Lokalisierung mit Magnetfeldern : ein robustes Positionierungssystem für Indoor-Szenarien

Autor(en): **Blankenbach, J. / Norrdine, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio**

Band (Jahr): **112 (2014)**

Heft 6

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-389497

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Lokalisierung mit Magnetfeldern

Ein robustes Positionierungssystem für Indoor-Szenarien

Im vorliegenden Beitrag wird ein auf künstlichen Magnetfeldern basierendes lokales Positionierungssystem vorgestellt. Da magnetische Signale beliebige Baumaterialien ohne Signalausbreitungsfehler durchdringen können, ist das System vor allem für die Indoor-Positionierung geeignet. Untersuchungen mit einem Experimentalsystem für den Labormassstab zeigen dabei, dass eine 3D-Positionsbestimmung mit Genauigkeiten im Zentimeter- bis Dezimeterbereich auch bei NLoS-Bedingungen im Innenraum möglich ist.

Dans le présent article on présente un système local de positionnement basé sur des champs magnétiques artificiels. Etant donné que les signaux magnétiques peuvent transpercer n'importe quels matériaux de construction ce système se prête particulièrement bien pour le positionnement intérieur. Des recherches avec un système expérimental à l'échelle du laboratoire ont démontré qu'une détermination 3D est possible à l'intérieur d'un local avec une précision du cm ou dm aussi lors de conditions NLoS (hors ligne de visée).

In quest'articolo si presenta un sistema di posizionamento locale basato su campi magnetici artificiali. Il sistema si addice, in particolare, al posizionamento indoor poiché i segnali magnetici riescono a penetrare tutti i materiali da costruzione senza errore di propagazione dell'errore. Le ricerche con un sistema sperimentale per la scala in laboratorio dimostrano che in uno spazio interno è possibile una determinazione della posizione 3D con precisioni che si muovono tra il centimetro e il decimetro anche in condizioni NLOS

J. Blankenbach, A. Norrdine

1. Einleitung

Seit einigen Jahren wird weltweit intensiv an Systemen zur automatischen Positionsbestimmung in überbauten Arealen (Indoor-Positionierung) geforscht. Der Grund dafür sind zahlreiche neue Anwendungen, von der Personenortung (z.B. Rettungskräfte) über die Logistik (z.B. Waren- und Objektverfolgung) bis hin zu Ingenieuraufgaben (z.B. Baudokumentation), die eine Positionierung im Innenraum erforderlich machen. Globale, satellitengestützte Positionierungssysteme scheiden hierfür aufgrund der unzureichenden Nutzbarkeit der Satellitensignale innerhalb von Bauwerken in der Regel aus. Eine Lösung stellen lokale Positionierungssysteme dar, wobei viele existierende Ansätze infrastrukturgestützt, bestehend aus Referenz- und Mobilstationen, sind. Dabei werden elektromagnetische oder akustische Signale zwischen Referenzstationen und Mobilstation auf der Basis von drahtlosen Technologien aktiv ausgetauscht, um die unbekannte Position zu ermitteln.
Grundsätzlich ergeben sich bei der Verwendung von aktiven Systemen jedoch Probleme bei der Signalausbreitung aufgrund der geringen Reichweite der zugrundeliegenden Basistechnologie, der fehlenden direkten Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfängereinheiten sowie der Bauwerksstruktur (z.B. Wände, Decken). Neben Abschattungen kommt es dabei häufig zu Signalausbreitungsfehlern, wie Dämpfung, Laufzeitverzögerungen und Mehrwegeffekten. Ein weiteres Manko vieler Systeme ist die Beschränkung auf die 2D-Positionierung sowie der vergleichsweise hohe Aufwand für die Administration und Steuerung zur Teilnahme des Nutzers am System.

2. MILPS – Magnetic Indoor Local Positioning System

2.1 Architektur

MILPS (Magnetic Indoor Local Positioning System) basiert auf der Idee, ein Positionierungssystem für den Innenbereich auf der Basis künstlicher, durch Spulen erzeugter Magnetfelder aufzubauen. Im Gegensatz zu den existierenden Positionierungssystemen sind magnetische Sig-

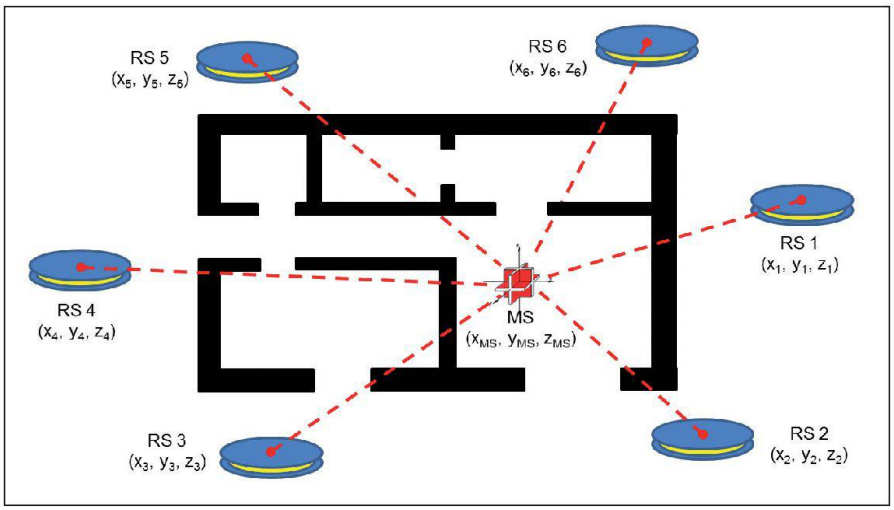


Abb. 1: MILPS-Systemarchitektur.

nale in der Lage, Baumaterialien ohne die oben genannten Effekte zu durchdringen, so dass die Positionsbestimmung nicht negativ durch Signalausbreitungsfehler beeinflusst wird. Ferner vereinfacht die Verwendung von Magnetfeldern den Zugriff auf das System, da weder spezielle Kommunikationsprotokolle noch eine Benutzerverwaltung erforderlich sind.
Die Systemarchitektur von MILPS sieht die Verwendung von mehreren räumlich verteilten Spulen als Magnetfeldquelle vor, so dass das gesamte Bauwerk bzw. alle relevanten Bereiche abgedeckt werden können. Die Spulen dienen damit als Referenzstationen in einem lokalen Bauwerkskoordinatensystem. Mit Hilfe eines Magnetfeldsensors als Mobilstation werden die erzeugten Spulenmagnetfelder im unbekannten Punkt beobachtet (Abb. 1). Aus den Magnetfeldbeobachtungen können anschliessend geometrische Informationen – vor allem Distanzen – zwischen der Mobil- und den Referenzstationen abgeleitet und für die Schätzung der unbekannten Position herangezogen werden.

2.2 Magnetfeldtheorie

Die Gesamtinduktion B des Magnetfeldes einer Spule mit dem Radius r_0 – im Folgenden als Feldstärke bezeichnet – kann in einem Punkt P näherungsweise wie folgt ausgedrückt werden (vgl. Lehner 2006):

$$B = \frac{\mu_0 NIF}{4\pi r^3}\sqrt{1+3\sin^2\theta} \qquad (1)$$

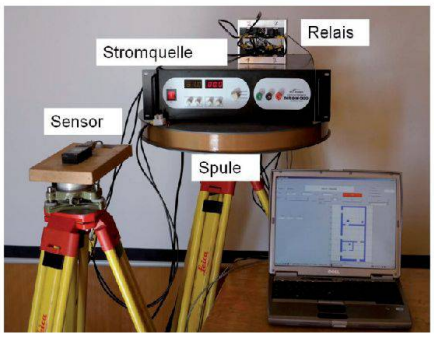


Abb. 2: Experimentalsystem mit dreiachsigem Magnetfeldsensor, einer Spule (r_0 = 0,25 m; N = 140) inkl. Relais, Labornetzteil sowie Messrechner.

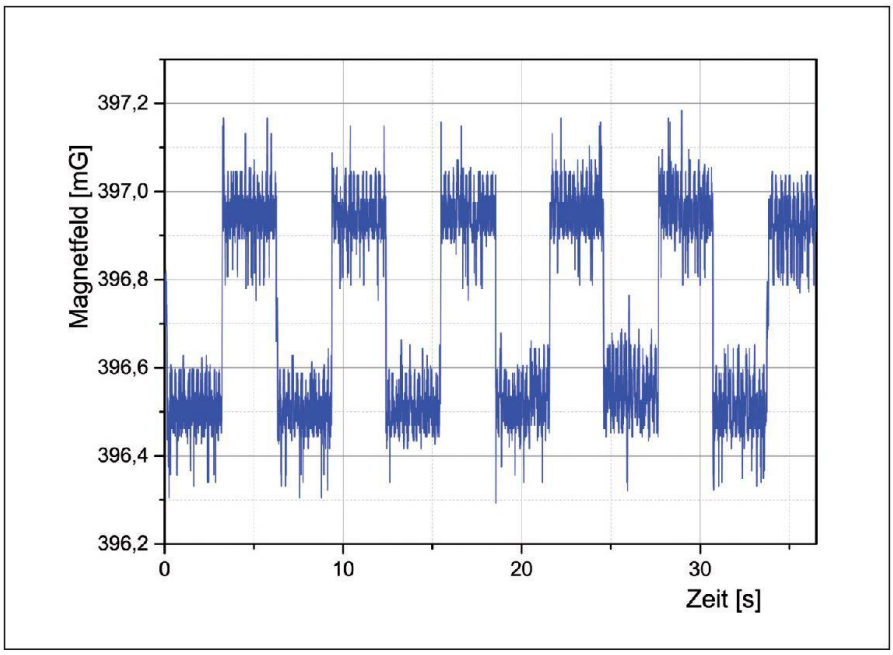


Abb. 3: Aufgezeichnetes Spulensignal (I = 12 A) bei 12 m Entfernung.

Dabei ist θ der Elevationswinkel bezogen auf die Spulenebene und r der euklidische Abstand von P zum Spulenzentrum. Mit $F = \pi\ r_0^2$ wird die Querschnittfläche der Spule berechnet, μ_0 stellt die magnetische Permeabilität da. I beschreibt den Kreisstrom und N die Spulenwindungszahl.

2.3 Experimentalsystem

Auf der Grundlage von vorangehenden Simulationen wurde ein Experimentalsystem im Labormassstab bestehend aus drei Spulen (r_0 = 0,25 m; N = 140) gefertigt. Bei der Auswahl der Spulenparameter wurden einerseits die zu erreichende Reichweite zwischen Sensor und Spule (~15–20 m) unter Berücksichtigung der Sensitivität kommerzieller Magnetfeldsensoren zu Grunde gelegt. Andererseits wurden pragmatische Überlegungen bezüglich der Abmessungen, dem Gewicht sowie der maximalen Stromstärke der Spulen angestrengt. Als Mobilstation wird insbesondere ein industrieller 3-achsiger magnetoresistiver Sensor (Messbereich: +/- 2 G; Auflösung in jeder Achse: 27 µG) eingesetzt. Das für die empirischen Untersuchungen verwendete Setup ist in Abbildung 2 dargestellt.

3. Messprinzip und Signalverarbeitung

Da die Spulensignale von diversen Interferenzfeldern (z.B. Erdmagnetfeld, Niederspannungsnetz im Gebäude) überlagert werden, kommt der Signalerzeugung und -verarbeitung eine besondere Bedeutung bei der Realisierung von MILPS zu.
Zur Unterdrückung langperiodischer Störfelder – insbesondere des Erdmagnetfeldes – wurde ein differentielles Messprinzip entwickelt. Mit Hilfe der Relaiseinheit wird dabei die Stromrichtung zwischen den Einzelmessungen periodisch umgepolt (Abb. 3). Durch Differenzbildung zwischen den Messwerten jeweils aufeinanderfolgender Umschaltungen, können die überlagerten langwelligen Störfelder mit einer Grenzfrequenz, die der Umschaltfrequenz entspricht, gefiltert werden.
Neben der Modulation durch die Umschaltung enthält das Messsignal kurzperiodische Rauschanteile, die von weiteren künstlich erzeugten Magnetfeldern im Innenbereich (z.B. von elektrischen Verbrauchern) resultieren. Zur Filterung dieser hochfrequenten Störfelder werden zusätzlich FIR-Tiefpassfilter eingesetzt (vgl. Blankenbach et al. 2011).

Da innerhalb von Gebäuden auch instationäre Störfelder auftreten, wurde zusätzlich der Einsatz adaptiver Filter untersucht. Dabei werden die Spulensignale von einem Referenzsensor an einer bekannten Position erfasst, so dass durch Vergleich des idealen mit dem aufgezeichneten Signal adaptiv ein Störsignal berechnet und in Echtzeit am Messsensor berücksichtigt werden kann (vgl. Blankenbach et al. 2011).

4. Evaluierung des Experimentalsystems

Zur Evaluierung des Experimentalsystems wurden praktische Messversuche in realen Messumgebungen durchgeführt. Hieraus resultierte u.a. eine für die Experimente in der Laborumgebung in der Regel verwendete Stromstärke von 12 A.
Reichweitenuntersuchungen bestätigten die unverfälschte Signaldurchdringung von Baumaterialien, so dass die Spulensignale bis zu einer Distanz von ca. 16 m (mit I = 12 A) zwischen Spule und Sensor auch bei fehlender direkter Sichtverbindung (None Line of Sight, NLoS) detektiert werden können (vgl. Blankenbach et al. 2011).
Neben der Reichweite wurden Genauigkeitsuntersuchungen zunächst für den 2D-Fall (d.h. Spule und Sensor befinden sich in einer Horizontalebene) durchgeführt. Der Soll-Ist-Vergleich mit bekannten Strecken ergab für den Nahbereich maximale Abweichungen von ca. 40 cm bei ungefilterten Messungen und ca. 20 cm bei adaptiver Filterung. Für den Fernbereich bis 15 m betragen die Abweichungen im Maximum 80 cm (ungefiltert) und 40 cm bei adaptiver Filterung (vgl. Blankenbach & Norrdine 2013). Eine genauere Betrachtung der Ergebnisse zeigt dabei einen systematischen Anstieg der Abweichungen in Abhängigkeit von der Distanz. Nach der Durchführung von Kalibriermessungen in einer störungsfreien Umgebung und Schätzung einer Kalibrierfunktion für jede Spule, konnte der Einfluss der Systematik für die 2D-Distanzermittlung signifikant reduziert werden: nach Kalibrierung lagen die Distanzabweichungen über den gesamten Distanzbereich im Mittel deutlich unter 10 cm (Blankenbach et al. 2014).
In Folgeuntersuchungen wurde die Rotationssymmetrie der Spulen durch Messung in unterschiedlicher horizontaler Ausrichtung überprüft. Hierbei zeigten sich Abweichungen von wenigen Millimetern vom Mittelwert, welche aufgrund des erreichbaren Genauigkeitsniveaus vernachlässigt werden können.

5. Positionierung

5.1 Positionsschätzung

Befindet sich der Magnetfeldsensor (annähernd) in der Spulenebene, so ist die gemessene Feldstärke B ausschliesslich abhängig von der Distanz r zwischen Sensor und Spulenzentrum. Werden die Spulen zudem horizontal ausgerichtet, können aus den beobachteten Feldstärken B_i zu wenigstens drei Spulen mit den Koordinaten x_i, y_i die Horizontaldistanzen $r_{MS,i}$ bestimmt werden. Daraus folgt die 2D-Position des Sensors (x_{MS}, y_{MS}) über einen überbestimmten Bogenschlag durch eine kleinste-Quadrate-Schätzung mit den Beobachtungsgleichungen

$$r_{MS,i} = \sqrt{(x_{MS} - x_i)^2 + (y_{MS} - y_i)^2} \quad (2)$$

Für die 3D-Positionsschätzung werden die Beobachtungsgleichungen (Gl. 2) um die dritte Dimension erweitert. Zur Ableitung der Raumstrecken müssen jedoch im Gegensatz zum horizontalen Fall die Elevationswinkel θ_i bekannt sein oder mitgeschätzt werden (vgl. Gl. 1). Letztgenanntes erfolgt indirekt durch ein iteratives Verfahren. Dabei wird ausgehend von der Annahme $\theta_i = 0$ eine 3D-Position mit einer direkten Lösung des räumlichen Bogenschlags (z.B. Singer et al. 1993) geschätzt. Basierend auf der erhaltenen Lösung werden die Elevationswinkel θ_i mit den bekannten Spulenpositionen rechnerisch bestimmt und neue Distanzen $r_{MS,i}$ als Beobachtungen für den nächsten Iterationsschritt berechnet. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt bis keine signifikante Änderung in der Positionslösung feststellbar ist (vgl. Blankenbach et al. 2014).

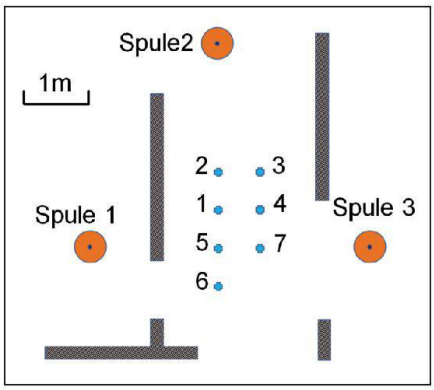


Abb. 4: Spulen- und Sensoranordnung in einem Messexperiment zur 3D-Positionierung.

5.2 Positionierungsexperimente

Zur empirischen Untersuchung der Positionsschätzung wurden 2D/3D-Positionierungsexperimente durchgeführt.
Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Konfiguration mit 7 Roverpositionen in einem Testfeld von 4x4x3 m³ für ein Messexperiment mit dem industriellen Magnetfeldsensor und mit zwei Smartphones mit eingebetteten low-cost Sensoren. Die Soll-Koordinaten der Testfeldpositionen (Referenz- und Roverpunkte) wurden tachymetrisch in einem lokalen Bauwerkskoordinatensystem bestimmt.
Zur Ermittlung der erreichbaren (äusseren) Genauigkeit wurde auf jeder Roverposition statisch sequentiell zu allen drei Spulen gemessen. Je Standpunkt wurden die Signale aus acht Umschaltungen (Umschaltfrequenz: 0,33 Hz) pro Spule mit aufgezeichnet. Durch Differenzbildung der Beobachtungsmittelwerte jeweils aufeinanderfolgender Umschaltungen (vgl. Abschnitt 3) wurden somit sieben Einzeldistanzen pro Spule abgeleitet und anschliessend gemittelt. Die gemittelte Distanz für jede Spule wurde anschliessend zur Positionsberechnung verwendet. In Tabelle 1 sind die Abweichungen zwischen den Soll-Koordinaten und den mit MILPS geschätzten Koordinaten dargestellt. In den Lagekomponenten zeigen sich Abweichungen von (im Mittel) deutlich unter 10 cm mit dem industriellen

	HMR2300			iPhone 4			Samsung Galaxy Nexus		
Position	dX [cm]	dY [cm]	dZ [cm]	dX [cm]	dY [cm]	dZ [cm]	dX [cm]	dY [cm]	dZ [cm]
1	-2,5	-0,1	-19,0	-3,2	-2,0	45,7	9,0	-8,6	-141,3
2	-3,4	0,0	11,4	1,8	-12,3	-82,0	6,9	-26,3	-129,9
3	-4,5	-2,7	-14,5	-5,5	-4,1	-44,5	-1,8	-20,4	-119,0
4	-4,3	-0,9	13,5	-5,7	0,4	45,0	-13,4	0,3	96,3
5	-3,1	-0,5	9,8	-3,1	2,8	61,7	10,3	-11,3	-143,2
6	-0,8	-6,4	-99,6	5,2	-13,5	-131,4	11,6	10,5	-141,6
7	9,5	-8,0	-56,5	-9,6	-3,3	51,7	-12,0	8,3	81,5

Tab. 1: Abweichungen der geschätzten Koordinaten gegenüber bekannten Soll-Koordinaten in einem Messversuch.

Sensor und unter 30 cm mit den Smartphones (ohne adaptive Filterung). Die grösseren Abweichungen in der Z-Komponente sind der ungünstigen geometrischen Konfiguration geschuldet, da sich Spulen und Referenzsensor zur Anwendung des 2D-Kalibrieransatzes (vgl. Abschnitt 4) annähernd in einer Horizontalebene befanden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass auf Basis von künstlich erzeugten Magnetfeldern die 3D-Position eines Nutzers oder Objektes im Gebäude selbst bei NLoS-Bedingungen bestimmt werden kann. Mit dem entwickelten Experimentalsystem für den Labormassstab können bereits 3D-Positionierungsgenauigkeiten von deutlich unter 1 m, bei Distanzen bis 8 m sogar deutlich unter 0,5 m, erreicht werden. Durch Kalibrierung sowie adaptive Filterung lässt sich die Genauigkeit weiter steigern, was für den 2D-Fall bereits gezeigt werden konnte. Auch die in heutigen Smartphones eingebetteten Magnetfeldsensoren lassen sich als Mobilstation verwenden, wobei aufgrund der geringeren Auflösung der low-cost Sensoren die Reichweite des Systems reduziert ist.

Ausgehend vom Experimentalsystem wurde eine Spule mit einem Spulenwindungsdurchmesser von 1 m angefertigt, die zudem die Verwendung von höheren Stromstärken erlaubt. Messungen mit drei- bis vierfacher Stromstärke gegenüber dem obigen Experimentalsystem ermöglichten eine deutliche Erhöhung der Reichweite auf über 40 m bei NLoS-Bedingungen. Dadurch wird es möglich, ein Gebäude mit einer geringen Anzahl von Spulen vollständig abzudecken.

Derzeit werden Weiterentwicklungen, vor allem Kalibrieruntersuchungen zur Verbesserung der 3D-Positionierungsgenauigkeit, Verfeinerungen des Positionierungsalgorithmus sowie Untersuchungen zur kinematischen Anwendung von MILPS durch Fusion mit Inertialsensorik (vgl. Hellmers et al. 2013) (Real Ehrlich & Blankenbach 2014) durchgeführt.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes mit dem Kennzeichen BL 1092/1-1 (www.gia.rwth-aachen.de/IndoorPositionierung_MILPS/).

Literatur:

Lehner, G. (2006): Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker. 5. Auflage. Springer-Verlag, Berlin.

Blankenbach, J.; Norrdine, A. & Hellmers, H. (2011): Adaptive Signal Processing for a Magnetic Indoor Positioning System. Proc. of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Guamães, Portugal.

Hellmers, H.; Norrdine, A.; Blankenbach, J. & Eichhorn, A. (2013): An IMU/Magnetometer-Based Indoor-Positioning System Using Kalman Filtering. Proc. of the 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Montbeliard, France.

Blankenbach, J.; Norrdine, A. & Hellmers, H. (2014): Magnetic Indoor Local Positioning System – Ein robustes 3D-Positionierungssystem für Innenraumumgebungen. In Wieser (Hrsg.): Ingenieurvermessung 14 – Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs. Wichmann, 2014, Heidelberg.

Real Ehrlich, C. & Blankenbach, J. (2014): Innenraumpositionierung für Fussgänger unter Verwendung eines Smartphone. In Kolbe/Bill/Donaubauer (Hrsg.): Geoinformationssystem 2014 – Beiträge zur 1. Münchner GI-Runde. Wichmann, 2014, Heidelberg.

Singer, P.; Ströbel, D.; Hördt, R.; Bahndorf J. & Linkwitz, K. (1993): Direkte Lösung des räumlichen Bogenschnitts. ZfV, Heft 01/93.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach
Dr.-Ing. Abdelmoumen Norrdine
RWTH Aachen University
Geodätisches Institut
Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme
Templergraben 55
DE-52062 Aachen
blankenbach@gia.rwth-aachen.de
norrdine@gia.rwth-aachen.de