

LoPS – Lokales Positionssystem

LoPS – Local Positioning System

Alexander Rudolph, Torsten Kleinschmidt, Marcel Blank und Jürgen Adamy

Zur Durchführung von Serviceaufgaben ist die Navigation eine Basiskompetenz eines mobilen Systems. In dieser Arbeit wird ein trilaterationsbasiertes Navigationssystem auf Ultraschallbasis vorgestellt. Das Lokale Positionsbestimmungs-System LoPS ermöglicht die Bestimmung von Objektpositionen in großen Räumen. LoPS zeichnet sich durch einfache Handhabung und flexible Einsatzmöglichkeiten aus. Bei der Entwicklung wurde großer Wert auf preisgünstige, robuste und unkomplizierte Sensorik gelegt. LoPS wurde als Referenzmesssystem für Roboter navigationsverfahren konzipiert, sein Einsatz ist aber in allen, auf die Bestimmung von kartesischen Koordinaten abzielenden Messaufgaben möglich.

Navigation is a prerequisite for the execution of service tasks by mobile robots. For that reason, an ultrasonic based trilateration system for mobile robot navigation is presented in the following. The Local Positioning System LoPS allows the determination of object positions in large areas. During development the main focus of attention has been put to cheap, robust and simple sensors. LoPS has been designed as a reference system for mobile robot localisation approaches, but the system is useful for all measuring applications requiring the determination of Cartesian coordinates.

Schlagwörter: Ultraschall, Laufzeitmessung, Trilateration, Navigation, mobiler Roboter

Keywords: Ultrasonic TOF, trilateration, navigation, mobile robot

1 Einleitung

Für autonome, mobile Landsysteme sind in Zukunft vielfältige kommerzielle Einsatzszenarien wie beispielsweise Transport- oder Überwachungsroutinen [3; 39], die Unterstützung von Fertigungsprozessen, [2; 25], Reinigungsaufgaben an und in Geschäftsgebäuden [13], die Exploration von für den Menschen gefährlichen oder nicht zugänglichen Gebieten [15; 35] sowie Alltagsaufgaben [45] möglich. Kernkompetenz für Service-Aufgaben ist die Navigation, d.h. die Bestimmung der eigenen Position und die Wegplanung. Im einfachsten Fall der Spurführung kann das System eine Arbeitstrajektorie [11] oder ein Navigationsgitter [47] nicht verlassen. Dieser Ansatz ist sensoruell einfach und für viele iterierte Serviceroutinen ausreichend, schränkt jedoch die Systemautonomie ein.

Navigationsverfahren mit einem höheren Autonomiegrad basieren auf komplexeren Sensorinformationen: Die Koppelnavigation [49] beruht auf der Aufsummierung von

sensoruell erfassten Bewegungsincrementen, zu deren Bestimmung zahlreiche Kalibrierverfahren [7] und redundante Sensorik [36; 37] existieren. Prinzipiell unterliegen jedoch alle relativen (inkrementalen) Systeme einem theoretisch unbegrenzten Fehler [23]. Alternativ kann die Position über die sensorielle Erfassung von Umweltcharakteristika mit bekannter Position bestimmt werden. Im Wesentlichen sind folgende Varianten unterscheidbar:

1. Der Einsatz von speziell auf die Erkennung künstlicher Umweltmerkmale [18; 21] abgestimmter Sensorik erleichtert die Erkennungsaufgabe, stellt jedoch einen Eingriff in die Autonomie des Systems dar.
2. Der Beibehalt der vollen Systemautonomie erfordert die Orientierung an natürlichen Umweltmerkmalen, die von Distanzsensoren wie Laserscannern [17] und Sonar-Arrays [27; 34] oder bildgebender Sensorik [48] erfasst werden können.
3. Aktive Systeme beruhen auf dem Austausch von Trägersignalen zwischen positionsfesten Merkmalen und

auf dem Roboter angebrachter Sensorik und anschließender Triangulation oder Trilateration [28] der Roboterposition. Dazu ist ebenfalls ein Eingriff in die Systemautonomie erforderlich.

Die Navigation mit künstlichen und insbesondere mit aktiven Merkmalen kann von der Algorithmenseite her als gelöst betrachtet werden [19] und bietet sich an, falls man zu einer gewissen Einschränkung der Systemautonomie bereit ist. Ein Beispiel für ein aktives System ist Navstar-GPS¹ [22], mit dem die Position eines Objektes über die Triangulation von aus den Signallaufzeiten zwischen geostationären Satelliten und dem zu vermessenden Objekt gewonnener Distanzinformation bestimmt werden kann. GPS ist zum festen Bestandteil kommerziell erhältlicher Navigationssysteme für Luft- und Schifffahrt sowie Kfz-Anwendungen geworden.

Da GPS in geschlossenen Räumen nicht verfügbar ist, bietet sich die Konzeption eines speziell auf die Positionsbestimmung in Gebäuden ausgelegten Systems an. Das in dieser Arbeit beschriebene *Lokale Positionsbestimmungssystem* LoPS stellt eine einfache, preisgünstige Alternative zur aktiven Positionsbestimmung mobiler Roboter dar. LoPS ermittelt über ultraschallbasierte Laufzeitmessung die Entfernung zwischen einem bewegten Sender und mehreren Empfängern und bestimmt die gesuchte Position über Trilateration der gemessenen Entfernungen.

LoPS ist für die Bestimmung der planaren 2D-Position (x, y) im 100 ms-Takt vorgesehen, die in der mobilen Robotik auf mehrere Arten Anwendung finden kann:

1. Zum Test von Navigationssystemen ist eine Positionsreferenz erforderlich, die man sich in Ermangelung von Alternativen durch die manuelle Vermessung der Roboterposition an exemplarischen Stoppstellen [36;37] beschafft. Diese Vorgehensweise ist arbeits- und zeitintensiv und ihrerseits sehr fehleranfällig². Zur Erfassung von Fehlerauslöschungen [23] müssen die Stopps überdies mit Sorgfalt gewählt werden. LoPS liefert zu Referenzzwecken ausreichend genaue Positionen und stellt somit ein ideales Werkzeug zur Genauigkeitsanalyse von Navigationssystemen dar, ist also ein technisches Hilfsmittel für die Roboterforschung.
2. Die onboard-Koppelnavigation des Roboters kann durch LoPS mit Position-Fixes versorgt werden, um den wachsenden Koppelfehler [36] von Zeit zu Zeit zu korrigieren.
3. Sind Abschattungen von Sender und Empfängern vermeidbar, so kann LoPS ähnlich wie GPS als Hauptnavigationssystem zur alleinigen Positionsbestimmung eingesetzt werden. Der Roboter verliert in diesem Fall seine Autonomie.

Das System verfügt in seiner Basisversion über drei Sende-/Empfangsstrecken, eine Erweiterung auf 3D-Probleme ist rein algorithmischer Natur. Großer Wert gelegt

¹Navigation Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System.
²An den Stoppstellen werden Kreidemarkierungen auf dem Boden angebracht, deren Position nach der Fahrt mit Maßbändern vermessen wird.

wurde auf preisgünstige und robuste Sensorik sowie einen großen Einsatzbereich. Ähnliche Systeme sind entweder mit Preisen von ca. \$ 10 000 um ein Vielfaches teurer [6], wesentlich ungenauer [33] als LoPS oder wurden für relativ kleine Einsatzszenarien [9; 10; 30; 40; 41; 51] konzipiert.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 führt in die trilaterationsbasierte Positionsbestimmung auf Ultraschallbasis ein, deren Genauigkeitsanalyse hinsichtlich Empfänger-geometrie und Fehlern in den Entfernungsmessungen in Kapitel 3 folgt. Die einzelnen Komponenten von LoPS und das verwendete Verfahren zur Laufzeitmessung werden in Kapitel 4 vorgestellt. Überdies wird auf die Positionüberwachung mittels der Messhistorie und auf die Temperaturkompensation eingegangen. Aufbauend auf den Überlegungen aus Kapitel 3 wird in Kapitel 5 die verwendete Messgeometrie hergeleitet, auf deren Basis experimentelle Ergebnisse anhand einer Beispieltrajektorie und Wiederholgenauigkeitstests demonstriert werden. Kapitel 6 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten und mögliche Erweiterungen.

2 Positionsbestimmung

2.1 Trilateration

LoPS verwendet zur Positionsbestimmung das, vermutlich bereits phönizischen Seefahrern bekannte, von Snellius [38] im 17. Jh. in die Geodäsie eingeführte Trilaterationsprinzip [6; 28], das die gemessenen Entfernungen zu prinzipiell mehreren, mindestens jedoch zwei Landmarken mit bekannter Position zur Bestimmung der eigenen kartesischen Position (x, y) verwendet. Im Gegensatz zu Triangulationsverfahren [42] ist die Orientierung ψ nicht direkt bestimmbar. Triangulationsverfahren erfordern komplizierte, rotierende Sensoranordnungen [4].

Im Folgenden wird die von LoPS genutzte Trilateration kurz skizziert; eine grundlegendere Betrachtung der

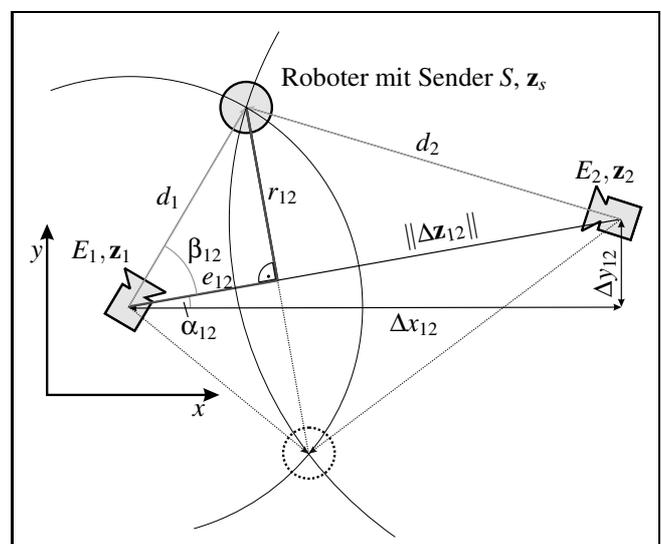


Bild 1: Positionsrechnung über Trilateration.

entfernungs- und winkelbasierten Positionsbestimmung geben z. B. [5; 19]. Bild 1 zeigt die prinzipielle Geometrie der Arbeitsumgebung des Roboters, auf dem der Sender S angebracht ist. Zu bestimmen ist die Position des Navigationspunkts $\mathbf{z}_s = (x_s, y_s)$, wohingegen die Positionen $\mathbf{z}_i = (x_i, y_i)$ der i Empfänger E_i bekannt sind. Mit zwei Sende-/Empfangstrecken $\overline{E_{i_1}S}$ und $\overline{E_{i_2}S}$ kann der Satz des Pythagoras zweimal auf das, in Bild 1 exemplarisch für E_1 und E_2 gezeigte, Dreieck $\triangle E_{i_1}SE_{i_2}$ angewendet werden:

$$d_1^2 = e_{12}^2 + r_{12}^2, \quad (1)$$

$$d_2^2 = (\|\Delta\mathbf{z}_{12}\| - e_{12})^2 + r_{12}^2. \quad (2)$$

d_1 und d_2 sind die gemessenen Entfernungen zwischen Sender und den beiden Empfängern. r_{12} ist die Länge des Lots von \mathbf{z}_s auf die Strecke $\overline{E_1E_2}$ und e_{12} die Länge der Strecke zwischen \mathbf{z}_1 und dem Lotfußpunkt. Zusammenfassung von Gl. (1) und Gl. (2) ergibt die Größen

$$e_{12} = \frac{\|\Delta\mathbf{z}_{12}\|}{2} + \frac{d_1^2 - d_2^2}{2\|\Delta\mathbf{z}_{12}\|}, \quad (3)$$

$$r_{12} = \pm\sqrt{d_1^2 - e_{12}^2}, \quad (4)$$

und somit die Winkel

$$\begin{aligned} \alpha_{12} &= \angle\Delta\mathbf{z}_{12} \\ &= \arctan \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\beta_{12} = \pm \arctan \frac{r_{12}}{e_{12}}, \quad (6)$$

mit denen sich schließlich die gesuchte Position

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{12} &= \mathbf{f}_{12}(d_1, d_2, \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2) \\ &= \begin{pmatrix} x_1 + d_1 \cdot \cos(\alpha_{12} \pm \beta_{12}) \\ y_1 + d_1 \cdot \sin(\alpha_{12} \pm \beta_{12}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

des Senders S bestimmen lässt. Diese unterliegt einer prinzipiellen, in Bild 1 strichliert angedeuteten Doppeldeutigkeit – für den an der Strecke $\overline{E_1E_2}$ gespiegelten Punkt $\tilde{\mathbf{z}}_{12}$ sind die geometrischen Verhältnisse dieselben, da zwei Kreise sich in zwei Punkten schneiden. Für $i=2$ ist die tatsächliche Position \mathbf{z}_s eindeutig, wenn der Arbeitsbereich entsprechend eingeschränkt wird³. Dies ist für $i > 2$ nicht nötig, da die dann vorhandene Redundanz die Eindeutigkeit der Position garantiert.

Die i Empfänger können zu $k = \binom{i}{2}$ Trilaterationsdreiecken $\triangle E_{i_1}SE_{i_2}$ kombiniert werden, die jeweils eine richtige Lösung $\mathbf{z}_{s_{i_1i_2}}$ und eine falsche Lösung $\tilde{\mathbf{z}}_{s_{i_1i_2}}$ liefern, sodass nicht klar ist, welche der gefundenen $2k$ Punkte die richtigen, gesuchten Lösungen sind. k von ihnen sind im Idealfall identisch, in der Praxis liegen sie aufgrund von Messungenauigkeiten zumindest nahe beieinander, wodurch, wie in Bild 2 gezeigt, ihre Identifikation möglich ist: Die k Punkte mit dem untereinander kleinsten euklidischen Abstand werden aus den $2k$ Möglichkeiten ausgewählt. Sie

³ In Bild 1 kann die zweite, strichlierte Lösung z. B. durch Beschränkung des Arbeitsbereichs auf die durch die Strecke $\overline{E_1E_2}$ abgegrenzte Halbebene ausgeschlossen werden. Es ist dann $\mathbf{z}_s = \mathbf{z}_{12}$.

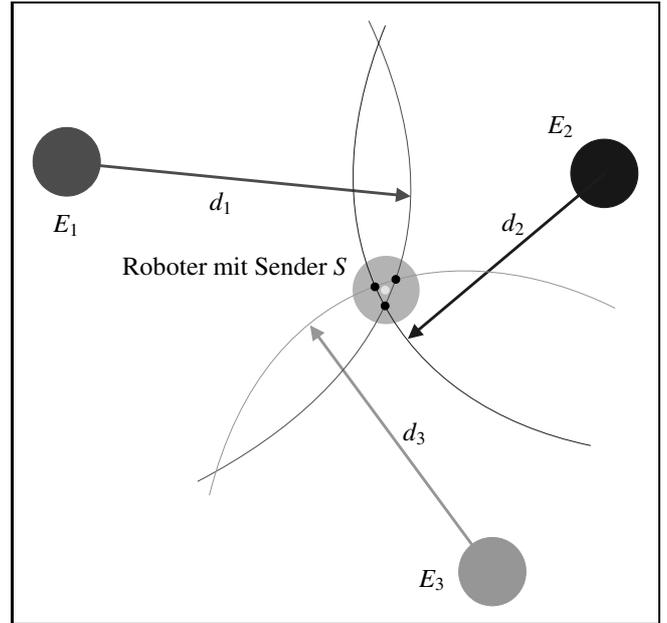


Bild 2: Auswahl der richtigen Schnittpunkte $\mathbf{z}_{i_1i_2}$. Die übrigen $\tilde{\mathbf{z}}_{i_1i_2}$ werden verworfen, da sich in ihnen nicht alle i Kreise (hier ist $i=3$) schneiden.

sind die Lösungen $\mathbf{z}_{i_1i_2}$. Die k übrig gebliebenen Werte sind die $\tilde{\mathbf{z}}_{i_1i_2}$ und werden verworfen. Die gesuchte Senderposition wird als der Mittelwert

$$\mathbf{z}_s = \frac{1}{k} \sum_{\substack{i_1=1\dots k \\ i_2=1\dots k, i_2 > i_1}} \mathbf{z}_{i_1i_2} \quad (8)$$

angenommen.

2.2 Ultraschallbasierte Distanzmessung

Die i Entfernungen

$$d_i = c_{us} \cdot t_i \quad (9)$$

ergeben sich durch die Messung der Laufzeit t_i eines Ultraschallsignals mit Ausbreitungsgeschwindigkeit c_{us} . Bei zu bestimmenden Distanzen von bis zu 15 m liegen die Ultraschalllaufzeiten bei ca. 45 ms (gegenüber ca. 50 ns im Falle elektromagnetischer Trägersignale) und sind durch relativ einfache Messvorrichtungen detektierbar, was Ultraschall trotz der in Abschnitt 4.3 diskutierten Nachteile zu einem häufig verwendeten Trägersignal macht. Diverse Systeme für zum Teil unterschiedliche Anwendungen sind aus der Literatur bekannt.

Kleeman [24] schlägt ein auf der Messung von Entfernungen zu bekannten Landmarken beruhendes System zur Schätzung des Koppelfehlers eines mobilen Roboters vor. Den entgegengesetzten Weg geht Tsai [44]: Mehrere an bekannten Positionen auf dem Roboter angebrachte Sender strahlen Signale aus, die von Wänden reflektiert werden. Über die Laufzeitunterschiede und geometrische Beziehungen zwischen den Sendern können Korrekturterme für den Koppelfehler berechnet werden. Sowohl bei Kleeman als auch bei Tsai dient ein Kalmanfilter [16] zur Positionsbestimmung.

Zur Positionsüberwachung von aus Millibot-Kleinrobotern [31] bestehenden Roboterschwärmen setzen Navarro-Serment et al. [30] Empfangsstationen ein, die mit mehreren Sendeeinrichtungen kommunizieren. [14; 50] beschreiben 3D-Systeme zur Lokalisierung von 6-DOF Roboter manipulatoren. Im Wesentlichen sind alle vorgestellten Systeme entweder teuer oder hinsichtlich ihres Arbeitsraums unzureichend für die mobile Servicerobotik. Das auf dem Gebiet ubiquitärer Systeme von Randell und Muller [33] vorgestellte ca. \$ 150 teure 3D-Experimentalsystem kommt prinzipiell in Frage, seine Genauigkeit von ca. 100–250 mm im Bereich 10 m × 10 m ist aber eher gering.

LoPS ist für den Einsatz in größeren Innenräumen mit Grundflächen von ca. 15 m × 10 m vorgesehen. Der Anschaffungspreis liegt inklusive PC bei weniger als € 500. Da die Empfängerpositionen \mathbf{z}_i variabel sind, ist das System transportabel und über eine interaktive Benutzerschnittstelle leicht einzurichten.

3 Genauigkeit

Die in Gl. (8) ermittelte Position

$$\mathbf{z}_s = \mathbf{h}(\mathbf{z}_i, d_i) \quad (10)$$

ist der Mittelwert der k zur Verfügung stehenden Einzelpositionen $z_{i_1 i_2}$. Die Genauigkeit von \mathbf{z}_s ist stark abhängig von der verwendeten Messgeometrie: Generell ist davon auszugehen, dass die d_i nicht kalibrierbaren Messfehlern unterliegen und die \mathbf{z}_i lediglich mit einer Restunsicherheit vorliegen. Diese stochastischen Fehlereinflüsse werden durch die Kovarianzmatrizen

$$\Sigma_{d_i} = \begin{pmatrix} \sigma_{d_i}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{d_i}^2 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\Sigma_{\mathbf{z}_i} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_1}^2 \end{pmatrix} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \begin{pmatrix} \sigma_{x_i}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_i}^2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (12)$$

modelliert. Die in der Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{\mathbf{z}_s} = \begin{pmatrix} \sigma_{x_s}^2 & \sigma_{x_s y_s} \\ \sigma_{x_s y_s} & \sigma_{y_s}^2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

zusammengefasst, zu erwartenden Fehler $\sigma_{x_s}^2$, $\sigma_{y_s}^2$ und $\sigma_{x_s y_s}$ der ermittelten kartesischen Koordinaten x_s und y_s lassen sich aus den Fehlereinflüssen aus Gl. (11) und Gl. (12) ableiten. Dies geschieht im Weiteren.

In allgemeiner Form ergibt sich die über ein Dreieck $\triangle E_1 S E_{i_1}$ bestimmte Position aus Gl. (7) zu

$$\mathbf{z}_{i_1 i_2} = \mathbf{f}_{i_1 i_2}(d_{i_1}, d_{i_2}, \mathbf{z}_{i_1}, \mathbf{z}_{i_2}) = \begin{pmatrix} x_{i_1} + d_{i_1} \cdot \cos\left(\alpha_{i_1 i_2} \pm \arctan \frac{r_{i_1 i_2}}{e_{i_1 i_2}}\right) \\ y_{i_1} + d_{i_1} \cdot \sin\left(\alpha_{i_1 i_2} \pm \arctan \frac{r_{i_1 i_2}}{e_{i_1 i_2}}\right) \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Mit

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial d_i} = \frac{1}{k} \sum_{\substack{i_2=1 \dots k \\ i_2 \neq i}} \frac{\partial \mathbf{f}_{i_1 i_2}}{\partial d_i}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{z}_i} = \frac{1}{k} \sum_{\substack{i_2=1 \dots k \\ i_2 \neq i}} \frac{\partial \mathbf{f}_{i_1 i_2}}{\partial \mathbf{z}_i} \quad (16)$$

kann die Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{\mathbf{z}_s} \approx \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial d_i}^T \Sigma_{d_i} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial d_i} + \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{z}_i}^T \Sigma_{\mathbf{z}_i} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{z}_i} \quad (17)$$

als erstes Glied einer Taylorreihe abgeschätzt werden. Aus dem Argument

$$\begin{aligned} k_{i_1 i_2}(d_{i_1}, d_{i_2}) &= \frac{r_{i_1 i_2}}{e_{i_1 i_2}} \\ &= \sqrt{\left(\frac{d_{i_1}}{e_{i_1 i_2}}\right)^2 - 1} \\ &= \sqrt{\left(\frac{2d_{i_1} \|\Delta \mathbf{z}_{i_1 i_2}\|}{\|\Delta \mathbf{z}_{i_1 i_2}\|^2 + d_{i_1}^2 - d_{i_2}^2}\right)^2 - 1} \end{aligned} \quad (18)$$

in Gl. (14), dessen Gradienten

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial k_{i_1 i_2}}{\partial d_{i_1}} \\ \frac{\partial k_{i_1 i_2}}{\partial d_{i_2}} \end{pmatrix} = \frac{\left(\|\Delta \mathbf{z}_{i_1 i_2}\|^2 + d_{i_1}^2 - d_{i_2}^2\right)^{-3} \|\Delta \mathbf{z}_{i_1 i_2}\|^2}{\sqrt{\left(\frac{2d_{i_1} \|\Delta \mathbf{z}_{i_1 i_2}\|}{\|\Delta \mathbf{z}_{i_1 i_2}\|^2 + d_{i_1}^2 - d_{i_2}^2}\right)^2 - 1}} \cdot \begin{pmatrix} \|\Delta \mathbf{z}_{i_1 i_2}\|^2 - d_{i_1}^2 - d_{i_2}^2 \\ 2d_{i_1} d_{i_2} \end{pmatrix} \cdot 4d_{i_1} \quad (19)$$

und dem Hilfstern

$$\varrho_{i_1 i_2} = \alpha_{i_1 i_2} \pm \arctan k_{i_1 i_2} \quad (20)$$

errechnen sich

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{i_1 i_2}}{\partial d_{i_1}} = \begin{pmatrix} \cos \varrho_{i_1 i_2} \\ \sin \varrho_{i_1 i_2} \end{pmatrix} + d_{i_1} \cdot \begin{pmatrix} \mp \frac{\sin \varrho_{i_1 i_2}}{1 + k_{i_1 i_2}^2} \\ \pm \frac{\cos \varrho_{i_1 i_2}}{1 + k_{i_1 i_2}^2} \end{pmatrix} \frac{\partial k_{i_1 i_2}}{\partial d_{i_1}} \quad (21)$$

und

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{i_1 i_2}}{\partial d_{i_2}} = d_{i_1} \cdot \begin{pmatrix} \mp \frac{\sin \varrho_{i_1 i_2}}{1 + k_{i_1 i_2}^2} \\ \pm \frac{\cos \varrho_{i_1 i_2}}{1 + k_{i_1 i_2}^2} \end{pmatrix} \frac{\partial k_{i_1 i_2}}{\partial d_{i_2}}. \quad (22)$$

Die Vorzeichen in Gl. (20)–(22) sind abhängig davon, welcher der beiden möglichen Punkte von dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Selektionsverfahren gewählt wird.

Bei genau bekannten Empfängerpositionen \mathbf{z}_i , d. h. $\Sigma_{\mathbf{z}_i} = \mathbf{0}$, sowie einem aufgrund der Omnidirektionalität der Messstrecken in allen d_i gleichen Fehler $\Sigma_{d_i} = \sigma_d^2 \cdot I$ kann $\Sigma_{\mathbf{z}_s}$ damit anhand von Gl. (15)–(17) bestimmt werden.

Die $i = 3$ derzeit von LoPS verwendeten Empfänger ermöglichen die Kombinationen $i_1 i_2 \in \{12, 13, 23\}$ entsprechend den $k = 3$ über die Dreiecke $\triangle E_1 S E_2$, $\triangle E_1 S E_3$ und

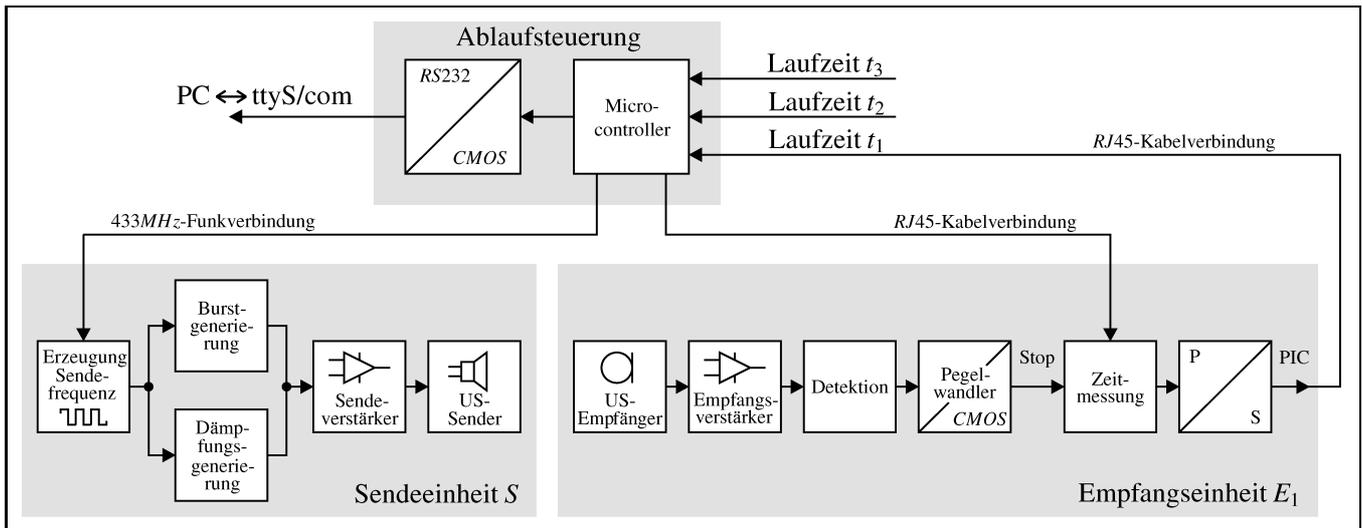


Bild 3: Ablauf der Messung.

ΔE_2SE_3 trilaterierten Positionen \mathbf{z}_{12} , \mathbf{z}_{13} und \mathbf{z}_{23} . Konkret folgt damit

$$\Sigma_{\mathbf{z}_s} \approx \frac{\sigma_d^2}{9} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}_{12}}{\partial d_1} + \frac{\partial \mathbf{f}_{13}}{\partial d_1} \\ \frac{\partial \mathbf{f}_{12}}{\partial d_2} + \frac{\partial \mathbf{f}_{23}}{\partial d_2} \\ \frac{\partial \mathbf{f}_{13}}{\partial d_3} + \frac{\partial \mathbf{f}_{23}}{\partial d_3} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}_{12}}{\partial d_1} + \frac{\partial \mathbf{f}_{13}}{\partial d_1} \\ \frac{\partial \mathbf{f}_{12}}{\partial d_2} + \frac{\partial \mathbf{f}_{23}}{\partial d_2} \\ \frac{\partial \mathbf{f}_{13}}{\partial d_3} + \frac{\partial \mathbf{f}_{23}}{\partial d_3} \end{pmatrix} \quad (23)$$

als Kovarianzmatrix der von LoPS ermittelten Position \mathbf{z}_s .

4 Implementierung

LoPS führt pro Sekunde 10 Distanzmessungen mit dem in Bild 3 gezeigten Messablauf durch. Der Microcontroller synchronisiert die Messungen der Laufzeiten t_i , die seriell zum PC übertragen werden. Dort werden sie mit der temperaturkompensierten Schallgeschwindigkeit in die Entfernungen d_i umgerechnet, aus denen sich \mathbf{z}_s ergibt.

4.1 Laufzeitmessung

Verwendet werden Ultraschallwandler *MA20-R/MA40-S* der Firma Murata [29]. Außer ihrem moderaten Stückpreis von ca. € 5 erfüllen sie zwei wesentliche Voraussetzungen: Ihre Sendefrequenz von 40 KHz schließt eine gegenseitige Beeinflussung von LoPS und den robotereigenen Polaroid-Sonarsensoren [32] weitestgehend aus und ihre Sendereichweite ist mit ca. 15 m ausreichend groß.

Oberhalb der Wandler ist aufgrund ihrer ausgeprägter Richtcharakteristik der in Bild 4 gezeigte Reflexionskegel angebracht, der die Schallwellen richtungsunabhängig immer dem Wandler zuführt und so die Omnidirektionalität des Messaufbaus gewährleistet. Die Sendeeinheit erzeugt ein für die Detektion durch die Empfänger geeignetes

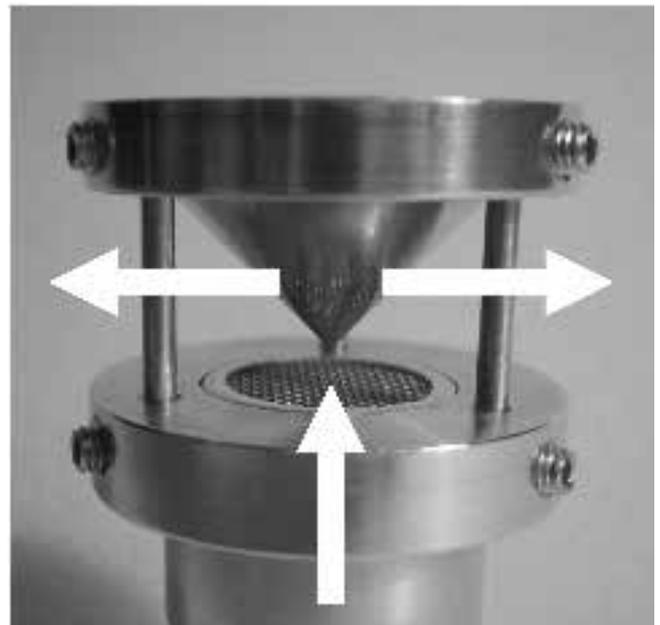


Bild 4: Umlenkkegel zum omnidirektionalen Messen. Der Durchmesser des Kegelstumpfs beträgt 22 mm.

Signal. Aufgrund der starken Verzögerung der Wandler⁴ scheidet eine Stoßanregung aus. Verwendet wird dahingegen ein über mehrere Schwingungen mit der Resonanzfrequenz angeregter Sendeburst, der durch eine abschließende aktive Bedämpfung zeitlich begrenzt wird. Die Ablaufsteuerung initiiert das Aussenden des Bursts über eine 433 MHz-Funkstrecke. Der vom Sender omnidirektional ausgestrahlte Burst wird von den Empfängern detektiert.

Die Art der Detektion spielt eine große Rolle für die Genauigkeit der Laufzeitmessung [50]. Als besonders geeignet hat sich die abfallende Signalfanke herausgestellt.

⁴ Die Wandler schwingen erst nach einer gewissen Zeit mit voller Amplitude und geben die erforderliche, maximale Lautstärke ab. Ebenso schwingen sie nach Anregungsabschaltung nach.

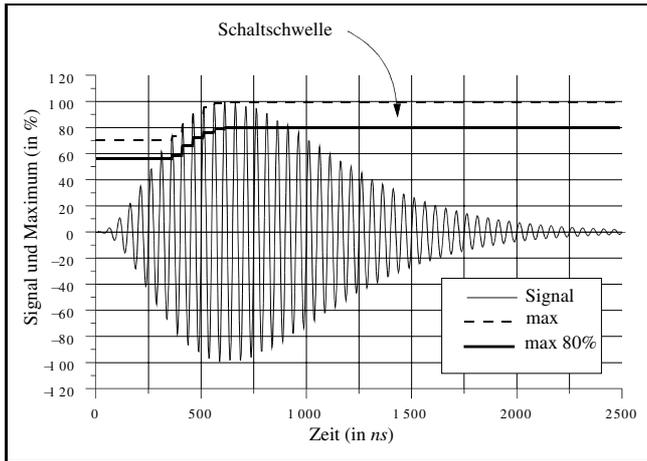


Bild 5: Adaptive Detektionsschwelle: Stopp der Zeitmessung bei Abfallen der Signalamplitude unter einen einstellbaren (hier 80%) Anteil des laufzeitabhängigen Maximalwerts.

Der laufzeitabhängige Maximalwert wird gespeichert und die Zeitmessung wird, wie in Bild 5 gezeigt, bei Abfallen der Amplitude unter einen einstellbaren Wert gestoppt. Eine laufzeitabhängige Verstärkung sorgt für eine Kompensation der exponentiell mit der Entfernung abnehmenden Signalstärke, wodurch die Genauigkeit der Messungen erheblich erhöht wird. Die Kommunikation der Sendeterminale mit der Ablaufsteuerung erfolgt über RJ45-Kabelverbindungen. Die Ablaufsteuerung koordiniert den Messablauf und die Datenübertragung zum PC sowie die Stromversorgung und Steuerung der Empfänger und des Senders.

Der Microcontroller initiiert alle 100 ms einen Messzyklus. 50 ms nach Messbeginn ist das Signal bei allen Empfängern sicher angelangt und die Laufzeiten liegen in den Zählern der Empfänger vor und werden ausgelesen. 25 ms später beginnt die Übertragung der Daten an den PC. Jedes Datenpaket enthält einen Messzähler zur zeitlichen Identifikation der Daten sowie neben den Rahmenbytes die drei Zählerstände als 16 Bit-Werte.

4.2 Kalibrierung und Temperaturkompensation

Gl. (9) ist in der Praxis nicht exakt erfüllt. Zum einen ist $c_{US} = \sqrt{\kappa \cdot p / \rho}$ nicht konstant. ρ , p und $\kappa = c_p / c_v \approx 1,4$ sind Dichte, Druck und Adiabatenexponent der umgebenden Luft. Zum anderen entspricht d_i nicht der zu messenden Entfernung, da z. B. die Umlenkkegel die vom Schallsignal zurückzulegende Entfernung geringfügig erhöhen. Aus diesem Grund wird der Zusammenhang

$$d_i = c_i \cdot t_i + o_i \quad (24)$$

zwischen t_i und d_i angenommen. Die Parameter c_{ikal} und o_{ikal} werden für jedes i mit zwei Kalibrierstrecken bestimmt und mit der zur Kalibrierzeit gemessenen Temperatur T_{kal} gespeichert.

Unter annähernd isochoren Raumbedingungen besteht zum Zeitpunkt k nach dem Gesetz von Gay-Lussac [20] der

Zusammenhang $c_{ik}/c_{ikal} = \sqrt{T_k/T_{kal}}$. Mit der gemessenen Temperatur T_k können die kompensierten⁵ Entfernungen

$$d_i = c_{ikal} \cdot \sqrt{\frac{T_k}{T_{kal}}} \cdot t_i + o_{ikal} \quad (25)$$

zur Positionsberechnung verwendet werden.

4.3 Positionsüberwachung

Die von LoPS zum Zeitpunkt i gelieferte Senderposition \mathbf{z}_{s_i} kann softwareseitig mit einer geeigneten Historienbetrachtung auf Plausibilität überprüft werden [12]. Dies kann notwendig sein, um in realen Arbeitsumgebungen kaum vermeidbare Störeinflüsse [33; 46] wie Signalabschattungen, Anfälligkeit für umweltgegebene Interferenzquellen, Mehrwegeausbreitungen, Signalverlust bei blockierter Sende-/Empfangsstrecke etc. zu unterdrücken, deren Auswirkungen mit steigender Anzahl von verfügbaren Distanzmessungen geringer werden. Für experimentelle Zwecke unter Laborbedingungen sind die drei LoPS-Strecken zusammen mit einem einfachen Historienfilter jedoch vollkommen ausreichend. Dazu werden die beiden Mittelwerte

$$\bar{\mathbf{z}}_i^\uparrow = \frac{2}{N} \sum_{j=i}^{i-\frac{N}{2}} \mathbf{z}_{s_j} \quad (26)$$

$$\bar{\mathbf{z}}_i^\downarrow = \frac{2}{N} \sum_{j=i-\frac{N}{2}+1}^{i-N} \mathbf{z}_{s_j} \quad (27)$$

aus den letzten N Positionen $\{\mathbf{z}_{s_i}, \mathbf{z}_{s_{i-1}}, \dots, \mathbf{z}_{s_{i-N}}\}$ gebildet. Aus ihnen gehen das mittlere Translationsinkrement

$$\bar{\mathbf{t}}_{s_i} \approx \|\bar{\mathbf{z}}_i^\uparrow - \bar{\mathbf{z}}_i^\downarrow\| = \sqrt{(\bar{x}_i^\uparrow - \bar{x}_i^\downarrow)^2 + (\bar{y}_i^\uparrow - \bar{y}_i^\downarrow)^2} \quad (28)$$

und die mittlere Orientierung

$$\bar{\psi}_{s_i} \approx \angle \{\bar{\mathbf{z}}_i^\uparrow - \bar{\mathbf{z}}_i^\downarrow\} = \arctan \frac{\bar{y}_i^\uparrow - \bar{y}_i^\downarrow}{\bar{x}_i^\uparrow - \bar{x}_i^\downarrow} \quad (29)$$

des Senders hervor, mit denen die zu erwartende Position

$$\mathbf{z}_{s_{i+1}}^- \approx \mathbf{z}_{s_i} + \bar{\mathbf{t}}_{s_i} \cdot \begin{pmatrix} \cos \bar{\psi}_{s_i} \\ \sin \bar{\psi}_{s_i} \end{pmatrix} \quad (30)$$

im nächsten Zeitschritt $i+1$ extrapoliert werden kann [36]. $\bar{\psi}_{s_i}$ und $\bar{\mathbf{t}}_{s_i}$ legen Richtung und Betrag der prognostizierten Positionsänderung fest. Mit wachsendem N werden sie ruhiger, aber auch träger und repräsentieren für ein allgemeines N adhoc-Approximationen der tatsächlichen kinematischen Größen⁶. Mit dem Messresiduum

$$\mathbf{e}_{s_{i+1}} = \mathbf{z}_{s_{i+1}} - \mathbf{z}_{s_{i+1}}^- \quad (31)$$

kann entschieden werden, ob die berechnete Position $\mathbf{z}_{s_{i+1}}$ sich im Rahmen der Vorhersage bewegt: Ist die geeignet gewählte Bedingung

$$\|\mathbf{e}_{s_i}\| < d_{max} \quad (32)$$

⁵ Bei Temperaturänderungen von 10 K und einer Messstrecke von 10 m beträgt der temperaturabhängige Fehler bereits ca. 8 cm.

⁶ Im Fall $N=2$ repräsentieren $\bar{\mathbf{t}}_{s_i}$ und $\bar{\psi}_{s_i}$ die kinematischen Verhältnisse.

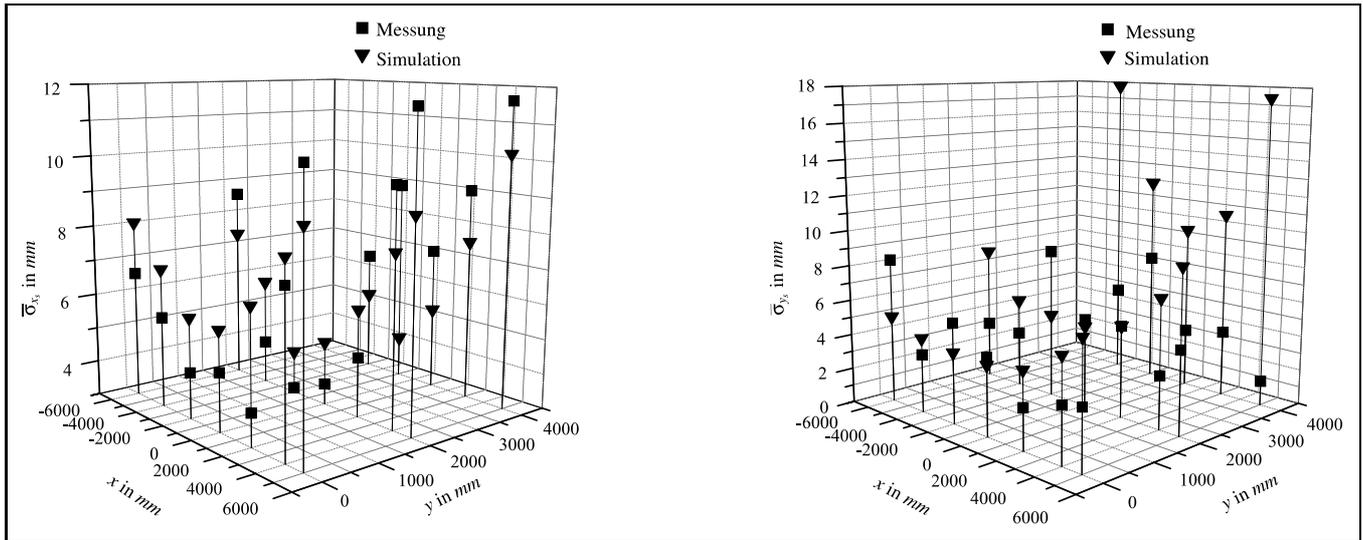


Bild 6: An exemplarischen Punkten bestimmte Messungenauigkeit in den kartesischen Koordinaten. Links: $\bar{\sigma}_{x_s}$, rechts: $\bar{\sigma}_{y_s}$.

erfüllt, wird \mathbf{z}_{s_i} als Sendeposition akzeptiert und der Datenbasis zugeführt, anderenfalls verworfen⁷. Selbst im Falle annähernd holonomer Bewegungssequenzen [26] ist der Vertrauenskeis aus Gl. (32) ein robustes Kriterium zur Unterdrückung von Messausreißern.

5 Messgeometrie und Genauigkeit

5.1 Experimentalumgebung

Die Sendeeinheit von LoPS ist derzeit auf einem quasiholonomen PeopleBot-Roboter der Firma ActivMedia [1] angebracht, der sich in einer Laborumgebung mit der Grundfläche 15 m × 10 m frei bewegen kann.

Vorausgesetzt werden nicht blockierte Sende-/Empfangsstrecken, sodass in Verbindung mit dem Umlenkkegel aus Bild 4 eine ausreichende Raumabdeckung gewährleistet ist und die in Abschnitt 4.3 erwähnten Fehlereinflüsse kaum auftreten. Es sind weder, etwa in der Nähe von Wänden oder in Ecken, auf Mehrwegeausbreitungen oder Reflexionen zurückzuführende Signalverfälschungen zu beobachten, noch tritt eine Interferenz der Ultraschallträgersignale mit anderen Signalquellen der Laborperipherie auf. Der zu erwartende Positionsfehler ist einzig auf die in Kapitel 3 dargestellten geometrischen Unsicherheiten zurückzuführen.

Das verwendete Laufzeitmessverfahren aus Bild 5 unterliegt einem systematischen Detektionsfehler von einer Schwingungsperiode des Signalbursts. Bei der Signalfrequenz von 40 KHz und $c_{us} \approx 340 \text{ ms}^{-1}$ entspricht das einem zu erwartenden Entfernungsfehler $\Delta d \approx 8 \text{ mm}$. Mit der approximativen Annahme $\sigma_d^2 \approx \Delta d^2$ ist die zu erwartende Unsicherheit Σ_{z_s} der berechneten Position \mathbf{z}_s auf die in Kapitel 3 beschriebene Weise quantifizierbar. Σ_{z_s} ermöglicht Rückschlüsse auf die optimale Messgeometrie.

Tabelle 1: Simulierter Fehler in verschiedenen Lokalisierungssituationen (alle Angaben in mm).

Fall	①	②	③	④
Δd_1	5	-2	3	0
Δd_2	-6	1	7	-6
Δd_3	3	-3	-4	9
$\mathbf{z}_{s_{id}}$	(0, 0)	(-4000, 2000)	(2800, 4900)	(-5700, 3500)
$\mathbf{z}_{s_{LoPS}}$	(0, 1)	(-3997, 1996)	(2802, 4882)	(-5692, 3521)
$\Delta \mathbf{z}_s$	(0, 1)	(3, -4)	(2, -18)	(8, 21)
σ_{x_s}	8	8	6	10
σ_{y_s}	6	7	35	21

Tabelle 1 zeigt exemplarisch simulierte Lokalisierungssituationen mit den in der Praxis verwendeten Empfängerpositionen \mathbf{z}_1 , \mathbf{z}_2 und \mathbf{z}_3 aus Bild 7. Die gemessenen Entfernungen d_1 , d_2 und d_3 unterliegen den Fehlern Δd_1 , Δd_2 und Δd_3 . Diese sind in den Situationen ①, ②, ③ und ④ ähnlich. In Fall ③ befinden sich S und E_3 nahe beieinander, in Fall ④ S und E_1 . Aufgrund dieser Annäherung von Sender S und einem Empfänger E_i ist der Fehler $\Delta \mathbf{z}_s = \mathbf{z}_{s_{id}} - \mathbf{z}_{s_{LoPS}}$ des Lokalisierungsergebnisses in den Fällen ③ und ④ größer als in ① und ②. Darauf deuten bereits die jeweils errechneten Varianzen σ_{x_s} bzw. σ_{y_s} hin, die in diesen Fällen größer sind.

Generell ist die „Circular Error Probability“ CEP⁸ bei Annäherung des Senders an eine der Empfängerpositionen \mathbf{z}_i leicht vergrößert, was sich rein anschaulich aus der dann eher ungünstigen Geometrie eines der Trilaterationsdreiecke aus Bild 1 erklärt.

Die Empfängerpositionen (in mm)

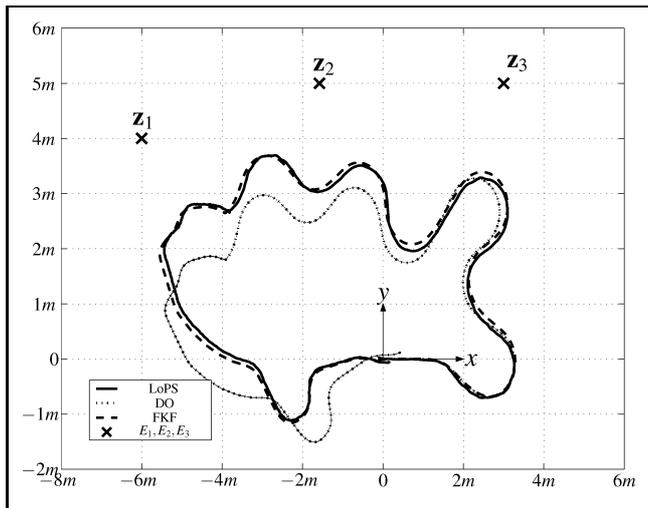
$$\mathbf{z}_1 = (-6000, 4000), \tag{33}$$

$$\mathbf{z}_2 = (-1580, 5000), \tag{34}$$

$$\mathbf{z}_3 = (3000, 5000) \tag{35}$$

⁷ Unter Laborbedingungen ist mit weniger als 5% zu verwerfender Positionen zu rechnen.

⁸ CEP _{λ} gibt den Kreisradius an, der $\lambda\%$ einer normalverteilten Menge enthält [43].



Endpunktkoordinaten	x (in mm)	y (in mm)
manuell	100	-50
LoPS	103	-66
DO	437	122
FKF	126	-61

Bild 7: Trajektorienvergleich mit LoPS: Die durchgezogene Linie repräsentiert die LoPS-Referenz, anhand der der Vergleich von zwei Navigationsansätzen möglich ist. Punktiert: Differentialodometrie (DO), strichliert: Fehlerkalmanfilter (FKF, [36]).

in Bild 7 wurden aus diesem Grund in vom Roboter wenig frequentierten Bereichen gewählt. Diese Messgeometrie funktioniert in der Testumgebung einwandfrei und schränkt die Bewegungsfreiheit des Roboters nur hinsichtlich der Sendereichweite der Sonarmodule ein.

In Bezug auf die Arbeitsraumabdeckung ergaben umfangreiche Messreihen eine mittlere statische Genauigkeit von x_s und y_s im Zentimeterbereich. Bild 6 zeigt die Verteilung der Fehler in den kartesischen Koordinaten x_s und y_s anhand exemplarischer, mit großer Sorgfalt mehrmals von Hand nachgemessener Punkte aus dem Arbeitsraum des Roboters, denen jeweils die mit Gl. (23) prognostizierte Unsicherheit gegenübergestellt ist. Erkennbar ist die bei Annäherung des Senders an eine der Empfängerpositionen z_i leichte Vergrößerung mindestens eines der kartesischen Fehler, die sich mit Maximalwerten von $\bar{\sigma}_{x_s} \approx 8$ mm und $\bar{\sigma}_{y_s} \approx 12$ mm im Rahmen der vertretbaren simulierten Vorhersage bewegen.

5.2 Trajektorienanalyse mit LoPS

Bild 7 vergleicht mehrere Trajektorienanschätzungen einer von Hand gesteuerten Roboterfahrt anhand der mit LoPS ermittelten Referenz. Die punktierte Linie ergibt sich durch die ausschließliche Verwendung von differentieller Odometrie [23] als Navigationsinstrument; während die gestrichelte Linie das Ergebnis einer mit einem Fehlerkalmanfilter gyroskopisch korrigierten Positionsschätzung [36] darstellt. Die von Hand vermessene Position im Endpunkt der Trajektorie (Tabelle in Bild 7) und die Genauigkeitsanalyse zeigen exemplarisch, dass LoPS genau genug zur Verwendung als Referenz ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

LoPS eignet sich zum einen innerhalb Umgebungen von min. $15\text{ m} \times 10\text{ m}$ Grundfläche als Referenz, da die durchschnittlich gemessenen Standardabweichungen kaum größer als die im Falle eines manuellen Vermessens zu erwartenden sind. Zum anderen liegt es in der Natur der Sache, dass ein solches System, ähnlich wie im Fall von GPS, als Hauptnavigationsinstrument eingesetzt werden kann, dessen Messwerte in einem Fusionsalgorithmus wie dem Kalmanfilter mit denen anderer Sensoren verknüpft werden können. Der moderate Preis von weniger als € 500 macht LoPS zur Alternative für Navigationsanwendungen in Innenräumen, die nicht auf die vollkommene Systemautonomie abzielen.

In Arbeit ist die Integration der von LoPS gelieferten Positionsinformation als Position-Fix für das Fehlerkalmanfilter [36]. Um LoPS in anderen als Laborumgebungen als Navigationsinstrument einsetzen zu können, muss eventuell auftretenden Hindernissen und unter Umständen extrem schlechten Messgeometrien Rechnung getragen werden. Dies geht mit einer Erhöhung der Anzahl der Sende-/Empfangsstrecken einher. Davon unabhängig stellen sich Fragen im Hinblick auf die optimale Verteilung und Anzahl der Empfänger [8] bezüglich einer größtmöglichen Genauigkeit.

Literatur

- [1] ActivMedia (2001). *Pioneer 2 Operations Manual*, 7. Aufl., ActivMedia Robotics LLC, 44 Concord Street, Peterborough, NH 03458, USA.
- [2] Arkin, R. und Murphy, R. (1990). Autonomous Navigation in a Manufacturing Environment, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **6**(4), S. 445–454.
- [3] Arras, K. und Vestli, S. (1998). Hybrid, High-precision Localisation for the Mail-distributing Mobile Robot System MOPS, in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 3129–3135.
- [4] Avis, D. und Imai, H. (1990). Locating a Robot with Angle Measurements, *Journal of Symbolic Computation* **10**, S. 311–326.
- [5] Betke, M. und Gurvits, L. (1997). Mobile Robot Localization Using Landmarks, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **13**(2), S. 151–263.
- [6] Borenstein, J., Everett, H. R. und Feng, L. (1996). *Navigating Mobile Robots: Sensors and Techniques*, AK Peters Ltd., Natick, USA.
- [7] Borenstein, J. und Feng, L. (1996). Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **12**(6), S. 869–880.
- [8] Cohen, C. und Koss, F. (1992). A Comprehensive Study of Three-Object Triangulation, in *Proceedings of the 1992 SPIE Conference on Mobile Robots*, S. 95–106.
- [9] De Bruyne, P. (1987). *Vorrichtung zur Bestimmung der Position eines beweglichen Objekts*, Europäisches Patent EP0233472A1.
- [10] Debuisser, T., Lersisson, J.-P. und Gilliard, L. (1997). *Verfahren und Vorrichtung zur Erfassung und Behandlung graphischer Information*, Europäisches Patent EP0670070B1.

- [11] Dunlop, G. R., Jufer, M. und Perrottet, M. (1997). A Phase Sensitive Guidance System for an Inductively Powered Automatic guided Vehicle, in *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics*, S. 181–186.
- [12] Durieu, C., Clergeot, H. und Monteil, F. (1989). Localization of a Mobile Robot with Beacons Taking Erroneous Data into Account, in *Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Band 2, S. 1062–1068.
- [13] Endres, H., Feiten, W. und Lawitzky, G. (1998). Field Test of a Navigation System: Autonomous Cleaning in Supermarkets, in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Band 2, S. 1779–1781.
- [14] Figueroa, J. F. und Mahajan, A. (1994). A Robust Navigation System for Autonomous Vehicles Using Ultrasonics, *Control Engineering Practice* 2(1), S. 49–59.
- [15] Fuke, Y. und Krotkov, E. (1996). Dead Reckoning for a Lunar Rover on Uneven Terrain, in *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Band 1, S. 411–416.
- [16] Gelb, A. (Hrsg.) (1974). *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, Cambridge, USA.
- [17] Gutmann, J. S. und Nebel, B. (1997). Navigation mobiler Roboter mit Laserscans, in *Autonome Mobile Systeme 1997* (P. Levi, T. Bräunl und N. Oswald, Hrsg.), Informatik aktuell, Springer Verlag, Berlin, S. 36–47.
- [18] Hanebeck, U. D. und Schmidt, G. (1995). Localization of Fast Mobile Robots Based on an Advanced Angle-Measurement Technique, *Control Engineering Practice* 4(8), S. 1109–1118.
- [19] Holenstein, A. A. (1992). *Aufdatierung der Position und der Orientierung eines mobilen Roboters*, Dissertation, Institut für Automatik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz.
- [20] Hutter, K. (1995). *Fluid- und Thermodynamik*, Springer Verlag, Berlin.
- [21] Jörg, K. W., Gattung, T. und Weber, J. (1999). Supporting Mobile Robot Localization by Visual Bar Code Recognition, in *Proceedings of the 1999 IASTED Conference on Robotics and Applications*, S. 352–357.
- [22] Kaplan, E. D. (Hrsg.) (1996). *Understanding GPS. Principles and Applications*, Mobile Communications Series, Artech House Publishers, Norwood, USA.
- [23] Kelly, A. (2001). A General Solution for Linearized Systematic Error Propagation in Vehicle Odometry, in *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Band 4, S. 1938–1945.
- [24] Kleeman, L. (1992). Optimal Estimation of Position and Heading for Mobile Robots Using Ultrasonic Beacons and Dead-reckoning, in *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Band 3, S. 2582–2587.
- [25] Kupec, T. (1989). Integration of Autonomous Mobile Robots in Flexible Manufacturing Systems, in *Intelligent Autonomous Systems* (T. Kanade, F. C. A. Groen und L. O. Hertzberger, Hrsg.), 2. Aufl., Band 1, IOS Press, Amsterdam, Holland, S. 122–133.
- [26] Latombe, J.-C. (1991). *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- [27] Lawitzky, G., Feiten, W. und Möller, M. (1995). Sonar Sensing for Low-cost Indoor Mobility, *Robotics and Autonomous Systems* 14(95), S. 149–157.
- [28] Manolakis, D. E. (1996). Efficient Solution and Performance Analysis of 3-D Position Estimation by Trilateration, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 32(4), S. 1239–1248.
- [29] Murata (2001). *Piezoelectric Ceramics Sensors (PIEZOTITE®)*, Murata Manufacturing Co., 2-26-10, Tenjin Nagakyo-shi, Kyoto 617-8555, Japan.
- [30] Navarro-Serment, L. E., Paredis, C. J. J. und Khosla, P. K. (1999). A Beacon System for the Localization of Distributed Robotic Teams, in *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics*, S. 29–35.
- [31] Navarro-Serment, L., Grabowski, R., Paredis, C. und Khosla, P. (2002). Millibots, *IEEE Robotics & Automation Magazine* 9(4), S. 31–40.
- [32] Polaroid (1999). *Technical Specifications for 600/7000 Series electrostatic Transducers*, Polaroid Cooperation, OEM Components Group, 400 Boston Post Road, Wayland, MA 01778-043, USA.
- [33] Randell, C. und Muller, H. (2001). Low Cost Indoor Positioning System, in *UbiComp 2001: Ubiquitous Computing* (G. D. Abowd, B. Brumitt und S. Shafer, Hrsg.), Band 2201 in *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Verlag, Berlin, S. 42–48.
- [34] Rencken, W. D. (1993). Concurrent Localisation and Map Building for Mobile Robots Using Ultrasonic Sensors, in *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Band 3, S. 2192–2197.
- [35] Roman, H. T. (1991). Robots Cut Risks and Costs in Nuclear Power Plants, *IEEE Computer Applications in Power* 4(3), S. 11–15.
- [36] Rudolph, A. (2003). Quantification and Estimation of Differential Odometry Errors in Mobile Robotics with Redundant Sensor Information, *International Journal of Robotics Research* 22(2), S. 117–128.
- [37] Rudolph, A., Siegel, A. und Adamy, J. (2002). Ein integriertes Navigationssystem für einen mobilen Roboter, *thema Forschung* 1/2002, S. 84–89.
- [38] Schmidt, F. (1988). *Geschichte der geodätischen Instrumente und Verfahren im Altertum und Mittelalter*, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- [39] Schultz, R. J., Nakajima, R. und Nomura, J. (1991). Telepresence Mobile Robot for Security Applications, in *Proceedings of the 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Band 2, S. 1063–1066.
- [40] Schumpe, G., Hansen, M. und Hofmann, P. (1985). *Vorrichtung zum Messen der Lage und der Bewegung wenigstens eines Meßpunktes*, Deutsches Patent DE3406179C1.
- [41] Serafini, S., Tranchant, P. und Elkrief, S. (2001). *Methods and Devices for Determining with Ultrasounds the Position of a Mobile Object*, Internationale Offenlegungsschrift WO01/69281A1, World Intellectual Property Organization.
- [42] Shoval, S., Benchetrit, U. und Lenz, E. (1995). Control and Positioning of an AGV for Material Handling in an Industrial Environment, in *Proceedings of the 27th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, S. 473–479.
- [43] Siouris, G. M. (1993). *Aerospace Avionics Systems. A modern Synthesis*, Academic Press, San Diego, USA.
- [44] Tsai, C.-C. (1998). A Localization System of a Mobile Robot by Fusing Dead-reckoning and Ultrasonic Measurements, in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology*, S. 144–149.
- [45] Tse, P. W., Lang, S., Leung, K. C. und Sze, H. C. (1998). Design of a Navigation System for a Household Mobile Robot Using Neural Networks, in *Proceedings of the 1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Band 3, S. 2151–2156.
- [46] Vallidis, N. M. (2002). *WHISPER: A Spread Spectrum Approach to Occlusion on Acoustic Tracking*, Dissertation, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, USA.

- [47] van Brussel, H., van Helsdingen, C. C. und Machiels, K. (1988). FROG – Free Ranging on Grid: New Perspectives in Automated Transport, in *Proceedings of the 6th International Conference on Automated Guided Vehicles*, S. 223–232.
- [48] von Wichert, G. und Tolle, H. (1998). Towards Constructing and Using Selforganizing Visual Environment Representations for Mobile Robots, in *Proceedings of the 3rd IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV)*, S. 712–717.
- [49] Wang, C. (1988). Location Estimation and Uncertainty Analysis for Mobile Robots, in *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 1230–1235.
- [50] Wehn, H. W. und Bélanger, P. R. (1997). Ultrasound-based Robot Position Estimation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **13**(5), S. 682–692.
- [51] Zalewski, G. M. (1999). *Wireless I/O Apparatus and Method of Computer-assisted Instruction*, US-Patent 5,991,693.

Manuskripteingang: 25. Juli 2003.

Dipl.-Ing. Alexander Rudolph ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik der Technischen Universität Darmstadt. Sein Hauptarbeitsgebiet ist der Entwurf hybrider Navigationsmethoden für die mobile Robotik.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Petersenstr. 20, 64287 Darmstadt, Tel.: (+49)6151-16 7409, E-Mail: alexis@rtr.tu-darmstadt.de.

Dipl.-Ing. Torsten Kleinschmidt ist Projektingenieur bei der Thyssen-Krupp-Uhde GmbH.

Adresse: Uhde GmbH, Friedrich-Uhde-Straße 2, 65812 Bad Soden, Tel.: (+49)6196-205 1621, E-Mail: kleinschmidt@tk-uhde.thyssenkrupp.com.

Dipl.-Ing. Marcel Blank ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik der Technischen Universität Darmstadt. Er beschäftigt sich mit Sicherheitsstrukturen mobiler Systeme.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Petersenstr. 20, 64287 Darmstadt, Tel.: (+49)6151-16 7409, E-Mail: marcel@rtr.tu-darmstadt.de.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy ist Leiter des Fachgebietes Regelungstheorie und Robotik der Technischen Universität Darmstadt. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Regelungsverfahren, Computational Intelligence, Bionik und autonome mobile Roboter.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt, Tel.: (+49)6151-16 3442, E-Mail: adamy@rtr.tu-darmstadt.de.

Verfügbar unter
lediglich die vom Gesetz vorgesehenen Nutzungsrechte gemäß UrhG