

Beiträge zur Verbesserung der Indoor-Lokalisierung auf der Basis von drahtlosen Technologien

Nizam Kuxdorf-Alkirata



Beiträge zur Verbesserung der Indoor-Lokalisierung auf der Basis von drahtlosen Technologien

der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik
der Bergischen Universität Wuppertal
vorgelegte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

von
M. Sc. Nizam Kuxdorf-Alkirata
aus
Latakia

Wuppertal 2020

Datum der mündlichen Prüfung:	11.12.2020
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Dieter Brückmann
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Anton Kummert

Berichte aus der Informationstechnik

Nizam Kuxdorf-Alkirata

**Beiträge zur Verbesserung der Indoor-Lokalisierung
auf der Basis von drahtlosen Technologien**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7908-1

ISSN 1610-9406

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meine Mutter

Vorwort

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik an der Bergischen Universität Wuppertal entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Brückmann für die Betreuung dieser Arbeit und die großzügige kontinuierliche Unterstützung während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Auch danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Anton Kummert sehr dafür, dass er meine wissenschaftliche Laufbahn stets fördernd im Blick hatte, und für seine jetzige Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Ich danke zudem allen Mitarbeitern für die vielen Anregungen und fachlichen Diskussionen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Speziell hervorzuheben ist hier mein Freund und ehemaliger Kollege Thomas Werthwein, dessen fachliches Wissen und ruhige Art mir immer eine Bereicherung gewesen sind. Ebenso bedanke ich mich bei meinem Kollegen Dr. Fotios Kasolis, dessen Interesse an dieser Arbeit und dessen immerwährende Bereitschaft zu fachlichen Diskussionen auch zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Gerrit Maus, mein jetziger Kollege am Lehrstuhl, hat durch die Entwicklung und Bereitstellung einer in dieser Arbeit verwendeten Sensorplattform einen wesentlichen Beitrag zur Validierung der entwickelten Verfahren geleistet. Des Weiteren möchte ich Oliver Koch danken, der mich als wissenschaftliche Hilfskraft bei der Datengewinnung unterstützt hat. Auch Lech Kolonko gilt mein herzlicher Dank für seine immer vorhandene Bereitschaft sein Fachwissen mit mir zu teilen.

Mein Adoptivvater Hans Gerd Kuxdorf bot mir mit seinem verständnisvollen, gutmütigen und liebevollen Wesen immer, gerade auch in schweren Zeiten, einen wichtigen und zuverlässigen Rückhalt.

Meinen Eltern in Syrien danke ich dafür, dass sie mir diesen Werdegang ermöglicht und mich immer unterstützt und ermutigt haben. Besonders mein Vater Saleh Alkirata, der Deutsch in der Schule gelernt hatte, bestärkte mich in meiner Liebe zur europäischen Kultur und in meinem Wunsch, in Deutschland zu leben. Meine Mutter Thuraya hat mich ihrerseits nie ihren Schmerz der nun schon zehn Jahre andauernden Trennung als Belastung empfinden lassen. Ihr widme ich diese Arbeit.

Wuppertal, Februar 2021

Nizam Kuxdorf-Alkirata

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Symbolverzeichnis	xiii
1 Überblick über Technologien und Verfahren zur Indoor-Lokalisierung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Verfahren zur Indoor-Lokalisierung	3
1.2.1 ToA	3
1.2.2 TDoA	3
1.2.3 AoA	4
1.2.4 Pfadverlustmodell	4
1.2.5 Fingerprinting	5
1.2.6 Cell of Origin	6
1.2.7 Dead-Reckoning	6
1.3 Technologien zur Indoor-Lokalisierung	7
1.3.1 Infrarot	7
1.3.2 RFID	7
1.3.3 Ultraschall	8
1.3.4 Bluetooth Low Energy	9
1.3.5 Bluetooth 5.1	9
1.3.6 WLAN	10
1.3.7 Ultra-Wideband	11
1.4 Abgrenzung aktiver und passiver Lokalisierungssysteme	11
1.5 Struktur der Arbeit	12
 Teil I Neue Methoden zur aktiven Indoor-Lokalisierung auf der Basis von Feldstärkemessungen und einer Inertialmesseinheit	 15
2 Lokalisierung auf der Basis eines Modells der Signalausbreitung	17
2.1 Einführung	17
2.2 Systemkonfiguration und Initialisierungsphase	18
2.3 Optimierter Algorithmus zur Lokalisierung	20
2.3.1 Gleitende Mittelung der RSS-Werte	21
2.3.2 RSS-Glättung	21
2.3.3 Auto-Kalibrierung	21

2.3.4	Bidirektionale Distanzberechnung	22
2.3.5	Gewichtete Mittelung der Abstandswerte	23
2.4	Experimentelle Ergebnisse	24
2.5	Versuchsaufbau mit optimierter Sensorplattform	26
2.6	Performance des Lokalisierungsalgorithmus	30
2.7	Fazit	37
3	Neuartiges Verfahren zur Minimierung des Kalibrierungsaufwands der RSS-basierten Fingerprinting-Methode	39
3.1	Einführung	39
3.2	Fingerprinting bei maximalem Kalibrierungsaufwand	40
3.3	Effiziente Kalibrierung durch Anwendung des Pfadverlustmodells	42
3.4	Sicherstellung der langfristigen Stabilität	45
3.5	Experimentelle Ergebnisse	48
3.6	Fazit	51
4	Optimierte, IMU-basierte Indoor-Lokalisierung mit linearer Fehlermodellierung und Rauschfilterung	53
4.1	Einführung	53
4.2	Problembeschreibung	54
4.3	Lineares Fehlermodell zur Kompensation von Drifteffekten	56
4.4	Experimentelle Ergebnisse	58
4.5	Fazit	63
5	Verbesserung der Energieeffizienz von Indoor-Lokalisierungssystemen durch adaptive Abtastung und optimierte Nachverarbeitung von Sensordaten	65
5.1	Einführung	65
5.2	Verbesserung der Zielverfolgung durch Anwendung eines Korrekturalgorithmus	67
5.3	Stockwerkerkennung	69
5.4	Experimentelle Ergebnisse	69
5.5	Fazit	74
6	Untersuchung von Konzepten zur Hinderniserkennung mittels Temperatursensoren während einer Indoor-Lokalisierung	75
6.1	Einführung	75
6.2	Technische Daten und Kalibrierung des Infrarotsensors	76
6.3	Objekterkennung durch Bestimmung von Temperaturdifferenzen	77
6.4	Einfluss der Kleidung auf die Personenerkennung	77
6.5	Erkennung sich bewegender Personen	79
6.5.1	Erkennung einer Bewegung von rechts nach links und wieder zurück	80
6.5.2	Erkennung einer Bewegung von zwei aufeinandertreffenden Personen	81
6.5.3	Erkennung von entgegenkommenden und vorausgehenden Personen .	82
6.6	Fazit	84

Teil II	Neuartige Ansätze zur gerätefreien, passiven Indoor-Lokalisierung	85
7	Passive Indoor-Lokalisierung durch Mustererkennung der Feldstärkeverteilung	87
7.1	Einführung und Literaturüberblick	87
7.2	Indoor-Lokalisierung durch passives Fingerprinting	89
7.3	Testgebiet und Beschreibung des Messschemas	90
7.4	Bestimmung des Abdeckungsbereichs des Versuchsaufbaus	91
7.5	Schwellwertbasierter Ansatz	94
7.5.1	Vorbereitungsphase der Entscheidungsparameter	95
7.5.2	Trainingsphase	96
7.5.3	Lokalisierungsphase	97
7.6	Auswertungsphase	99
8	Passive Indoor-Lokalisierung durch Mustererkennung auf der Basis von maschinellem Lernen	103
8.1	Einführung	103
8.2	Erstellung der Merkmale	104
8.3	Erstellung einer Trainingsdatenbank	105
8.4	Einstellung der Modelle des maschinellen Lernens	106
8.5	Auswertung der experimentellen Untersuchungen	107
8.6	Fazit	111
9	Zusammenfassung und Ausblick	113
	Publikationen mit eigener Beteiligung	119
	Literaturverzeichnis	121

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lokalisierung mit AoD und AoA	10
2.1	Messkonfiguration mit den Basisstationen BS ₁ bis BS ₃ und dem zu lokalisierenden mobilen Sensor MS	19
2.2	Ablauf des verwendeten Algorithmus	20
2.3	Positionsschätzung eines MS auf der Sichtlinie zwischen zwei BSs	24
2.4	Positionsschätzung eines MS in der Mitte des Versuchsaufbaus	25
2.5	Versuchsaufbau mit sechs an den Wänden befestigten BLE-Sensoren	27
2.6	Gitterstruktur auf dem Boden des Flurs, sechs BLE-Sensoren sind an den Wänden links und rechts angebracht	27
2.7	Flexibel konfigurierbares Sensorfunkmodul für das ISM-Band, RSS2I	27
2.8	Gemessene RSS-Werte für eine Sichtverbindung zwischen zwei Geräten A und B	28
2.9	Wärmebilder aus den vom mobilen Sensor auf jedem Gitterquadrat empfangenen RSS-Werten.	29
2.10	Lokalisierungsergebnisse für die Gitterquadrate 52, 53 und 57 und Histogramme der Abweichungen	31
2.11	Lokalisierungsergebnisse für die Gitterquadrate 58, 59 und 62 und Histogramme der Abweichungen	32
2.12	Empfangsleistung am Sensor 1 in Abhängigkeit vom Abstand d des mobilen Senders.	33
2.13	Performance des Systems ohne und mit Gewichtung der berechneten Distanzen auf Gitterquadraten am linken Rand des Flurs	35
2.14	Performance des Systems ohne und mit Gewichtung der berechneten Distanzen auf Gitterquadraten am rechten Rand des Flurs	36
2.15	Eingrenzung des Testgebiets	37
3.1	Histogramm der Lokalisierungsabweichungen beim Anwenden der Fingerprinting-Methode und mit maximalem Kalibrierungsaufwand	41
3.2	Kalibriermuster, RSS-Werte an unkalibrierten Gitterquadraten werden mithilfe überbestimmter Gleichungssysteme berechnet	43
3.3	Histogramm der Lokalisierungsabweichungen mit vollständiger und ausgedünnter Datenbank	44
3.4	Histogramm der Lokalisierungsabweichungen ohne und mit Eingrenzung des Testgebiets	44
3.5	Muster mit Gitterquadraten für die Erstkalibrierung und die Aktualisierung	46
3.6	Prozentuale Änderung der RSS-Werte der jeweiligen Sensoren auf jedem Gitterquadrat nach einem Zeitraum von sieben Wochen	47
3.7	Beispiel für die Auswahl der für die Rekalibrierung verwendeten Gitterquadrate	48
3.8	Histogramme der Lokalisierungsfehler mit und ohne Ausdünnung der Datenbank	49

3.9	Histogramme der Lokalisierungsfehler ohne und mit Aktualisierung der Datenbank zu unterschiedlichen Zeitpunkten	50
4.1	Gemessene und nachverarbeitete Beschleunigungs- und Gyroskop-Messwerte, wenn sich das IMU-System in einer Ruhephase befindet	55
4.2	Zeitlicher Verlauf der x - Koordinate ohne und mit Nachfilterung	58
4.3	Proband mit einem IMU-System, das fest auf einen Fuß montiert wurde . .	59
4.4	Reihenfolge der verwendeten Methoden für die Modifikation des DR-Algorithmus	59
4.5	Zielverfolgungsergebnisse für zwei unterschiedliche Testpfade	60
4.6	Glättung des rekonstruierten Pfades durch Nachfilterung. Der Treppeneffekt im blauen Pfad (durchgezogene Linie) wurde unterdrückt, der resultierende Pfad (gestrichelte, rote Linie) nähert den tatsächlichen Pfad genauer an. . .	61
4.7	Histogramme der Abweichungen für die Experimente I und II bei der Rekonstruktion der Pfade aus Abbildung 4.5	62
5.1	Flussdiagramm des Korrekturalgorithmus	67
5.2	Wahrscheinlichkeitsmatrix, $\sigma(X, Y)$, die aktuell berechnete Position wurde auf $(0, 0)$ initialisiert	68
5.3	Etagenplan mit dem tatsächlichen und den mit den IMU-Systemen bestimmten Pfaden, Abtastraten 200 Hz und 10 Hz	70
5.4	Etagenplan mit dem tatsächlichen und den mit dem IMU-System bestimmten Pfaden, Abtastrate 15 Hz	71
5.5	Histogramme der Abweichungen für die Experimente I und II aus den Abbildungen 5.3 und 5.4	72
5.6	Luftdruck und Höhe über der Zeit für eine Bewegung vom Erdgeschoss in den ersten Stock	73
5.7	Berechnete Höhenänderung über der Zeit für eine Bewegung in horizontaler Richtung im Erdgeschoss	74
6.1	Mit einem Infrarot-Array-Sensor gemessenes Wärmebild eines Glases, das mit 37 °C warmem Wasser gefüllt ist	77
6.2	Infrarotbilder eines Probanden mit unterschiedlicher Kleidung	78
6.3	Pixelaufteilung des verwendeten Infrarot-Array-Sensors	80
6.4	Skizze einer Person, die das Blickfeld des Sensors einmal von der rechten Seite kommend durchquert hat und nach einigen Sekunden von links nach rechts zurückgegangen ist	80
6.5	Zeitabhängiges Pixelbild einer Person, die sich von der rechten zur linken Seite bewegt hat und nach einer kurzen Zeit von der linken zur rechten Seite zurückgegangen ist	80
6.6	Skizze von zwei Personen, die zeitgleich und in entgegengesetzter Richtung das Blickfeld des Sensors durchqueren	81
6.7	Pixeldarstellung über der Zeit des Szenarios in Abbildung 6.6	81
6.8	Szenario einer entgegenkommenden und einer vorausgehenden Person . . .	82
6.9	Pixeldarstellung über der Zeit des Szenarios in Abbildung 6.8 (a)	83
6.10	Pixeldarstellung über der Zeit des Szenarios in Abbildung 6.8 (b)	83
7.1	Veranschaulichung des Einflusses einer Person auf die Feldstärkeverteilung .	89

7.2	Veranschaulichung des Einflusses des Zielobjekts auf die Feldstärkeverteilung bei einer Verbindung zwischen ausgewählten Sensoren	92
7.3	Abdeckungsbereich der Sensoren	93
7.4	Auswirkung der Position des Zielobjektes auf die gemessene Feldstärke zwischen den unterschiedlichen Sensorpaaren.	94
7.5	Beispiel für die Verteilung der Entscheidungsparameter auf den Gitterquadraten der zentralen Spur	96
7.6	Beispiel für eine mögliche Gitterquadratmaske auf der Basis des EP	97
7.7	Beispiel für eine Region mit 3×3 Gitterquadraten, die die größte Anzahl von Vorkommnissen (Summe der Häufigkeit des Auftretens) aufweist	98
7.8	Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler für jedes Gitterquadrat	100
7.9	Die Verteilung der Lokalisierungsabweichungen für den schwellwertbasierten Ansatz mit altem (a) und aktualisiertem (b) Referenzdatensatz	100
8.1	Histogramme der Fehlerverteilung der Lokalisierungsergebnisse für den KNN-Algorithmus (a) und das SVM-Modell (b)	108
8.2	Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler für jedes Gitterquadrat, KNN-Algorithmus (a) und SVM-Modell (b)	109
8.3	Confusion Matrizen bestimmt durch Lokalisierung mit dem KNN-Algorithmus (a) und dem SVM-Modell (b)	110

Tabellenverzeichnis

2.1	Durchschnittliche Abweichung und Median des Lokalisierungsfehlers ermittelt durch 380 (95×4) Lokalisierungen im eingegrenzten Testgebiet	37
3.1	Kalibrieraufwand und Lokalisierungsgenauigkeit für die betrachteten Kalibrierverfahren	45
3.2	Prozentsatz der Fälle mit Lokalisierungsfehlern von maximal 0,75 m	51
4.1	Quantitative Ergebnisse von zwei Experimenten, die über eine Zeitspanne von 4 Wochen ohne erneute Kalibrierung mehrfach wiederholt wurden . . .	63
5.1	Statistische Angaben zum Ergebnis von Experiment I (Pfad in Abbildung 5.3) bei zehnfacher Wiederholung. N bezeichnet die Anzahl der Positionskordinaten, aus denen sich die Pfade zusammensetzten.	73
5.2	Statistische Angaben zum Ergebnis von Experiment II (Pfad in Abbildung 5.4) bei zehnfacher Wiederholung. N bezeichnet die Anzahl der Positionskordinaten, aus denen sich die Pfade zusammensetzten.	73
7.1	Durchschnittliche Abweichungen im 90 Perzentil beim Anwenden des schwellwertbasierten Ansatzes für das beschriebene Anwendungsszenario (40% ZS, 40% MS, 20% ÄS).	101
8.1	Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler im 90 Perzentil der drei untersuchten Methoden für das angewandte Testszenario (40% ZS, 40% MS, 20% ÄS). .	109

Abkürzungsverzeichnis

AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
BLE	Bluetooth Low Energy
BS	Basisstation
CCC	Close Cross Connections
CM	Confusion Matrix
CNN	Convolutional Neural Network
CSI	Channel State Information
DR	Dead-Reckoning
EP	Entscheidungsparameter
FCC	Federal Communications Commission
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRSA	Ground Reaction Sensor Array
HD	Hintergrunddaten
HF	High Frequency
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Indoor Navigation Systems
IoT	Internet of Things
IPS	Indoor Positioning Systems
IR	Infrarot
KNN	K-Nächste-Nachbar
LF	Low Frequency
MDP	Markov Decision Process
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-System
MS	Mobile Sensor
PCA	Principal Component Analysis
PRA	Pfadrekonstruktionsalgorithmen
PVM	Pfadverlustmodell
QR	Quick Response
RFID	Radio Frequency Identification
RSS	Received Signal Strength
RTI	Radio Tomographic Imaging
SMD	Surface Mounted Device
SNR	Signal-to-Noise Ratio

SVM	Support Vector Machine
TDoA	Time Difference of Arrival
TI	Texas Instruments
ToA	Time of Arrival
UHF	Ultra-High Frequency
US	Ultraschall
UWB	Ultra-Wideband
VGIT	Vollgitter-Test
WLAN	Wireless Local Area Network
WWDC	Worldwide Developers Conference

Symbolverzeichnis

γ	Signalausbreitungskonstante
δ_i	Toleranzwert
Δ	Differenzenquotient
μ	Faktor für die Normalisierung
σ	Wahrscheinlichkeitsmatrix
$\epsilon_i(t)$	Fehlermodell
Φ_τ	Matrix $\in \mathbb{R}^{n \times n}$
$\vec{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit $\in \mathbb{R}^n$
a_i	Reelle Zahl $\in \mathbb{N}$
b_i	Reelle Zahl $\in \mathbb{N}$
b^k	Steigung
c	Lichtgeschwindigkeit
$^\circ\text{C}$	Grad Celsius
dB	Dezibel
D	Abstand zwischen Basisstationen
d	Abstand zwischen mobilem Sensor und Basisstation
$\mathbf{e}'_i$	Fehlermodell
f	Frequenz
i	Diskreter skalarer Wert $\in \mathbb{N}$
j	Diskreter skalarer Wert $\in \mathbb{N}$
Hz	Hertz
P	Leistung oder Luftdruck
q_i	Vektor aus Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeit $\in \mathbb{R}^n$
R	Feldstärke
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$\mathbb{Z}$	Menge der ganzen Zahlen
$\mathbb{C}$	Menge der komplexen Zahlen
$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen, inklusive 0
$\vec{r}$	Positionsvektor
$\vec{v}$	Geschwindigkeitsvektor
$\mathbf{V}$	Vandermondematrix $\in \mathbb{R}^{n \times 2}$
w	Gewichtungsfaktor $\in (0, 1]$
r	$(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$