernungen	Messung der Zeitunterschiede der Signalpeaks
Maßstab	Lokal	Lokal	Lokal
Einsatzgebiet	3 Bezugspunkte für 33.000 m ² Fläche nötig, Sichtverbindung zu mind. 3 Bezugspunkten notwendig	Sendemast hat 30 m Reichweite, mind. 3 Sendemasten in Reichweite notwendig, max. 32 Sendemasten insgesamt, keine Verdeckung der Sender durch feste Objekte	10 m um Bezugspunkt (Basisstation), Sichtverbindung nötig, bei geringerer Aktualisierungsfrequenz bis zu 50 m
Skalierung des Einsatzgebiets	Kopplung von Bezugspunkten für annähernd unbegrenzte Fläche vorgesehen	Aufteilung in Sektoren vorgesehen	Nicht möglich
Anzahl lokalisierbarer mobiler Systeme	Eins	Unbegrenzt	Unbegrenzt
Auflösung	Genauigkeit besser als 5 mm bei 25 Hz Aktualisierungsrate	Genauigkeit bei kleinerem Arbeitsgebiet etwa 1 cm, 2 Hz Aktualisierungsrate, sonst keine experimentellen Ergebnisse	Genauigkeit etwa 1 cm bei 2 Hz Aktualisierungsrate
Robustheit	Keine Notfalllösung vorgesehen, Einsatz auch bei Regen und Schnee möglich (vgl. [MacLoed94])	Keine Angaben, da noch im Experimentalstadium	Inkrementelles Verfahren (Dead Reckoning) als Unterstützungs- und Notfalllösung vorgesehen

Tabelle 1: Kategorisierung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden zuerst kurz die Bedeutung des autonomen Fahrens und damit zusammenhängend der Positionsbestimmung dargelegt. Anschließend wurde das Gebiet der Positionsbestimmung genauer gegliedert und die verschiedenen Facetten beleuchtet. Auf die am häufigsten eingesetzten Berechnungsverfahren, um eine Position an Hand von Werten, die an besonders ausgezeichneten Punkten in der Umgebung gemessen werden, die Triangulation und Trilateration, wurde eingegangen. Es wurden Vertreter dieser zwei Berechnungsverfahren sowie eine Speziallösung, die auf andere Weise arbeitet, skizziert und bewertet.

Es existieren bereits etablierte und gute bezugspunktorientierte Ansätze für viele verschiedene Einsatzbereiche. Jedoch gibt es keine Universallösung, die in möglichst vielen Anwendungsszenarien Verwendung finden könnte. Dazu sind die Anforderungen zu unterschiedlich: Manche Positionsbestimmungssysteme entfallen, da nur ein mobiles System lokalisiert werden kann, andere scheitern an der Größe des Arbeitsbereichs, wieder andere arbeiten für die angestrebte Fortbewegungsgeschwindigkeit zu langsam oder der Einsatzbereich erlaubt keine direkte Sichtverbindung zu den Bezugspunkten.

Die flüssige und nahtlose Verbindung von globaler und lokaler Positionsbestimmung wird bereits eingesetzt (vgl. [Azenha02], S. 7), das Verschmelzen von verschiedenen Sensordaten bleibt aber ein breites Forschungsgebiet (vgl. [Azenha02], S. 2 und S. 21). Die momentan eingesetzte Sensorik ist jedoch nach wie vor beschränkt, da sie vergleichsweise wenige Umweltinformationen liefert. Dies hat zwar den Vorteil, dass die Signalverarbeitung einfacher und billiger umgesetzt werden kann, jedoch für manche Anwendungsbereiche oder in ungünstigen Situationen zu wenige Daten vorhanden sind. Sichtbasierte Systeme, die mit digitalen Kameras arbeiten, liefern eine sehr große Flut an Daten über die Umwelt. Dadurch ist jedoch der nötige Rechenaufwand, um daraus relevante Informationen zu extrahieren, sehr groß, was die nötige Hardware wesentlich verteuert. Es bleibt allerdings festzuhalten, dass visuelle Sensoren die momentan wohl mächtigste Informationsquelle unter allen Sensortypen darstellen. Deshalb scheinen hochauflösende optische Sensoren besonders vielversprechend für die zukünftige Forschung zu sein (vgl. [Azenha02], S. 9f). Auch Kameras, mit denen direkt 3D-Informationen über die Umwelt gewonnen werden können, haben ein enormes Potential (vgl. [DZP02]).

Verfahren, in denen das mobile System eigenständig Karten seines Einsatzgebietes erstellt (*map-building*) und später Räume durch Vermessung wiedererkennt (*map-matching*), sind eine interessante Alternative zu bezugspunkt-basierten Verfahren (vgl. [Borenstein96], Kapitel 4 und 8). Die

Entwicklung von Verfahren, die verschiedene Arten von Sensoren miteinander verbinden, hat in vielen Forschungsprojekten bereits begonnen. Sie ist ein wichtiger Baustein für robustere, fehlertolerantere und breiter einsetzbare Positionsbestimmungssysteme.

Auch Unternehmen forschen verstärkt im Bereich der Positionsbestimmung. Dies liegt primär daran, dass sie dort einen sehr großen und sich gerade erst entwickelnden Markt erwarten und sich deshalb möglichst früh in einem langfristigen Wachstumsmarkt strategisch günstig positionieren möchten. Die Aufgabe der universitären Forschung ist es, dort mitzuwirken und mit- bzw. weiterzuentwickeln – nicht nur an den eigentlichen Methoden, sondern auch aus der höheren Perspektive der möglichen Anwendungsgebiete und der Vernetzung und Verschmelzung von Technologien aus verschiedenen Bereichen.

Literatur

- [Abel02] Heinrich Abel: „GPS: Global Positioning System – Funktionsweise und mathematische Grundlagen“, Esslingen 2002, <http://www2.fht-esslingen.de/~abel/gps/Abel-GPS.htm>
- [Azenha02] Abilio Azenha: „Autonomous Vehicles Control and Instrumentation“, Porto 2002, <http://www.fe.up.pt/~azenha/FCT/WMR1.pdf>
- [Boebel99] Tobias Boebel: „Flugzeuggestützte Topographie- und Schweremessung: Meßsystem und Anwendung auf die Region Framstraße, Spitzbergen und Nordgrönland“, Dissertation, Universität Bremen 1999
- [Borenstein96] Johann Borenstein (Hrsg.): „Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning“, Michigan 1996, <http://www-personal.umich.edu/~johannb/shared/pos96rep.pdf>
- [DZP02] Rudolf Schwarte et al.: „Kamerapixel mit Tiefgang: Durchbruch zum schnellen 3D-Sehen“, Nominierungen zum Deutschen Zukunftspreis 2002, http://www.deutscher-zukunftspreis.de/archiv/02_no_03.htm
- [Electrolux04] „Electrolux Automower – Leitfaden für Käufer“, 2004, <http://de.automower.com/node16.asp>
- [GrandCh05] Grand Challenge, Department of Defence 2004, <http://www.darpa.mil/grandchallenge/overview.html>
- [Kind03] Andreas Kind: „Positionsbestimmung“, Seminar Mobile Systeme – Automatisierung, Universität Koblenz 2003, http://www.uni-koblenz.de/~agrt/lehre/ss2003/seminar/andreas_kind.pdf
- [MacLoed94] Edward N. MacLoed, Marianne Chierella: „Automated Vehicle for Enhanced Crew Work Safety“, National Research Council, Washington, DC, 1994
- [Nebot01] E. M. Nebot: „Sensors Used for Autonomous Navigation“, University of Sidney, Sidney 2001, http://www.acfr.usyd.edu.au/teaching/3rd-year/mech3700-Mx2/material/sensors/nebot_sensors.pdf
- [Nett02] Edgar Nett: „Rechnergestützte Kooperation von autonomen mobilen Systemen“, Magdeburger Wissenschaftsjournal 1/2002, Magdeburg 2002, <http://www.uni-magdeburg.de/MWJ/MWJ2002/nett.pdf>
- [Peters00] Frank Peters et al.: „Flächendeckendes Explorieren und Navigieren in a priori unbekannter Umgebung mit low-cost Robotern“, Springer-Verlag, Karlsruhe 2000
- [Tomaszek03] Wilm Tomaszek: „GPS“, Seminar Mobile Systeme – Automatisierung, Universität Koblenz-Landau 2003, http://www.uni-koblenz.de/~agrt/lehre/ss2003/seminar/wilm_tomaszek.pdf
- [Weisstein04] Eric W. Weisstein: „Hyperbola.“, MathWorld - A Wolfram Web Resource, 2004, <http://mathworld.wolfram.com/Hyperbola.html>
- [Wiki05] „Newton-Verfahren“, Wikipedia 2005, <http://de.wikipedia.org/wiki/Newton-Verfahren>
- [Yao04] Wan-Li Yao: „A Pseudo Random (PR) Code based Ultrasonic Navigation System (UNS)“, Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapur 2004, Seiten 752-757
- [Yao05] Persönliche Korrespondenz mit Wan-Li Yao, 2005