

Lokalisierung von mobilen Endgeräten mit Hilfe von WLAN-RSS-Methoden

Projektleiter

Prof. Dr. Uwe Großmann
Prof. Dr. Christof Röhrig

Forschungsschwerpunkt

Mobile Business
Mobile Systems

Mitarbeiter

Dipl.-Inform.
Mathias Dalhaus
Dipl.-Inform.
Thomas Domin
Dipl.-Inform.
Syuzanna Hakobyan
Dipl.-Inform.
Frank Künemund
Dipl.-Inform.
Markus Schauch

Förderung

Fachhochschule
Dortmund
Forschungsbudget

Kontakt

Prof. Dr. Uwe Großmann
Fachbereich Wirtschaft
Fachhochschule
Dortmund
Emil-Figge-Straße 44
44227 Dortmund
Tel: (0231) 755-4943
E-Mail: uwe.grossmann
@fh-dortmund.de

Prof. Dr. Christof Röhrig
Fachbereich Informatik
Fachhochschule
Dortmund
Emil-Figge-Straße 42
44227 Dortmund
Tel: (0231) 755-6778
E-Mail: christof.roehrig
@fh-dortmund.de

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist es, die Position mobiler Endgeräte (Personal Digital Assistant und Smartphone) und die Position und Orientierung mobiler Roboter innerhalb von Gebäuden zu bestimmen. Neben anderen Technologien und Methoden der Ortung in Gebäuden, wie z.B. die Messung der Signallaufzeit, die zusätzliche Hardware-Investitionen erfordern, bietet sich die Messung der Signalstärke mehrerer Basisstationen an. Aus der Abschwächung der Signalstärke mit dem Abstand zum Sender wird versucht, Informationen über die Messposition und deren Orientierung zu erhalten. Hier gibt es unterschiedliche Ansätze und mathematische bzw. statistische Methoden, die von den Autoren angepasst bzw. neu entwickelt wurden. Um mit vorhandenen WLAN-Installationen kompatibel zu bleiben, wurde die eingesetzte WLAN-Hardware und Systemsoftware nicht modifiziert. Für die untersuchten Verfahren wurden Messreihen in unterschiedlichen Messumgebungen durchgeführt und miteinander verglichen. Im Folgenden werden zuerst die untersuchten Verfahren vorgestellt und anschließend die Ergebnisse der Messversuche dargestellt.

Untersuchte Verfahren

Für die Lokalisierung in drahtlosen Netzwerken werden zur Zeit mehrere verschiedene Techniken eingesetzt. Viele Verfahren verwenden dabei speziell für die Lokalisierung modifizierte Hardware. Ein wesentliches Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeiten bestand in der Minimierung der Kosten und des Arbeitsaufwands der für die Positionsbestimmung eingesetzten Hardware. Aus diesen Gründen wurden Signalstärke basierte Verfahren für die Lokalisierung verwendet.

Die meisten mobilen Endgeräte können die Signalstärken der Access Points in ihrer Umgebung messen. Diese Informationen werden im normalen Gebrauch für das Roaming und die Assoziation mit den Access Points verwendet. Das Verteilungsmodell für die Signalstärkewerte (RSSI-Werte: Received Signal Strength Indication) basiert auf der Freiraumdämpfung des Signals. Die Freiraumdämpfung ist folgendermaßen definiert:

$$F = \frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = \left(\frac{c}{4\pi df} \right)^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Wobei P_{Rx} die Leistung des empfangenen Signals, P_{Tx} die Leistung des gesendeten Signals, c die Lichtgeschwindigkeit, f die Frequenz des Signals,

d die Distanz zum Sender und λ die Wellenlänge des Signals ist. Dieses Modell beschreibt den Idealfall des quadratischen Abfalls der Signalstärke mit der Entfernung zum Sender. Da in Gebäuden aber unterschiedliche Dämpfungswerte durch Störquellen entstehen, muss dafür ein Faktor berücksichtigt werden. Die Störungen entstehen durch die Infrastruktur (Wände, Tische, Stühle etc.), Menschen und vorherrschenden Datenverkehr. Dabei werden die Signale gebeugt, gebrochen, gestreut oder einfach nur von verschiedenen Materialien unterschiedlich gedämpft. Gelangt das Signal auf mehreren unterschiedlichen Wegen vom Sender zum Empfänger spricht man von Mehrwege-Effekten (auch Multipath-Effekte). Durch Überlagerung der Signale entsteht dann entweder eine Verstärkung oder eine Dämpfung des empfangenen Signals. Das logarithmische Distanzverlustmodell berücksichtigt Reflektionen in Gebäuden durch Einführung einer Distanzverlustvariablen:

$$P_{Rx} / dBm = P_0 / dBm - 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

Wobei P_0 die empfangene Signalstärke der Entfernung d_0 und γ die Distanzverlustvariable ist. Die Parameter P_0 , d_0 und γ müssen an die Geometrie jedes Raumes angepasst werden. Werden die RSSI-Werte von drei Access Points empfangen, kann jeweils die Distanz zum Empfänger und anschließend über eine Trilateration die Position des mobilen Geräts berechnet werden. Abbildung 1 zeigt eine Positionsbestimmung mittels Trilateration.

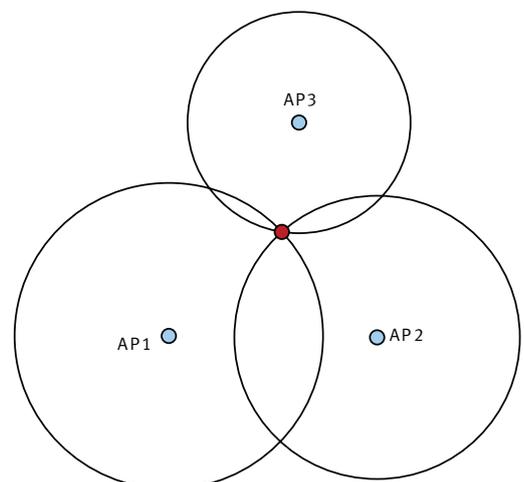


Abb. 1: Positionsbestimmung mittels Trilateration

Abbildung 2 zeigt eine mit dem Distanzverlustmodell berechnete Kurve und vergleicht diese mit gemessenen Signalstärken. Es ist deutlich zu sehen, dass die gemessenen Signalstärken teilweise bei einem Abstand von bis zu 10m gleiche Werte aufweisen. Abbildung 2 zeigt, dass die Positionsbestimmung im Innenbereich nur mit Hilfe der Distanzberechnung mittels eines Berechnungsmodells sehr ungenau ist.

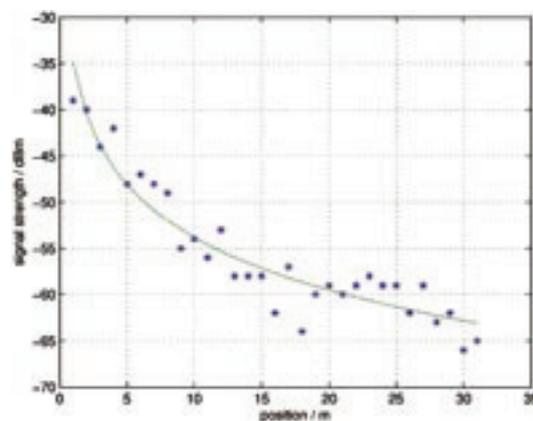


Abb. 2: Distanzverlustmodell und gemessene Signalstärkewerte

Für die Positions- und Orientierungsbestimmungen wurden Radio Map basierte Verfahren eingesetzt. Diese Verfahren unterteilen sich in zwei Phasen: In der initialen Kalibrierungsphase werden die Signalstärken an Referenzpunkten in der Umgebung gemessen und diese zusammen mit ihrer Position in einer Datenbank gespeichert. Die Datenbank wird dabei als Radio Map bezeichnet. Anschließend werden diese Werte mit aktuellen Signalstärkewerten aus der sogenannten Lokalisierungsphase verglichen. So kann die Position- und Orientierungsbestimmung mit Hilfe gelernter Fingerabdrücke bestimmt werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der WLAN-Lokalisierung ist die Aktualität der gemessenen Signalstärkewerte. Einige Systeme (Endgeräte) puffern die gemessenen Signalstärkewerte und liefern einer Anwendung über einen gewissen Zeitraum stets den gleichen veralteten Wert. Das ist bei der Lokalisierung ein unerwünschtes Verhalten. Die Pufferung hängt in den meisten Fällen mit dem verwendeten Scanverfahren zusammen. Es wird zwischen aktivem und passivem Scannen unterschieden. Das passive Scannen wartet auf Pakete, die von jedem Access Point ausgesendet werden, und bestimmt anhand der eingehenden Leistung den RSSI-Wert. Somit hängt der Signalstärkewert

von Intervall eines jeden Access Points ab und wird in vielen Systemen gepuffert. Eine bessere Alternative stellt das aktive Scannen dar, welches mit einem Request-Reply-Modell mit den Access Points kommuniziert. Dabei wird eine Anfrage an den Access Point gesendet und anhand der empfangenen Leistung des Antwortpakets wird der RSSI-Wert berechnet. So wird sichergestellt, dass zum Zeitpunkt des Scanvorgangs immer ein aktueller Signalstärkewert vorliegt.

Für die Berechnung der Orientierung wurde eine auf einen mobilen Roboter montierte Richtantenne eingesetzt. Mit dieser wurden in der Radio Map jeweils vier Orientierungen für jeden (0°, 90°, 180°, 270°) Referenzpunkt aufgenommen.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die einzelnen Verfahren, die für die Berechnung der Position und Orientierung eingesetzt wurden. Die Verfahren, die Linien konstanter gemessener Signalstärke (Isolinien) verwenden, wurden an der Fachhochschule Dortmund entwickelt.

a) Euklidischer Abstand

Der Euklidische Abstand ist ein Maß für die Differenz zwischen den Signalstärkewerten aus der Lokalisierungsphase und denen aus der Radio Map (Kalibrierungsphase). Die folgende Gleichung zeigt die Berechnung mit dem Euklidischen Abstand:

$$d_{j,k} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_j^{AP_i} - s_k^{AP_i})^2}$$

Wobei $c_j^{AP_i}$ der Signalstärkewert des Access Points bei dem Referenzpunkt AP_i in der Radio Map j und $s_k^{AP_i}$ der Signalstärkewert von AP_i zum Zeitpunkt k in der Kalibrierungsphase ist. Nach der Berechnung gibt es eine Position in der Radio Map, für die ein minimaler Euklidischer $d_{j,k}$ Abstand berechnet wurde. Ein üblicher Ansatz ist, diese Position als die aktuelle des Endgeräts festzulegen. Die Genauigkeit hängt bei diesem Ansatz stark vom verwendeten Raster der Referenzpunkte in der Radio Map ab. Aus diesem Grund wurde zwischen den Referenzpunkten in der Radio Map interpoliert:

$$x_k = \frac{\sum_{j=1}^J w_{j,k} \cdot x_j}{\sum_{j=1}^J w_{j,k}} \quad \text{und} \quad w_{j,k} = \frac{1}{d_{j,k}}$$

$$y_k = \frac{\sum_{j=1}^J w_{j,k} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^J w_{j,k}}$$

Wobei $w_{j,k}$ der reziproke Euklidische Abstand ist und als Gewichtungsfaktor für die Multiplikation mit den Koordinaten der Referenzpunkte verwendet wird. Dabei werden nur die Referenzpunkte J mit den kleinsten Euklidischen Abständen gewichtet. Das Ergebnis ist eine interpolierte Position. (x, y) Somit ist die Berechnung der Position nicht mehr direkt vom Raster der Referenzpunkte abhängig.

Für die Berechnung der Orientierung mittels des Euklidischen Abstands wurde die Arkustangens Funktion mit zwei Argumenten eingesetzt:

$$\theta_k = \text{atan2}\left(\sum_{j=1}^J w_{j,k} \sin\theta_j, \sum_{j=1}^J w_{j,k} \cos\theta_j\right)$$

Wobei die J Orientierungen mit den kleinsten Euklidischen Abständen mit dem reziproken Euklidischen Abstand $w_{j,k}$ gewichtet werden. Das Ergebnis θ_k ist eine interpolierte Orientierung.

b) Linien konstanter gemessener Signalstärke (Isolinien)

Bei diesem Verfahren wird ein Dreiecksnetz (TIN = Trianguläres Irreguläres Netzwerk) mit den Referenzpunkten aus der Radio Map erstellt. Jeder Referenzpunkt stellt dabei einen Eckpunkt eines Dreiecks dar. Das Dreiecksnetz wird mit Hilfe der Delaunay Triangulation berechnet. Das so entstandene Dreiecksnetz wird anschließend linear mit den sogenannten Isolinien interpoliert. Die Isolinien stellen dabei die gemessenen Signalstärkewerte der Access Points in der Lokalisierungsphase dar. Dreiecke, deren Eckpunkte (Referenzpunkte) Signalstärkewerte haben zwischen denen die Messung aus der Lokalisierungsphase liegt, können so linear interpoliert werden. Die Schnittpunkte der Isolinien werden interpoliert und so die Position des Endgeräts bestimmt. Die Abbildung 3 zeigt eine Radio Map mit linearer Interpolation durch die Isolinien.

Eine Möglichkeit ist es nun, die Dreiecke nach der in ihnen befindlichen Anzahl an Schnittpunkten und Isolinien zu gewichten. Anschließend kann entweder der Schwerpunkt des Dreiecks mit dem höchsten Gewicht zur aktuellen Position erklärt, oder eine Interpolation zwischen den Schwerpunkten durchgeführt werden.

Ein weiterer Ansatz gewichtet einen eingeschränkten Bereich von Schnittpunkten. Dabei wird für alle Eckpunkte eines Dreiecks ein Euklidischer Abstand berechnet. Um das Dreieck mit dem kleinsten Euklidischen Abstand wird ein Akzep-

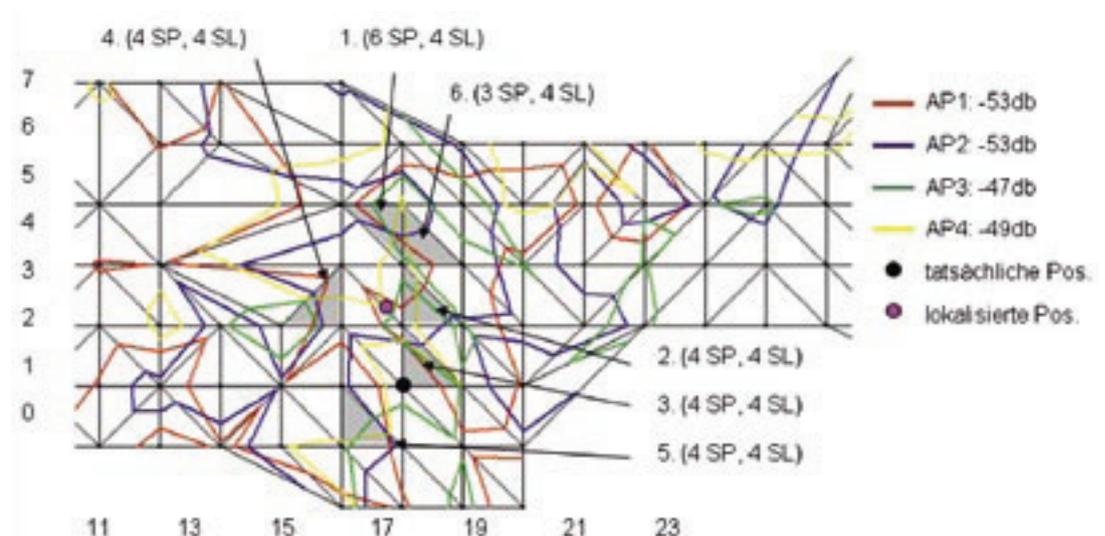


Abb. 3: Interpolation der Radio Map durch Isolinien

tanzkreis gelegt. Alle Schnittpunkte, die innerhalb dieses Kreises liegen, werden folgendermaßen gewichtet:

$$w_i = (s_{i,1} - s_{\min})^2 + (s_{i,2} - s_{\min})^2$$

$$\text{mit } s_{\min} = -100\text{dBm}$$

Wobei $s_{i,1}$ und $s_{i,2}$ die Signalstärkewerte der Isolinien des Schnittpunktes i und s_{\min} der kleinst mögliche Signalstärkewert ist. Größere Signalstärkewerte, die näher an den Access Points liegen, führen zu größeren Gewichten. Anschließend werden die Schnittpunkte mit den Gewichten multipliziert und daraus eine interpolierte Position berechnet:

$$x = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i}, \quad y = \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i}$$

Wobei N die Anzahl der Schnittpunkte ist, die innerhalb des Akzeptanzkreises liegen.

Für die Orientierungsbestimmung wird für jeden Schnittpunkt ein Vektor berechnet. Dabei wird für alle Orientierungen des Dreiecks, in denen der Schnittpunkt liegt, der Euklidische Abstand berechnet. Anschließend werden die J kleinsten Orientierungen mit den Gewichten w_i der Schnittpunkte und dem reziproken Euklidischen Abstand d_j gewichtet:

$$\theta_i = \text{atan2}\left(\sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \sin\theta_j, \sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \cos\theta_j\right),$$

$$p_i = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \sin\theta_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \cos\theta_j\right)^2}$$

Die resultierende Orientierung wird dann über die Addition der Vektoren aller Schnittpunkte berechnet:

$$\theta = \text{atan2}\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \sin\theta_j, \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \cos\theta_j\right),$$

$$\rho = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \sin\theta_j\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \frac{w_i}{d_j} \cos\theta_j\right)^2}$$

Wobei N die Anzahl der Schnittpunkte im Akzeptanzkreis ist.

c) Statistischer Ansatz (Bayes)

Die vorhergehende Methode stellt ein Einzelwertverfahren dar, d.h. es werden zwei Einzelbeobachtungen oder aber kumulierte Beobachtungen (Mittelwerte, Mediane) miteinander verglichen. Langzeitmessungen zeigen aber, dass die gemessenen Signalstärkewerte nicht unbedingt normalverteilt sind. Die Idee ist also, keine Mittelwerte oder Mediane zu vergleichen, sondern Histogramme gemessener Signalstärkewerte. Dies führt zu einem statistischen Ansatz, der auf dem Bayes'schen Theorem beruht. Für jeden Kalibrierungspunkt wird eine Wahrscheinlichkeit dafür berechnet, dass eine aus der Ortungsphase Messung an diesem Punkt gemacht wurde.

Man beschreibt das Problem dadurch, dass man einen Punktraum S und einen Beobachtungsraum O definiert.

$$S = \{s_1, \dots, s_n\}; \quad O = \{o_1, \dots, o_m\};$$

Jedes Mitglied von S stellt einen Punkt (x, y, θ) dar. x und y sind Koordinaten des jeweiligen Punktes in der Ebene, θ steht für eine von vier Raumrichtung. Während der Kalibrierungsphase werden mehrere Messungen (Beobachtungen) an einem Punkt $s_i = (x, y, \theta)$ durchgeführt. Die Messungen ergeben ein Histogramm (normalisierte Häufigkeitsverteilung) über dem Beobachtungsraum. Während der Ortungsphase wird ebenfalls ein derartiges Histogramm erzeugt. Skalare Multiplikation der beiden Histogramme über den Beobachtungsraum und nachfolgende Normalisierung über den Punktraum ergeben eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung über dem Punktraum für die Messung an dem jeweiligen Ort. Die nachfolgende Formel stellt das Bayes'sche Theorem dar:

$$P(s_i | o_j) = \frac{\gamma_i P(s_i | o_j)}{\sum_{\alpha=1}^n (\gamma_\alpha P(s_i | o_j))}$$

$P(o_j | s_i)$ stellt die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür dar, dass die Beobachtung von o_j gemacht wird, wenn an s_i gemessen wurde, $P(s_i | o_j)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür an, dass an s_i gemessen wurde, wenn die Beobachtung von o_j gemacht wurde. γ_α stellt eine vorgegebene a-priori-Wahrscheinlichkeit dafür dar, dass eine Messung an einem bestimmten Ort gemacht werden kann oder nicht. Wenn es keine Vorfestlegungen gibt, wird man eine Gleichverteilung annehmen.

Ergebnisse und Auswertung der Messversuche

Für die Positionsbestimmung mit den mobilen Endgeräten (PDA und Smartphone) wurden zwei Messumgebungen eingesetzt. Ein Seminarraum (Größe ca. 15m x 7m) in einem Hörsaalgebäude der Fachhochschule Dortmund und ein Ausstellungsraum (Größe ca. 30m x 11m) des RWE-Museums „Strom und Leben“ in Recklinghausen. In beiden Umgebungen wurde ein 1m x 1m Raster von Referenzpunkten in der Radio Map gespeichert und vier Access Points in den Ecken der Räume positioniert.

Zur Genauigkeitsprüfung der Positionierungsmethoden wurde ein Rundpfad durch das Museum (Tour) definiert und drei unterschiedliche Pfade durch den Seminarraum (Ausstellungspfad, Schlenderpfad, Zufallspfad). Der Ausstellungspfad führt im Abstand von ca. 1 m an den Wänden des Seminarraumes entlang. Die Messrichtung ist auf die Wand ausgerichtet, als ob man Exponate betrachtet. Der Schlenderpfad führt im Abstand von ca. 2 m ebenfalls an den Wänden entlang, aber die Messausrichtung verläuft parallel zu

den Wänden. Der Zufallspfad stellt eine zufällige Auswahl von Messpunkten mit zufällig gewählter Ausrichtung dar. Die Genauigkeiten der Ergebnisse sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die räumliche Ausgestaltung der Testumgebung sich stark auf die Genauigkeit der Positionierung auswirkt. Während im Museum eine mittlere Genauigkeit zwischen 3,40 m und 4,16 m beobachtet werden konnte, lag diese in der homogeneren Testumgebung Seminarraum um mehr als einen Meter darunter im Bereich von 1,47 m bis 2,91 m.

Mit einem mobilen Roboter wurden Messungen in einem Flur eines Hörsaalgebäudes der Fachhochschule Dortmund durchgeführt. Dabei wurden das Euklid- und Isoline-Verfahren für die Positions- und Orientierungsgenauigkeit miteinander verglichen. Für die Messungen wurde das WLAN-Infrastruktur-Netzwerk des Fachbereichs Informatik verwendet. Die zusammengefassten Ergebnisse der Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeiten zeigt Tabelle 2.

	Testreihen		Mittlerer Abstand (m)	Standardabweichung (m)
BAYES	Museum	Tour	4,01	2,27
	Seminar	Ausstellung	2,03	2,34
		Schlendern	2,67	1,40
		Zufall	2,91	1,56
EUKLID	Museum	Tour	4,16	2,51
	Seminar	Ausstellung	1,47	1,27
		Schlendern	2,91	1,15
		Zufall	2,33	1,51
ISOLINE	Museum	Tour	3,40	1,71
	Seminar	Ausstellung	2,90	0,48
		Schlendern	2,00	0,58
		Zufall	2,00	1,04

Tabelle 1: Positionierungsgenauigkeiten mit den mobilen Endgeräten

	Testreihe	Mittlerer Abstand	Minimum	Maximum
EUKLID	Position	1,81 m	0 m	5,36 m
	Orientierung	79,67 °	0 °	163,01 °
ISOLINE	Position	1,52 m	0,12 m	4,17 m
	Orientierung	21,37 °	0 °	74,76 °

Tabelle 2: Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeiten mit einem mobilen Roboter

In dieser homogenen Testumgebung konnten mit dem mobilen Roboter Positionierungsgenauigkeiten unter 2m erzielt werden. Ein signifikanter Unterschied konnte zwischen beiden Verfahren nicht festgestellt werden. Bei der Orientierungsgenauigkeit zeigte sich, dass das Isoline-Verfahren mit 21,37° wesentlich genauere Orientierungen berechnete. Dieses Ergebnis wurde durch die Berücksichtigung der berechneten Vektorlängen als Gütemaß erreicht. So wurden nur Vektoren ab einer bestimmten Länge mit in das Ergebnis einbezogen.

Veröffentlichungen

Großmann U., Röhrig C., Hakobyan S., Domin T., Dalhaus M.: WLAN indoor positioning based on Euclidian distance and interpolation (isobars), 8. Wireless Technologies Kongress, Dortmund, Deutschland, September 2006, (Fortschritt-Berichte VDI : Reihe 10, Informatik/Kommunikation; Nr. 772), S. 296-305

Grossmann, U.; Schauch, M.; Hakobyan, S.: The accuracy of algorithms for WLAN indoor positioning and the standardization of signal reception for different mobile devices, International Journal of Computing, Vol . 6 (2007), Issue 1, pp 103-109

Grossmann, U.; Schauch, M.: RSSI based WLAN indoor positioning with personal digital assistants, in: Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications IDAACS 2007, (Ed. Sachenko, A), pp. 653 - 656; Dortmund, 2007

Grossmann, U.; Schauch, M.; Hakobyan, S.; Dalhaus, M.: RSSI-basierte WLAN-Ortung mit PDA (Personal Digital Assistant) innerhalb von Gebäuden, In: Wireless Communication and Information - New Technologies and Applications (Hrsg. J. Sieck, M.A. Herzog), 2008, vwh, pp 223-237

Röhrig, C.; Künemund, F.: Estimation of Position and Orientation of Mobile Robots in a WLAN, 7th Conference on Mobile Robots and Competitions, Paderne, Portugal, April 2007

Röhrig, C.; Künemund, F.: Mobile Robot Localization using WLAN Signal Strengths, 4th IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2007), Dortmund, Deutschland, September 2007, S. 704-709

Röhrig, C.; Künemund, F.: Estimation of Position and Orientation of Mobile Systems in a Wireless LAN, 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, USA, Dezember 2007, S. 4932-4937

Röhrig, C.; Künemund, F.: WLAN based Pose Estimation for Mobile Robots, 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, Juli 2008