

IMU/UWB Sensorfusion für die Indoor-Positionierung von fahrbaren Plattformen

Hendrik Hellmers, Nicolas Diefenbach und Andreas Eichhorn

Zusammenfassung

Zur Positionsbestimmung beweglicher Objekte in überbauten Arealen existieren bereits kommerzielle Systeme auf Basis verschiedener Signalarten. Neben der Ortung durch WLAN, Infrarot oder Bluetooth bestehen dabei auch Lösungen mittels Ultra Wide Band (UWB). Aufgrund von Signalabschattung sind jedoch – analog zur Positionsbestimmung mit GNSS – direkte Sichtverbindungen zwischen Sender und Empfänger notwendig, was die Lokalisierung in unübersichtlichen Innenraumumgebungen nur durch Sensorfusion möglich macht. Zur komplementären Ergänzung der oben genannten Technologien auf Basis der Beobachtung absoluter Geometrie eignen sich Inertialsensoren. Diese präzisieren Position, Geschwindigkeit und Orientierung autonom mit hoher Frequenz. Aufgrund von Sensordrifts und Integrationsfehlern ist jedoch für einen Langzeiteinsatz die Stützung mit einem externen System notwendig.

In diesem Beitrag wird die Integration einer Inertial Measurement Unit (IMU) mit einem kommerziellen UWB-System zur Indoor-Positionierung einer fahrbaren Plattform beschrieben. Angestrebt wird dabei eine Genauigkeit von unter einem Meter.

Summary

For realising positioning of moving objects inside overbuilt areas, several approaches exist, based on WLAN, infrared, Bluetooth or ultra wide band (UWB). However, because of multipath fading and attenuation only line-of-sight (LoS) scenarios between emitter and receiver can be realized. Focusing on localisation in unclear areas, integration of several sensors is necessary. Therefore, an inertial sensor predicts high-frequency position, velocity and orientation. However, because of sensor drifts and integration errors the prediction has to be supported by an external system. This contribution focuses on IMU/UWB sensor fusion for localisation of a wheeled platform inside built-over areas.

Schlüsselwörter: Indoor-Positionierung, Ultra Wide Band, IMU, Iterativer Kalman Filter

dem die Lokalisation von fahrbaren Objekten Gegenstand der Forschung. Die Möglichkeit über das Global Navigation Satellite System (GNSS) Ortung und Navigation von Fahrzeugen im Außenbereich zu realisieren, lässt sich jedoch nicht auf den Innenraum übertragen, da hier die entsprechenden Signale aufgrund von Abschattung nicht empfangen werden. Anwendungsgebiete der Indoor-Positionierung für rollende Plattformen ergeben sich zum Beispiel durch die Objektverfolgung in der Lagerlogistik, der Lokalisierung von Mobile Mapping Systemen oder die Positionierung von Robotern in Rettungsszenarien. Die bereits auf dem Markt befindlichen Systeme (Mautz 2012) – basierend auf RFID (Zou 2013), Infrarot (Lee 2004), Ultraschall (Holm 2012) oder UWB (Ascher 2011) – werden jedoch durch Mehrwegeeffekte und Signalabschattungen beeinflusst, sodass in der Regel ausschließlich Applikationen mit direkter Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger bedient werden können.

Diese Line-of-Sight (LoS) Szenarien zielen daher nur auf die Lokalisierung in großen Hallen oder Fabriken ab. Um jedoch weitere Anwendungen zu erschließen – in diesem Fall die Positionierung in unübersichtlichen Indoor-Umgebungen – erfolgt die Positionierung durch Integration einer autonomen inertialen Messeinheit, gestützt durch ein kommerzielles, auf UWB basierendes, Indoor-Positionierungssystem. Obwohl die eigentliche Anwendung dieses Systems auf die Lokalisierung in weitläufigen Industriehallen abzielt, dient es in diesem Fall der Stützung einer durch die Inertialsensoren prädiszierten Lösung. Die Auswertung der erfassten Daten erfolgt dabei nach den Methoden der Kalman-Filterung, die eine varianzbasierte Gewichtung der Messdaten beider Systeme vornimmt und somit zu jedem diskreten Zeitpunkt eine erwartungstreue Schätzung des Zustands realisiert.

Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung eines auf dem Markt existierenden Positionierungssystems auf komplexere Umgebungen zu erweitern, in denen die geforderten geometrischen Bedingungen zwischen Sender und Empfänger nicht gegeben sind.

1 Einleitung

Mit dem Aufkommen immer handlicher werdender Sensorsysteme zur Erfassung der Umwelt stieg in den vergangenen Jahren das Verlangen nach modernen Applikationen, die auf standortbezogenen Daten beruhen. Bei diesen sogenannten Location Based Services (LBS) ist neben der Positionsbestimmung von Fußgängern außer-

2 Verwendete Sensorik

Neben dem Indoor-Positionierungssystem der Firma Ubisense, welches auf Grundlage von im GHz-Bereich arbeitenden elektromagnetischen Wellen arbeitet, wurde in dieser Arbeit eine 10 Degree-of-Freedom (DoF) MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) IMU verwendet. Diese beinhaltet, neben einem dreiaxialen Magnetometer,

Beschleunigungssensor und Gyroskop außerdem einen Drucksensor.

2.1 10 DoF MEMS IMU ADIS 16480

Zur Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Orientierung – was im weiteren Verlauf als Zustand bezeichnet wird – wurde die *ADIS 16480* der Firma Analog Devices verwendet, welche Beschleunigungen, Drehraten und magnetische Flussdichte in allen drei Achsen, sowie den atmosphärischen Druck bis zu einer Abtastfrequenz von 2,4 kHz erfasst. Da der Sensor werkskalibriert ist,

Tab. 1: Eigenschaften ADIS 16480

	Beschleunigung [g]	Kreisel [°/s]	Druck [mbar]
Messbereich	-10 bis 10	-450 bis 450	300 bis 1100
Auflösung	$1,221 \cdot 10^{-8}$	$3,05 \cdot 10^{-7}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$
Ausgangsrauschen	0,0015	0,16	0,025

wurde keine vorangeschaltete Kalibrierung vorgenommen. Die Tab. 1 zeigt eine Zusammenstellung der Sensoreigenschaften dieser inertialen Messeinheit (Analog Devices).

Die hohe Abtastrate führt zu einer hochfrequenten Lösung des aktuellen Zustands (Prädiktion). Aufgrund von Sensordrifts und auftretenden Modellfehlern ist diese Lösung jedoch nicht langzeitstabil. Abweichungen von mehreren Metern nach einigen Sekunden sind möglich, was eine Positionsstützung notwendig macht.

2.2 UBISENSE Precise Real-time Location

Zur Stützung der Prädiktion wurde das Echtzeit-Positionierungssystem der Firma UBISENSE verwendet, welches dreidimensionale Koordinaten des zu positionierenden Objektes liefert. Neben den errechneten Objektkoordinaten in einem lokalen Koordinatensystem lassen sich auch die Rohmessungen, bestehend aus Azimut- und Elevationswinkeln (Angle of Arrival) sowie Zeitdifferenzen der ankommenden Signalfont (Time Difference of Arrival), auslesen. Die Auswertung erfolgt dann nach den Methoden der Kalman-Filterung (Kap. 5.4).

Das System besteht aus insgesamt zehn UWB-Sensoren, welche jeweils aus einem Antennen-Array aufgebaut sind. Als Signalgeber dient ein aktiver UWB-Chip (Tag), der elektromagnetische Signale mit einem Frequenzspektrum von 3,1 bis 10,6 GHz aussendet und somit von den Sensoren detektiert werden kann (Ubisense 2012). Abb. 1 zeigt schemenhaft die geometrischen Beziehungen zwischen diesem, auf dem bewegten Objekt befindlichen, UWB-Tag T_1 und zwei UWB-Sensoren S_1 und S_2 .

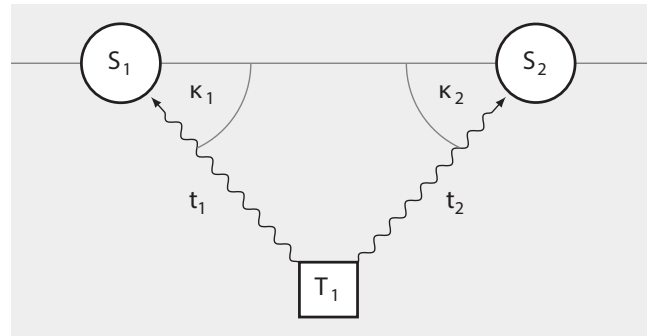


Abb. 1: Azimut- und Zeitmessung

Über die ankommende Signalfont am Antennen-Array kann auf das Azimut κ und den Elevationswinkel φ geschlossen werden. Die Signallaufzeiten vom Sender zu zwei oder mehreren Empfängern liefern außerdem eine Laufzeitdifferenzmessung dt mit:

$$dt = t_2 - t_1 \quad (1)$$

Nach der Datenaufnahme können diese erfassten Rohdaten tabellarisch ausgelesen werden, um sie im Postprocessing zu verarbeiten. Eine dreidimensionale Positionierung mittels UWB kann dabei nur realisiert werden, wenn Sichtverbindung zu mindestens zwei Sensoren besteht. Aufgrund der Datenverarbeitung mittels Sensorfusion ist jedoch für die Zustandsstützung die Sicht zu einem Sensor ausreichend.

3 Testumgebung

Die Positionierung einer fahrbaren Plattform wurde im Gebäude des Instituts für Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Als rollendes Objekt diente ein umgebautes Modellauto, das sich mit einer Fernsteuerung frei bewegen lässt. Neben der IMU und einem UWB-Tag ist das Fahrzeug außerdem mit einer Handkamera ausgestattet, mit der die Synchronisierung zwischen IMU und UWB-System durchgeführt wird (Abb. 2).

Des Weiteren wurde ein lokales Koordinatensystem realisiert, in dem sowohl die UWB-Sensoren als auch ver-

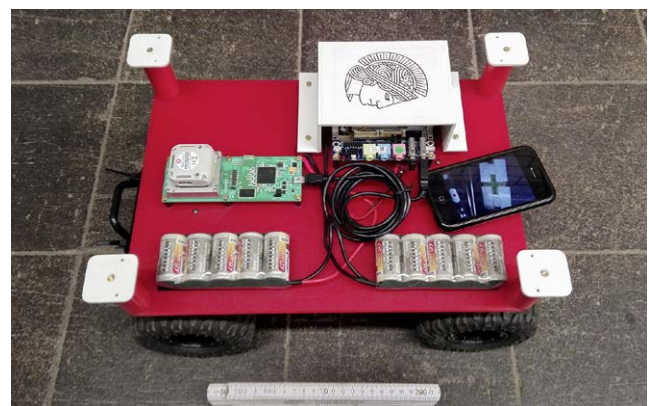


Abb. 2: Fahrbare Plattform inklusive Sensoren

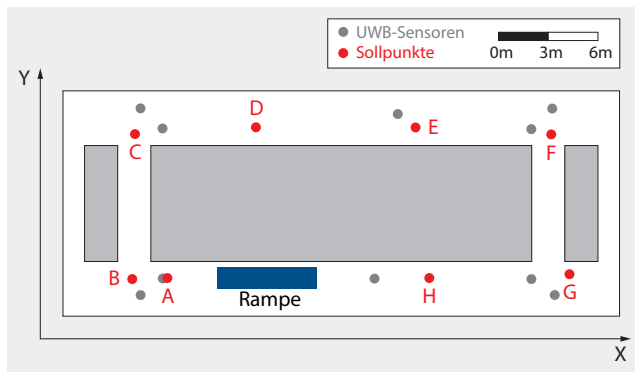


Abb. 3: Grundriss der Testumgebung

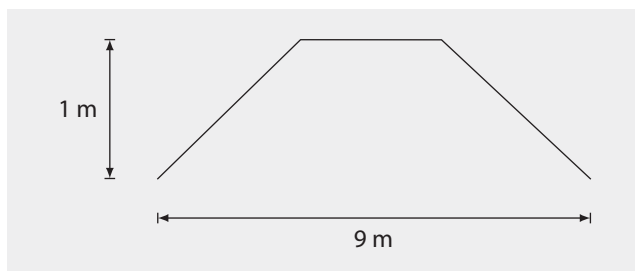


Abb. 4: Aufriss der Rampe

schiedene Sollpunkte auf dem Boden koordinatenmäßig bekannt sind. Die Einmessung erfolgte tachymetrisch. Abb. 3 zeigt skizzenhaft den Grundriss dieser Indoor-Umgebung im Gebäude inklusive UWB-Sensoren und Sollpunkte. Die grauen Flächen beschreiben unzugängliche Stellen.

Um die Testumgebung auf die dritte Dimension auszuweiten, befand sich zwischen den Punkten A und H eine Rampe mit einer Höhe von einem Meter, die über zwei Schrägen befahren werden konnte (Abb. 4).

4 Datenaufnahme

Die fahrbare Plattform (Abb. 2) wurde im Uhrzeigersinn entlang des Testfeldes über die Sollpunkte A bis H bewegt. Mit Hilfe der Handykamera konnten dann im Postprocessing die genauen Zeiten bei entsprechenden Überfahrten registriert werden, was einen Soll-Ist-Vergleich (Abschnitt 6.2) ermöglichte. Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 1,5 m/s wurden dabei zwei Runden (etwa 180 m) zurückgelegt.

In den Abschnitten 4.1 bis 4.3 werden die Datenaufnahme der verschiedenen Sensoren und die zeitliche Synchronisierung beschrieben.

4.1 Smartphone Kamera

Mit der Kamera des an der Fahrzeugrückseite angebrachten Smartphones wurde die Fahrt gefilmt, sodass überfahrene Sollpunkte im Film detektiert werden konnten. Da außerdem die UWB-Datenaufnahme durch einen se-

paraten Laptop durchgeführt wurde, konnte des Weiteren eine Synchronisierung von UWB und IMU erfolgen.

Verwendet wurde dabei das iPhone 1, welches bei guter Beleuchtung Filme mit einer Framerate von 30 fps (Frames per second) aufnimmt, was einem Zeitversatz zwischen zwei Bildern von $\Delta t_{\text{Film}} = 0,033 \text{ s}$ entspricht (Apple). Mit dem frei zugänglichen Videoeditor Avidemux 2.6 (Fixounet 2009) konnten die einzelnen Bilder nach Beendigung zeitlich zugeordnet werden. Die Genauigkeit entspricht hierbei genau dem Zeitversatz, der sich aus der Framerate ergibt.

4.1.1 Synchronisierung

Die Synchronisierung anhand des Handyfilmes erfolgte über Referenzbeobachtungen, die vor und nach der eigentlichen Datenaufnahme vorgenommen wurden. Die mitgelieferte Software der Firma Ubisense visualisiert grafisch einzelne UWB-Messungen und ordnet diese intern einem bestimmten Zeitstempel zu. Diese werden – in Abhängigkeit einer vorher definierten Messfrequenz – auf der grafischen Benutzeroberfläche angezeigt. Die Bildschirmanzeige wird dann mit der Smartphone-Kamera gefilmt, sodass sich die vom UWB-System vergebenen Zeitstempel entsprechenden Zeitpunkten im Film zuordnen lassen.

Über eine Interpolation zwischen zwei Kamerabildern kann dabei eine einzelne Zeitregistrierung mit einer zeitlichen Auflösung von $\frac{\Delta t_{\text{Film}}}{2} = \pm 0,017 \text{ s}$ durchgeführt werden, wenn man davon ausgeht, dass ein Ereignis zwischen zwei Frames eingetreten ist. Somit lässt sich im Postprocessing jeder UWB-Zeitstempel einem entsprechenden Zeitpunkt im Film zuordnen. Dieses Vorgehen wurde einmal vor und einmal nach der eigentlichen Messfahrt durchgeführt um außerdem einen linearen Uhrendrift zwischen UWB- und Kamerauhr zu ermitteln.

Nach dem Beobachten dieser UWB-Messungen mit der Kamera erfolgte die Anbringung auf der Rückseite des Fahrzeugs. Der Film lief dabei weiter. Da das Modellauto am Startpunkt in Ruhe war, um dann für die Fahrt beschleunigt zu werden, kann das Bild mit der ersten Fahrzeugbewegung im Film zeitlich referenziert werden. Auch hier lässt sich durch Interpolation eine Auflösung von 0,017 s erreichen. Zum Zeitpunkt der ersten Fahrzeug-

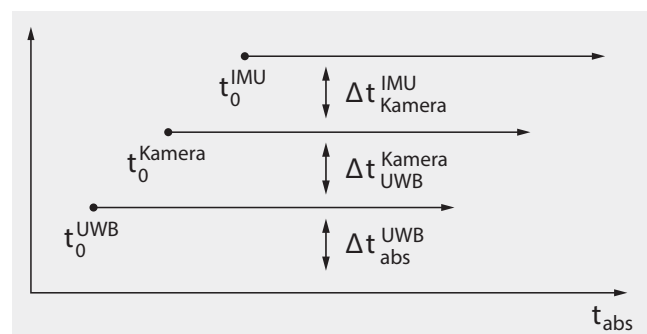


Abb. 5: Synchronisierung von Kamera, UWB und IMU

bewegung ergibt sich außerdem ein signifikanter Ausschlag im Beschleunigungssignal. Dieser Peak wurde im Postprocessing der entsprechenden Filmzeit zugeordnet. Nimmt man diese Peakdetektion beim Startvorgang vor der Fahrt und beim Bremsvorgang nach der Messfahrt vor, kann auch hier ein Drift zwischen Kamera- und IMU-Uhr ermittelt und angebracht werden. Abb. 5 zeigt die Synchronisierung der verschiedenen Sensoren.

Unter der Annahme einer maximalen Abweichung von etwa 0,02 s bei der Synchronisierung ergibt sich bei den auftretenden Geschwindigkeiten eine 1σ -Genauigkeit in der Position von etwa 2 bis 3 cm, was im stochastischen Modell der Kalman-Filterung berücksichtigt werden kann.

4.1.2 Solltrajektorie

Neben der Synchronisation wird der Handyfilm außerdem für die Ermittlung der Solltrajektorie verwendet. Während der Fahrt wurde das Auto über die Bodenpunkte A–H bewegt, sodass diese im Film detektiert werden können. Da dadurch die Punkte zeitlich zugeordnet und koordinatenmäßig bekannt sind, kann an diesen Stellen ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden. Dieser Vergleich zwischen IMU/UWB Trajektorie mit der entsprechenden Sollkoordinate erfolgt wiederum mit einer Abweichung von 2 bis 3 cm.

Im Vergleich zu einem zielverfolgenden Tachymeter umgeht man somit Probleme, die durch die enge Bebauung der Testumgebung entstehen. Bei einer tachymetrischen Zielverfolgung muss immer Sichtverbindung zum Objekt bestehen, was in diesem Fall nur schwer zu realisieren ist.

4.2 UWB

Durch die Synchronisierung (Abb. 5) konnten die UWB-Beobachtungen übergeordneten Zeitstempeln zugeordnet werden. Da diese Messungen zu jedem Beobachtungszeitpunkt nicht wie bei der Verarbeitung der Inertialdaten von vorherigen Messungen abhängen, liefern die UWB-Daten eine langzeitstabile Lösung zur Stützung der Trajektorie.

Bei dieser Messung wurde eine UWB-Messfrequenz von $f_{\text{UWB}} = 0,58 \text{ Hz}$ verwendet, was einem Zeitintervall von etwa $\Delta t_{\text{UWB}} = 1,7 \text{ s}$ entspricht. In Bereichen, in denen keine direkte Sichtverbindung zu mindestens einem UWB-Sensor bestand, kam es dementsprechend zu Messausfällen, was zur Folge hatte, dass hier ausschließlich eine inertielle Lösung auftrat.

Die Datenverarbeitung bei der Sensorfusion ist in Abschnitt 5.4 beschrieben. Die durch das UWB-System ermittelten Koordinaten – nur verfügbar bei LoS zu mindestens zwei UWB-Sensoren – führten zu einem Soll-Ist-Vergleich (Abschnitt 6.2).

4.3 IMU

Die Erfassung von Beschleunigungen und Drehraten in allen drei Achsen liefert durch Integration nach der diskreten Zeit Position, Geschwindigkeit und Orientierung. Dabei wurde die IMU horizontal auf der Plattform angebracht, um möglichst wenig Einfluss der Erdbeschleunigung in den horizontalen Achsen zu erhalten. Bei optimaler Horizontierung erhält man also eine Beschleunigung in z-Richtung von $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Die Abtastrate dieser Sensoren betrug $f_{\text{IMU}} = 200 \text{ Hz}$, was einer diskreten Zeitdifferenz von $\Delta t_{\text{IMU}} = 0,005 \text{ s}$ entspricht.

5 Messdatenauswertung

Die Beobachtungen von IMU, UWB und Handykamera wurden nach einer Fahrt von zwei Runden ausgelesen und im Postprocessing verarbeitet. Die Abschnitte 5.1 und 5.2 beschreiben die Signalauswertung der erfassten Inertialdaten und die Weiterverarbeitung im Bewegungsmodell. In den Abschnitten 5.3 und 5.4 wird auf die Datenverarbeitung des externen Systems und die Kalman-Filterung eingegangen. Abschnitt 5.5 erläutert die Berechnung der Solltrajektorie und den daraus resultierenden Soll-Ist-Vergleich. Neben Beschleunigung und Drehraten erfolgte auch die Messung von Druck und Temperatur, was Information über auftretende Höhenänderungen liefert.

5.1 Signalverarbeitung

Tab. 1 zeigt Auflösung und Rauschverhalten der IMU-Sensoren. Da nicht nur dynamische, sondern auch statische Beschleunigungsfelder beobachtet werden, sind die entsprechenden Signale vor allem durch das Erdschwerefeld beeinflusst. Zwar wird die IMU auf der Plattform horizontalisiert, jedoch ist dies nur mit endlicher Genauigkeit möglich, sodass während der Fahrt durch Schrägstellung Anteile des Erdschwerefeldes in den horizontalen Achsen auftreten. Des Weiteren sind die entsprechenden Signale aufgrund der rauen Fahrt und der Federung des Fahrzeuges mit einem hochfrequenten Rauschen überlagert, was eine Verwendung der Rohdaten zur Ermittlung des Systemzustands erschwert.

Daher wird das Rohsignal in mehreren Schritten verarbeitet, um die benötigte Information für die Prädiktion zu extrahieren. Abb. 6 oben zeigt die gemessene Rohbeschleunigung in x-Richtung am Beginn der Messung. Während das Signal bis zum Zeitpunkt $t = 3,4 \text{ s}$ vergleichsweise ruhig verläuft, erfährt es bei Fahrtbeginn einen Ausschlag, um während der Fahrt verrauscht weiter zu schreiten. Diese hochfrequenten Rauschanteile liegen vor allem in der rauen Bewegung der Plattform begründet.

Zur Bereinigung dieser Frequenzen eignen sich entsprechende Tiefpassfilter mit einer bestimmten Durch-

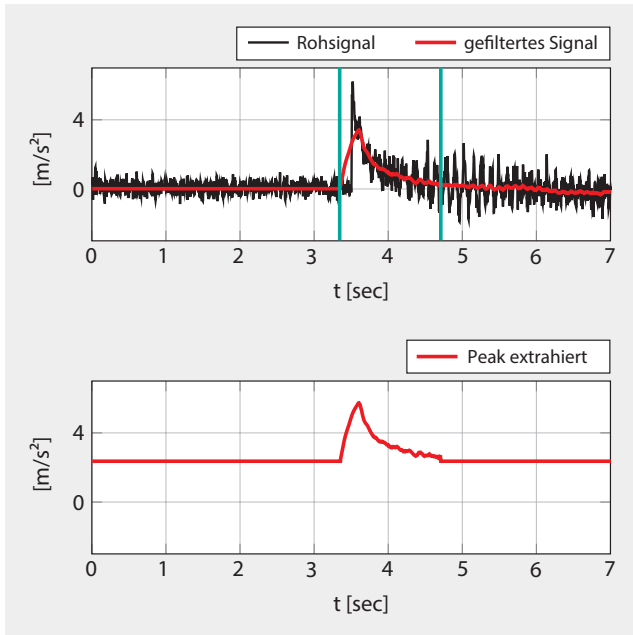


Abb. 6: Bereinigtes Beschleunigungssignal (x-Achse)

lasscharakteristik (von Grünigen 2008). In diesem Fall wurde auf eine gleitende Mittelwertbildung (Kreiß 2006) zurückgegriffen, welche in Abhängigkeit der Ordnung bestimmte Frequenzen eliminiert. Über eine Spektralanalyse des Peaks kann auf die Durchlasscharakteristik des Filters und somit auf die Länge des gleitenden Mittelwertes geschlossen werden. In diesem Fall wurde die Ordnung $n = 50$ verwendet. Vorteil dieser Filterung ist neben dem bereinigten Signal auch die Berechnung der Varianz, die sich bei jeder Mittelwertbildung ergibt und in Abhängigkeit des Rohsignals variiert. Tritt eine tatsächliche Beschleunigung auf oder erfährt die Plattform aufgrund von Unebenheiten einen Stoß, so zeigt sich dies in der entsprechenden Varianz und kann in nachfolgenden stochastischen Modellen (Abschnitt 5.2) berücksichtigt werden.

Im zweiten Schritt der Signalverarbeitung wird über eine Schwellwertanalyse eine Stoßfindung durchgeführt, in der Peaks detektiert werden, die durch tatsächliche Beschleunigungen in eine bestimmte Richtung begründet sind. Hierbei wird überprüft, ob das gefilterte Signal im Zeitbereich einen bestimmten Schwellwert für eine bestimmte Zeit überschreitet. Dieser Peak wird dann aus dem Signal extrahiert, wohingegen die restlichen Signalabschnitte zu null gesetzt werden. Die Extraktion dieses Peaks aus dem gefilterten Beschleunigungssignal ist in Abb. 6 unten gezeigt.

Diese Signalverarbeitung wird neben den Beschleunigungssignalen in allen drei Achsen auch auf die Drehraten angewendet, um hochfrequentes Rauschen zu eliminieren und einen resultierenden Drift der Trajektorie zu verringern. In Ergänzung zeigt Abb. 7 das verarbeitete Drehratensignal um die y-Achse.

Drehungen in dieser Richtung ergeben sich dabei nur bei einer Schrägstellung des Fahrzeuges längs der Fahrtrichtung, also in diesem Fall beim Befahren der Rampen.

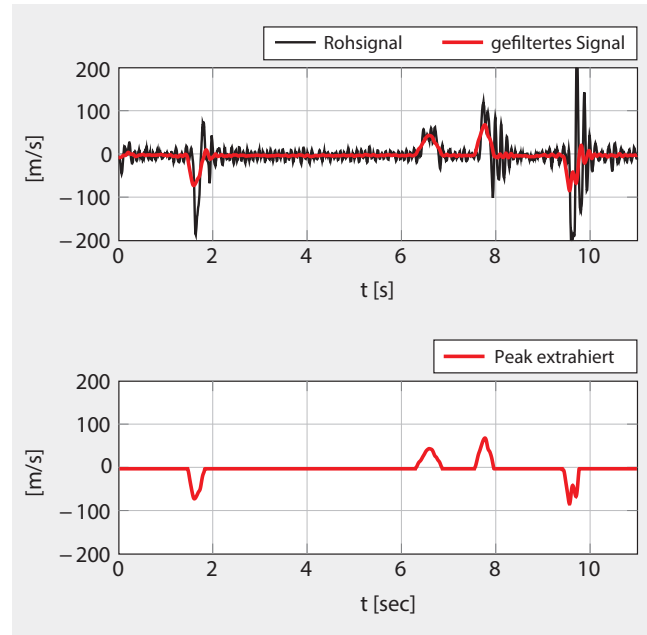


Abb. 7: Bereinigtes Drehratensignal (y-Achse)

Über die Drehraten aller drei Achsen kann dann auf die relative Orientierung des Fahrzeuges geschlossen werden.

5.2 Bewegungsmodell

Zur Beschreibung des Systemzustands wurde ein Bewegungsmodell verwendet, das auf den in Abschnitt 5.1 verarbeiteten Signalen und daraus extrahierten Information beruht. Die dreidimensionale Fahrzeugposition wird im Folgenden durch die Kleinbuchstaben der entsprechenden Achsen bezeichnet $(xyz)^T$, wohingegen die Geschwindigkeit in eine Achsrichtung als diskrete Ableitung der Position nach der Abtastzeit Δt_{IMU} mit $(\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})^T$ gekennzeichnet ist. Die erfassten Beschleunigungen werden als zweite diskrete zeitliche Ableitung der Position aufgefasst $(\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z})^T$. Für das Abtastintervall Δt_{IMU} wird im Folgenden kurz Δt geschrieben.

Somit ergibt sich für die Position und Geschwindigkeit in x-Richtung im diskreten Fall (Stolz 2005):

$$x = x_0 + \dot{x} \cdot \Delta t + \ddot{x} \frac{\Delta t^2}{2} \quad (2)$$

sowie

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \ddot{x} \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Analog gelten die Zusammenhänge (2) und (3) für y- und z-Richtung.

Des Weiteren ergibt sich die Orientierung ψ aus den Drehraten $\dot{\psi}$ im Zeitintervall Δt (Stolz 2005):

$$\psi = \psi_0 + \dot{\psi} \cdot \Delta t = \psi_0 + (\dot{\psi}_x \ \dot{\psi}_y \ \dot{\psi}_z)^T \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Nachfolgend wird der Vektor der erfassten Drehraten $\dot{\psi}$ mit $\omega = (\dot{\psi}_x \ \dot{\psi}_y \ \dot{\psi}_z)^T = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$ bezeichnet.

In der Fachliteratur wird die Darstellung mit dem Überpunkt für Differenziale von kontinuierlichen Funktionen verwendet. Hier ist damit jedoch ausschließlich der diskrete Fall gemeint.

Für die Orientierung im äußeren Koordinatenrahmen wurde auf die Darstellung mit Quaternionen zurückgegriffen. Ein Quaternion \mathbf{q} – bestehend aus einem Skalarteil q_0 und einem Vektorteil $(q_1, q_2, q_3)^T$ – kann als vierdimensionaler Vektor aufgefasst werden, mit dem sich Rotationen im Raum ohne Singularitäten darstellen lassen. Quaternionen bilden einen Zahlenbereich, der die Menge der reellen Zahlen erweitert und für den spezielle Rechenregeln der Grundrechenarten gelten (Kuipers 1999). Vorteil der Quaternionendarstellung besteht ferner in der Berechnung von Orientierungsänderungen durch kleine Drehungen ($\sin(\psi) \approx \psi$ sowie $\cos(\psi) \approx 1$, für $\psi < 0,1 \text{ rad}$) mittels einfacher Multiplikationen und Additionen, was eine Aufnahme im Zustandsvektor erleichtert. Dezidierte Information über die Quaternionenalgebra sind in (Kuipers 1999) gegeben.

Der zehndimensionale Zustandsvektor \mathbf{x} ergibt sich somit zu:

$$\mathbf{x} = (x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3)^T. \quad (5)$$

Vektoren werden als kleine Fettdruckbuchstaben bezeichnet, während Skalare normal dargestellt sind. Große Buchstaben kennzeichnen hingegen Matrizen.

Zu jedem diskreten Zeitpunkt $k = n \cdot \Delta t$ wird nun der Systemzustand prädiziert (Wendel 2011):

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{R}(\mathbf{q}_{k-1}, \boldsymbol{\omega}_k) \cdot \mathbf{u}_k. \quad (6)$$

Hierbei beschreibt \mathbf{F} die Funktionalmatrix, welche über (2) bis (4) den Übergang des Zustands vom Zeitpunkt $k-1$ zum Zeitpunkt k realisiert. Die erfassten Beschleunigungen, die im Störeingangsvektor $\mathbf{u} = (\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z})^T$ zusammengefasst sind, werden durch die Rotationsmatrix \mathbf{R} zunächst auf die aktuelle Orientierung gedreht. Die aktuelle Rotationsmatrix \mathbf{R} ergibt sich hierbei durch Update der vorherigen Orientierung \mathbf{q}_{k-1} anhand der aktuell gemessenen Drehraten $\boldsymbol{\omega}_k$. Der Übergang von aktueller Position und Geschwindigkeit erfolgt mit der Kontrollmatrix \mathbf{C} über (2) und (3).

Da zu jedem Zeitpunkt k auch die relative Orientierung der Plattform prädiziert werden kann, ist es möglich, über deren Schrägstellung eine Aussage über mögliche Höhenänderungen zu machen. Änderungen der z-Koordinate treten hier nur beim Befahren der Rampen ein, was sich in einer Drehung in y-Richtung bemerkbar macht (Abb. 7). Über die entsprechende Orientierungsänderung und die aktuelle Geschwindigkeit ergibt sich dann die Prädiktion in z-Richtung.

Da der barometrische Druck beobachtet wurde (Tab. 1), kann dieser wiederum zur Stützung der Höhe herangezogen werden. Die z-Koordinate wird somit in dieser Arbeit aus einem Mittel von Prädiktion (6) und Höheninforma-

tion durch den Druck ermittelt, was während der gesamten Messung zu einer Schätzung der Höhe in Dezimetergenauigkeit geführt hat. Die Umrechnung des Drucks in eine Höhenänderung erfolgt über die barometrische Höhenformel nach (Stolz 2005).

Neben dem aktuellen Systemzustand wird außerdem die Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx} von \mathbf{x} zum Zeitpunkt k über eine Kovarianzfortpflanzung prädiziert. Diese beschreibt ein Genauigkeitsmaß des Zustandsvektors (Hellmers et al. 2014):

$$(\mathbf{Q}_{xx})_k = \mathbf{F} \cdot (\mathbf{Q}_{xx})_{k-1} \cdot \mathbf{F}^T + (\mathbf{C} \cdot \mathbf{R}) \cdot \mathbf{Q}_{uu} \cdot (\mathbf{C} \cdot \mathbf{R})^T + \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}_{\omega\omega} \cdot \mathbf{A}^T. \quad (7)$$

Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt hierbei die Kovarianzfortpflanzung des aktuellen Zustands im Prädiktionsschritt. Im zweiten und dritten Term werden die Varianzen der Beschleunigungs- und Drehratenmessungen berücksichtigt. Aus (6) wird klar, dass $(\mathbf{C} \cdot \mathbf{R})$ die

Ableitung $\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{u}}$ darstellt. Die Matrix \mathbf{A} hingegen ergibt sich

aus der Ableitung $\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\omega}}$, was hier aus Übersichtsgründen

nicht explizit ausgeschrieben wird. Die Prädiktion inklusive Kofaktormatrix zum Zeitpunkt k wird im Folgenden mit einem hochgestellten Minus bezeichnet $\mathbf{x}^-, \mathbf{Q}_{xx}^-$. Auf den Zeitindex k wird aus Gründen der Übersicht verzichtet.

5.3 UWB

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, liefert das externe UWB-System Azimut- und Elevationswinkel, sowie – bei direkter Sicht zu mindestens zwei UWB-Sensoren – Zeitdifferenzmessungen. Um die Winkelmessungen auf das lokale Koordinatensystem zu beziehen, muss neben den Koordinaten der UWB-Sensoren auch die Orientierung bekannt sein. Dies betrifft vor allem die Drehung um die lokale z-Achse (γ), als auch die Neigung um die lokale y-Achse (β). Die Neigung um die x-Achse (α) wurde bei der Installation auf null gesetzt (Abb. 8).

Da sich die gemessenen Winkel zwischen UWB-Tag und Sensor auf die Antennenfront beziehen, wird im funktionalen Beobachtungsmodell die äußere Orientierung berücksichtigt.

Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, lässt sich über den Inertialsensor und atmosphärischen Druck die Höhe auf Dezimetergenauigkeit prädizieren. Somit wurde in der folgenden Sensorfusion auf ein IKF-Update der z-Koordinate verzichtet. Setzt man diese als bekannt voraus (im Folgenden mit z^{Tag} bezeichnet), erfolgt durch den Elevationswinkel zwischen Tag und UWB-Sensor eine reine Lagestützung.

Des Weiteren wurde die Zeitdifferenzmessung programmintern bereits über die Lichtgeschwindigkeit in eine Streckendifferenz umgerechnet.

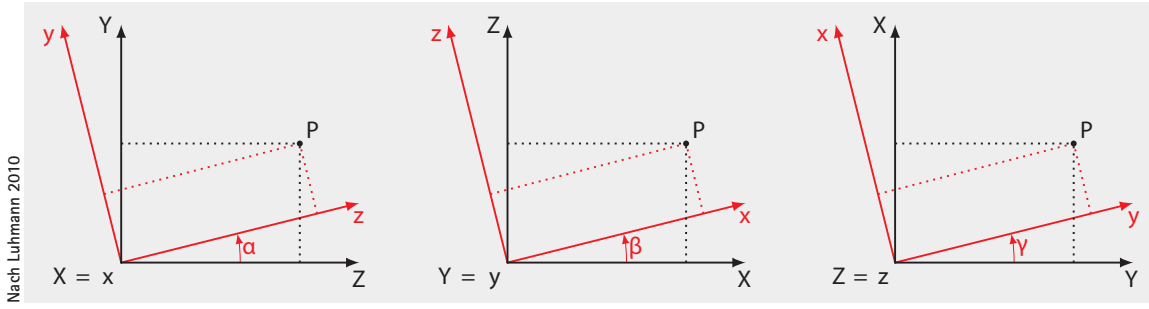


Abb. 8:
Roll (α)-,
Pitch (β)-
und Yaw (γ)-
Winkel

Für das Azimut κ , die Elevation φ und die Streckendifferenz Δd ergeben sich mit den Koordinaten $(x_i, y_i, z_i)^{UWB}$ des i -ten UWB-Sensors die Beobachtungsgleichungen:

$$\kappa = \arctan\left(\frac{y - y_i^{UWB}}{x - x_i^{UWB}}\right) - \gamma \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{z^{Tag} - z_i^{UWB}}{\sqrt{(x - x_i^{UWB})^2 + (y - y_i^{UWB})^2}}\right) - \beta \quad (9)$$

$$\Delta d = \sqrt{(x - x_i^{UWB})^2 + (y - y_i^{UWB})^2 + (z^{Tag} - z_i^{UWB})^2} - \sqrt{(x - x_j^{UWB})^2 + (y - y_j^{UWB})^2 + (z^{Tag} - z_j^{UWB})^2}. \quad (10)$$

Daraus wird auch klar, dass für Δd in (10) Sichtverbindung zu zwei Sensoren bestehen muss.

5.4 Kalman-Filterung

Zur Schätzung des optimalen Zustands wird der nach R.E. Kalman benannte Kalman-Filter verwendet. Dies stellt einen Best Linear Unbiased Estimator (BLUE) für lineare Problemstellungen dar. Da es sich jedoch bei dem vorliegenden Fall um ein nichtlineares Problem handelt, muss eine entsprechende Erweiterung des ursprünglichen Kalman-Filters verwendet werden. Um diese Nichtlinearität entsprechend zu berücksichtigen wird in dieser Arbeit das sogenannte Iterated Kalman Filter (IKF) verwendet. Dieses begegnet der Nichtlinearität des Beobachtungsmodells durch eine Taylorreihenentwicklung mit Abbruch nach der Entwicklung der Glieder erster Ordnung. Im Gegensatz zum bekannteren Extended Kalman Filter (EKF) erfolgt jedoch nicht nur eine Iteration des Filterungsschrittes zum Zeitpunkt t_k , sondern mehrere, bis ein vorgegebenes spezifisches Konvergenzkriterium erfüllt ist.

Für die weitere Verarbeitung gliedert sich die Signalverarbeitung in die zwei Schritte Prädiktion und Filterung. Bei der Prädiktion erfolgt eine zeitliche Extrapolation von Position, Geschwindigkeit und Orientierung auf Basis des angenommenen Bewegungsmodells (siehe Abschnitt 5.2). Liegen zu einem bestimmten Zeitpunkt t_k Messungen vor, kann eine Kontrolle der Prädiktion stattfinden und ein varianzgewichtetes Mittel aus Prädiktion und Messung als neuer Ausgangszustand bestimmt werden.

Nach diesen Methoden wird eine Stützung des aktuellen Systemzustands vorgenommen, sobald Beobachtungen vom externen UWB-System verfügbar sind. Je nach Sicht und Konfiguration liegen dabei zu einem bestimmten Zeitpunkt Azimut- und Elevationsbeobachtungen sowie ggf. Streckendifferenzen vor. Über den entsprechenden Zeitstempel kann dann über den IKF ein Update des Systemzustands ermittelt werden. Dieser behandelt nichtlineare Beobachtungsgleichungen und begegnet Linearisierungsproblemen durch iterative Ausführung. Zum Filterungszeitpunkt werden die Beobachtungen im n -dimensionalen Beobachtungsvektor zusammengefasst:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} = \mathbf{l}(\kappa_1 \dots \kappa_a, \varphi_1 \dots \varphi_a, \Delta d_1 \dots \Delta d_b). \quad (11)$$

Der Vektor $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ beschreibt hierbei den Übergang vom Zustands- in den Beobachtungsraum, wobei \mathbf{v} den Verbesserungsvektor bezeichnet. Die Dimension $n = 2 \cdot a + b$ ergibt sich aus der Anzahl der vorliegenden UWB-Messungen.

Des Weiteren erfolgt die Linearisierung von (8) bis (10) am aktuellen Zustand \mathbf{x}^- , was auf die Jacobi-Matrix \mathbf{H} zum Iterationsschritt m führt (Welch 1995):

$$\mathbf{H}_m = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_m} \quad \text{mit } \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}^-. \quad (12)$$

Für die Kalman-Matrix zur m -ten Iteration ergibt sich dann (Welch 1995):

$$\mathbf{K}_m = \mathbf{Q}_{xx}^- \cdot \mathbf{H}_m^T \cdot (\mathbf{H}_m \cdot \mathbf{Q}_{xx}^- \cdot \mathbf{H}_m^T + \mathbf{Q}_{ll})^{-1}. \quad (13)$$

Dabei beschreibt \mathbf{Q}_{ll} die Kofaktormatrix der UWB-Messungen. Für die neue Zustandsschätzung der m -ten Iteration gilt dann:

$$\mathbf{x}_{m+1} = \mathbf{x}^- \cdot \mathbf{K}_m \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{f}(\mathbf{x}_m) - \mathbf{H}_m \cdot (\mathbf{x}^- - \mathbf{x}_m)). \quad (14)$$

Sobald Konvergenz erreicht ist, ergibt sich der gefilterte Zustand \mathbf{x}^+ , sowie die entsprechende Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx}^- zu:

$$\mathbf{x}^+ = \mathbf{x}_{m+1} \quad (15)$$

sowie

$$\mathbf{Q}_{xx}^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_m \cdot \mathbf{H}_m) \cdot \mathbf{Q}_{xx}^-. \quad (16)$$

5.5 Smartphone Video

Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, erfolgt über den Handyfilm nicht nur eine zeitliche Zuordnung jeglicher Messungen zum Referenzzeitrahmen, sondern auch eine zeitliche Zuordnung der Ist-Position, die dann in Lage und Höhe mit den entsprechenden Soll-Koordinaten verglichen werden können. Bei der angesprochenen Bildrate liefert der Film eine resultierende Koordinatengenauigkeit von wenigen Zentimetern. Diese ist um mehr als eine Zehnerpotenz genauer als die angestrebte Genauigkeit der gestützten Trajektorie (<1 m), was eine Qualitätsbeurteilung der Sensorfusion zulässt.

6 Ergebnisse

Die erfassten Daten von Ubisense und IMU wurden nach den in Abschnitt 5 aufgezeigten Methoden ausgewertet. Ziel war es, die Positionierung einer fahrbaren Plattform in einer Indoor-Umgebung zu realisieren, die existierende Systeme, aufgrund von Bebauung und engen Korridoren, vor Probleme bezüglich direkter Sichtverbindung und Mehrwegeeffekten stellt. Hierbei wurde eine Genauigkeit von unter 1 m angestrebt. In Abschnitt 6.1 wird die durch IMU/UWB Fusion errechnete Trajektorie aufgezeigt, deren Genauigkeit in Abschnitt 6.2 über einen Soll-Ist-Vergleich an den Sollpunkten beurteilt wird.

6.1 Trajektorie

Nach dem Start an Punkt A wurden zwei Runden im Uhrzeigersinn durchgeführt, um die Fahrt wiederum am Punkt A zu beenden. Die Abb. 9 zeigt die errechnete Trajektorie in dreidimensionaler Darstellung.

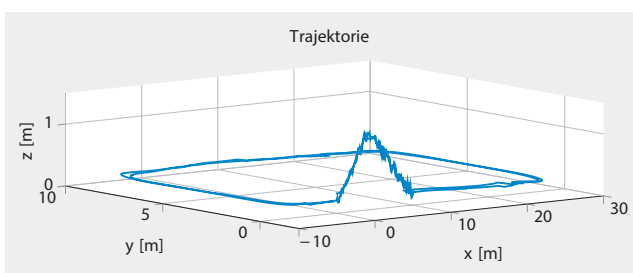


Abb. 9: 3D-Trajektorie nach zwei Runden

Es ist zu erkennen, dass die errechnete Bahn – ausgenommen beim Befahren der Rampe – einen weitgehend glatten Verlauf aufweist. Beim Eintreten einer Höhenänderung entstehen jedoch vereinzelt kleine Sprünge, was durch den erfassten Luftdruck begründet ist, der einem gewissen Rauschen ausgesetzt, und nicht, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, über eine Stoßfindung von hochfrequenten Überlagerungen befreit ist. Abb. 10 zeigt die Trajektorie in xy-Ebene.

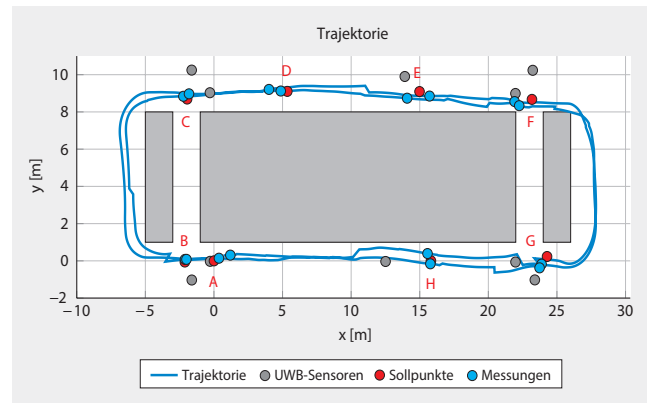


Abb. 10: Grundriss der Trajektorie

Die eingezeichneten blauen Punkte geben die Position zum Zeitpunkt des Überfahrens eines Sollpunktes an. Diese errechneten Koordinaten werden in Abschnitt 6.2 in Lage und Höhe mit den entsprechenden Sollwerten verglichen. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen in den wenigsten Fällen einen Meter übersteigen.

6.2 Soll-Ist-Vergleich

Die errechnete Trajektorie wurde an den Bodenpunkten A–H – getrennt nach Lage und Höhe – einem Soll-Ist-Vergleich unterzogen, sodass eine Aussage über die äußere Genauigkeit der IMU/UWB-Lösung gemacht werden kann. Dem wurden außerdem die reinen durch das Ubisense-System ermittelten Koordinaten gegenübergestellt. Da diese Koordinaten mit einer vergleichsweise niedrigen Frequenz ermittelt wurden, erfolgte gegebenenfalls eine Interpolation auf die Zeitpunkte der Sollpunktüberfahrt.

Die Grafiken in Abb. 11 zeigen den Vergleich zwischen IMU/UWB-Trajektorie mit entsprechender Sollkoordinate beider Runden. Es ist zu erkennen, dass die Lage in 13 von 16 Fällen eine Abweichung von einem Meter nicht überschreitet. Bei der Hälfte dieser vorgenommenen Vergleiche liegt die äußere Genauigkeit sogar unter 0,5 m. Eine weitaus bessere Lösung ergibt sich jedoch für die Höhe. Dies liegt daran, dass Höhenänderungen nur bei Schrägstellung der Plattform registriert werden, sodass bei Fahrten in der Horizontalen die z-Koordinate konstant bleibt. Vergleiche der errechneten Höhe während der Rampenüberfahrt mit der tatsächlichen Rampenhöhe ergeben auch hier Differenzen im Dezimeterbereich.

In Ergänzung dazu zeigen die Abbildungen unten den Vergleich zwischen Sollkoordinate und reiner UWB-Lösung. Diese konnten nur dann ermittelt werden, wenn direkte Sichtverbindung zu mindestens zwei UWB-Sensoren bestand. Es ist zu erkennen, dass in 8 von 16 Fällen keine Lösung ermittelt werden konnte (graue Balken) und die angestrebte Genauigkeit an nur drei Stellen erreicht wurde. Auch die Höhe ist hier wesentlich unsicherer, was auf die nicht ideale Konfiguration zurückzuführen ist.

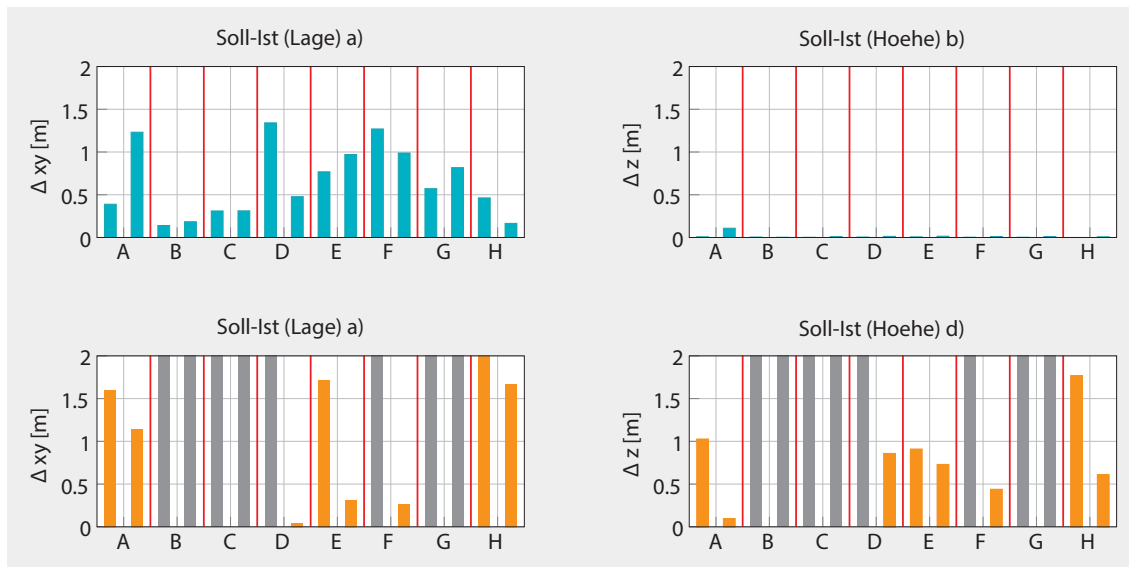


Abb. 11:
Soll-Ist-Vergleich.
Oben: IMU/
UWB, unten:
nur UWB

7 Fazit

Die hier beschriebene Untersuchung zielt auf die Sensorfusion einer inertialen Messeinheit mit einem externen, auf UWB-Signalen basierenden Indoor-Positionierungssystem ab. Für eine fahrbare Plattform wurde in einer dreidimensionalen Indoor-Umgebung eine Genauigkeit von unter einem Meter angestrebt. Bis auf wenige Ausnahmen zeigt der in Abb. 11 oben vorgenommene Vergleich zwischen gerechneter Trajektorie und den Sollkoordinaten, dass dieses Ziel erreicht werden konnte. Durch die erfassten Inertialdaten liegt außerdem zu jedem Zeitpunkt eine Lösung des Systemzustands vor. Dies ist nicht der Fall, wird das Ubisense-System alleine betrachtet, da hier Konfiguration und Umgebung eine erhebliche Rolle spielen.

Durch die Sensorintegration und die durchgeführte Datenverarbeitung mittels Kalman-Filterung kann demnach eine deutliche Verbesserung des auf dem Markt befindlichen Positionierungssystems erreicht werden.

Literatur

- Analog Devices: Analog Devices, Ten Degrees of Freedom Inertial Sensor with Dynamic Orientation Outputs (ADIS 16480), Data Sheet.
 Apple: www.apple.com/de/iphone/compare, Letzter Zugriff 04.2016.
 Ascher 2011: Ascher, C., Zwirello, L., Zwick, T., Trommer, O.: Integrity monitoring for UWB/INS tightly coupled pedestrian indoor scenarios. 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011, pp. 1–6.
 Fixounet 2009: <http://fixounet.free.fr/avidemux>, letzter Zugriff 18.05.2016.
 Hellmers et al. 2014: Hellmers, H., Norrdine A., Blankenbach J., Eichhorn A.: Indoor localisation for wheeled platforms based on IMU and artificially generated magnetic field. IEEE Xplore Proceedings of the 2014 International Conference on Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS), 20–21 November 2014, Corpus Christi, USA.
 Holm 2012: Holm, S.: Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength. 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) pp. 1–6.
 Kreiß 2006: Kreiß, J., Neuhaus, G.: Einführung in die Zeitreihenanalyse. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2006.

- Kuipers 1999: Kuipers, J.: Quaternions and Rotation Sequences. Department of Mathematics, Calvin College, Grand Rapids, MI 49546, USA, 1999.
 Lee 2004: Lee, C., Chang, Y., Park, G., Ryu, J., Jeong, S.-G., Park, S., Park, J., Lee, H., Hong, K.-S., Lee, M.: Indoor positioning system based on incident angles of infrared emitters. In: Proc. IEEE Conf. Ind. Electron. Soc., Nov. 2004, vol. 3, Busan, Korea, pp. 2218–2222.
 Luhmann 2010: Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg 2013.
 Mautz 2012: Mautz, R.: Indoor Positioning Technologies. Habilitation Thesis submitted to ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH Zurich Februar 2012.
 Stolz 2005: Starthilfe Physik, 4. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart 2005.
 Ubisense 2012: Copyright © Ubisense 2012: Training Material for Ubisense Precise Real-time Location.
 von Grünigen 2008: von Grünigen, D.C.: Digitale Signalverarbeitung. München, Carl Hanser Verlag, 2008.
 Welch 1995: Welch, G., Bishop, G.: An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, 1995.
 Wendel 2011: Wendel, J.: Integrierte Navigationssysteme (Sensorfusion, GPS und Inertiale Navigation). 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München 2011.
 Zou 2013: Han Zou, Hengtao Wang, Lihua Xie, Qing-Shan Jia: An RFID Indoor Positioning System by Using Weighted Path Loss and Extreme Learning Machine. 2013 IEEE 1st International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications (CPSNA).

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Hendrik Hellmers
 M.Sc. Nicolas Diefenbach
 Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn
 TU Darmstadt, Institut für Geodäsie
 Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt
hellmers@geod.tu-darmstadt.de
diefenbach@geod.tu-darmstadt.de
eichhorn@geod.tu-darmstadt.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.