
Ein topologischer Ansatz zur Innenraumnavigation mit MEMS in Smartphones basierend auf dem Routing-Graph

Harald STERNBERG und Thomas WILLEMSSEN

HafenCity Universität Hamburg · vorname.nachname@hcu-hamburg.de

Zusammenfassung

GNSS-gestützte Navigation mit Smartphones hat sich in der Gesellschaft etabliert. Im Forschungsfeld der Indoornavigation wird verstärkt an Lösungen zur Positionsschätzung für GNSS-abgeschattete Bereiche gearbeitet. Das Ziel der Forschungsgruppe an der HafenCity Universität ist die autarke Navigation nur mit MEMS Sensoren des Smartphones. In den meisten Ansätzen werden zurzeit die Low-Cost Sensoren mit Hilfe von Partikel Filter und Kalman Filter fusioniert. Dies dient der einfachen Einbindung von externer Stützung, wie beispielsweise die Karte. In dieser Arbeit wird ein Ansatz ohne diese Filter vorgestellt. Eine Positionsschätzung nur mit den integrierten Sensoren soll auf Basis des Routings realisiert werden. Eine Fusion mit weiteren Stützungen ist nicht vorgesehen. Die Positionsschätzung wird auf dem Wegenetz berechnet. Aus Beschleunigungssensor und Gyroskop werden relative Informationen zur aktuellen Position abgeleitet. Diese Informationen dienen zur Positionsbestimmung auf einer Routing Kante. An den Routing Knoten helfen die Sensordaten bei der Auswahl der nächsten wahrscheinlichsten Routing Kante. Zum Vergleich werden Ansätze mit Kalman Filter und Partikel Filter auf den gleichen Datensatz angewendet.

1 Einleitung

Unter Innenraumpositionsschätzung versteht man die Positionsschätzung ohne GNSS Information. In der Forschung haben sich verschiedene Ansätze etabliert. Diese Ansätze finden zum Teil schon Anwendung in der Praxis. Beispielsweise wird die Signalstärke von Wifi Netzen genutzt, um ein Fingerprinting zu realisieren (Awiloc 2013). Andere Ansätze favorisieren RFID Sensoren oder Ultra Wide Band (UWB) (Blankenbach & Willer 2009). Weitere interessante Sensoren sind die MEMS-Sensoren (Micro Elektro Mechanical Systems), welche unter anderem in Smartphones verbaut sind. Sie zeichnen sich durch die mikro-Bauweise und kostengünstige Fertigung aus (WILD-PFEIFFER 2011). Diese Inertial-Sensoren (Accelerometer, Gyroskop) erlauben unter bestimmten Voraussetzungen eine relative Positionsschätzung. Üblicherweise finden Inertial-Sensoren Anwendung in der Outdoor-Navigation und werden regelmäßig durch GNSS-Informationen gestützt (STERNBERG ET AL 2013). Die Sensoren unterliegen unterschiedlich starkem Rauschen und erzeugen Driften. Bei den Sensoren in MEMS-Bauweise sind die Effekte verstärkt vorhanden. Der Vorteil der Anwendung von MEMS Inertial-Sensoren ist allerdings die weitgehende Infrastruktur Unabhängigkeit. Es müssen beispielsweise keine externen Sensoren im Gebäude installiert werden. Zusätzliche Infrastruktur kann kostenintensiv in der Anschaffung und im Betrieb

sein. Als Navigationshardware findet das eigene Smartphone Anwendung. Dies unterstützt direkt eine Realisierung der "Navigation von Tür zu Tür".

Eine Verwendung nur dieser Sensoren ist aufgrund der üblichen Unsicherheiten (Random Walk, Noise, Drift) in den Messdaten sehr ungenau. Eine Positionsschätzung rein aus diesen Daten benötigt daher nach wenigen Sekunden eine Stützinformation. Zur Stützung bieten sich viele Möglichkeiten an. Beispielsweise können Ansätze mit Wifi oder RFID Verwendung finden. Von besonderem Interesse ist der Einsatz der Karte zur Stützung. Die Karte ist für eine Navigationsapplikation üblicherweise die Grundlage zur Visualisierung. Der Einsatz der Karte bedeutet daher keinen zusätzlichen Aufwand für die Positionsschätzung.

Accelerometer, Gyroskope, Barometer und Kartendaten müssen intelligent miteinander kombiniert werden, damit eine robuste Positionsschätzung möglich ist. Für die Verarbeitung von diesen stochastisch stark unterschiedlichen Daten bieten sich Kalman Filter oder Partikel Filter an. Diese Algorithmen erlauben die Berücksichtigung von Messunsicherheiten in der Positionsschätzung. Besonders die Festlegung der Rauschparameter kann zu Problemen in der Schätzung führen. Eine Minimierung von notwendigen zu setzenden Parametern soll durch den hier vorgestellten Ansatz ohne den Einsatz von Filtern realisiert werden. Die Sensordaten werden dazu verwendet, eine Anzahl von Zuständen zu erkennen. Eine Positionsschätzung wird auf dem Routing-Graphen erfolgen, der auch für eine Navigationsapplikation genutzt wird. Um die Performance des Ansatzes evaluieren zu können wird die Lösung mit Filterlösungen aus Kalman Filter und Partikel Filter verglichen. In den Ansätzen mit Filtern werden zudem Kartendaten zur Stützung eingesetzt.

2 Fusionierung der MEMS

2.1 Kalman Filter + Routing

Kalman Filter dienen der Schätzung von gesuchten Größen bei bekannten oder angenäherten Veränderungsverhalten (Bewegungsmodell). Mit Hilfe eines Systemrauschens wird die Unsicherheit des Bewegungsmodells beschrieben. Diese Schätzung mit Hilfe des Bewegungsmodells wird durch Beobachtungen gestützt. Die Stärke des Einflusses auf die vorherige Schätzung wird mit dem Messrauschen definiert. Auf eine Formeldarstellung wird hier verzichtet (WENDEL 2011, KALMAN 1960).

Im folgenden Ansatz findet der Accelerometer als Schrittzähler Anwendung und das Routing wird zur Stützung eingebunden. Die Einbindung des Routing-Graphen ist in Abbildung 1 zu sehen. Es wird die wahrscheinlichste Kante ausgewählt. Bei der Auswahl der Routing Kante wird die Orientierung der jeweiligen Kante zu den Gyroskop Daten berücksichtigt. Der Fußpunkt der aktuellen Schätzung wird auf die Routing Kante berechnet. Dieser Fußpunkt findet als Koordinatenupdate im Kalman Filter Anwendung.

Zur Untersuchung der verschiedenen Ansätze wurden ein Datensatz im HCU-Gebäude mit dem Testgerät Nexus 4 erzeugt. Das Gebäude zeichnet sich durch die weitgehend nicht vorhandenen rechten Winkel aus. Für die Untersuchung zur Unsicherheit der Orientierung aus dem Gyroskop eignet sich das Gebäude daher sehr gut.

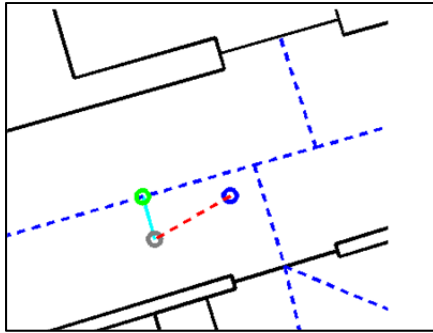


Abb. 1:
Prinzip der Routing-Unterstützung
(WILLEMSEN 2016)

In Abbildung 2 ist ein Datensatz dargestellt. Das Bewegungsmodell in diesem Ansatz ist die Integration von Drehrate und Schrittgeschwindigkeit. Als Beobachtungen werden die orthogonalen Abstände zum Routing bestimmt (Abbildung 1). Zudem erfolgt eine Stützung der z-Orientierung. Diese erfolgt sofern eine Kante des Wege-Netzes 3x hintereinander ausgewählt wird. Dies soll verhindern, dass kurze Kanten zur Stützung Verwendung finden. Diese kommen verstärkt bei Abzweigungen vor. Eine Richtungskorrektur während einer Drehung kann grobe Richtungsfehler produzieren.

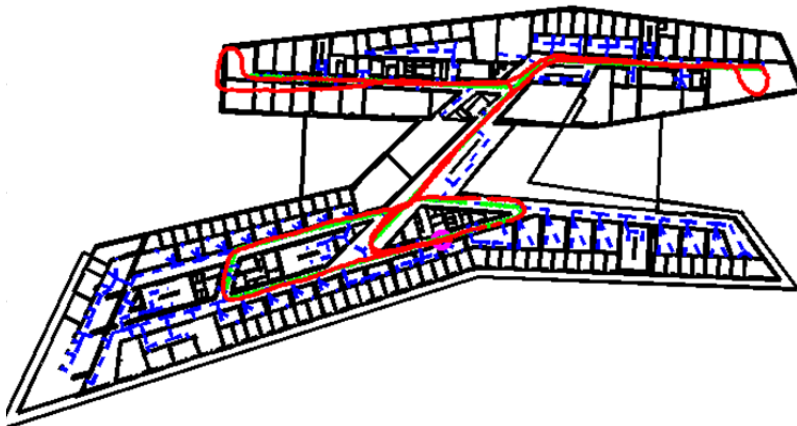


Abb. 2: Trajektorie im HCU-Gebäude aus dem Kalman Filter (WILLEMSEN 2016)

Es wurde ein Weg von mehr als 400 m in einer Zeitspanne von ca. 7 Minuten (incl. einer Pause) zurückgelegt. Der Weg wird relativ gut vom Kalman Filter repräsentiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine Darstellung der Referenzroute verzichtet. Es treten maximale Abweichungen von 5 m gegenüber Referenzmarken auf. Ein Vergleich zu diesen Referenzmarken ist in Abschnitt 4 ‚Diskussion‘ zu finden.

2.2 Partikel Filter + Routing + Wände (Karte)

Beim Kalman Filter werden die Wahrscheinlichkeiten durch die Kovarianz Matrix repräsentiert. Der Partikel Filter stellt diese Wahrscheinlichkeiten durch eine vorher definierte Anzahl an Partikel (zukünftige mögliche Positionen) dar (WENDEL 2011). Gegenüber dem Kalman Filter kann daher beim Partikel Filter eine vergleichsweise einfache Stützung mit Kartendaten implementiert werden. Im Folgenden Ansatz wird ein Pedestrian Dead Reckoning Partikel Filter aufgezeigt. Der Partikel Filter wird mit einem Zeitintervall von 0,1 Sek. oder bei Schritterkennung berechnet. Bei jeder Berechnung findet eine Stützung durch die Wand und mittels Routing statt (Abbildung 3). Bei einer Stützung werden die Gewichte für jedes Partikel mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion neu bestimmt.

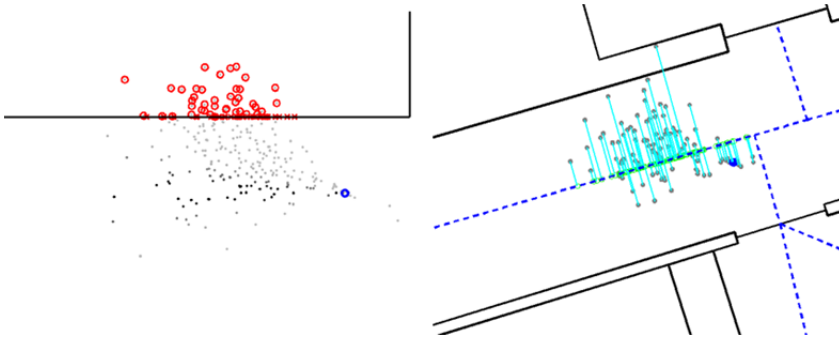


Abb. 3: Unterstützung durch Karte (links) und Routing-Graph (rechts) (WILLEMSSEN 2016)

In Abbildung 3 ist auf der linken Seite das Prinzip einer Einbindung des Kartenmaterials sichtbar. Die roten Partikel (Kreise) erhalten das Gewicht 0. Diese Partikel liegen von der letzten Schätzung gesehen hinter der Wand. Eine zweite Stützung kann mit der Orientierung der Wand Kante realisiert werden. In der Abbildung werden die Gewichte (grau skaliert) dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Stützung des Routing-Graph dargestellt. Es werden die orthogonalen Fußpunkte zur ausgewählten Routing Kante berechnet. Die Auswahl der Routing Kante erfolgt in Abhängigkeit von der Abszisse und der Richtungsdivergenz zu den Gyroskop Daten. Die Gewichte werden in Abhängigkeit der Länge des orthogonalen Abstandes zur ausgewählten Routing Kante berechnet.

In Abbildung 4 ist mit dem Datensatz aus dem Kalman Filter Beispiel die Trajektorie mit Partikel Filter dargestellt. Die wahrscheinlichste Trajektorie wird in Rot (dicke Punktlinie) gezeigt. Die blauen Punkte (breites Band) sind die produzierten Partikel. In diesem Ansatz wurden 100 Partikel verwendet. Die (magenta) gestrichelte Linie zeigt das reine Dead Reckoning ohne eine Berücksichtigung irgendeiner Stützung an.

Die erreichte Positionsgenauigkeit ist vergleichbar mit dem Ansatz mit Kalman Filter. Die Ansätze mit Kalman Filter und Partikel Filter zeigen deutlich, dass eine Positionsschätzung nur mit integrierten MEMS Sensoren im Smartphone möglich ist. Allerdings ist eine Stützung von Kartendaten und/oder Routingdaten notwendig. Bei der Realisierung ist die Berechnung von Stützinformatoren sehr aufwendig.



Abb. 4: Trajektorie im HCU-Gebäude aus dem Partikel Filter (WILLEMSEN 2016)

3 Ansatz mit Routing Graph und MEMS

In diesem Kapitel wird ein Ansatz verfolgt der dem Map Matching gleicht. Mit Hilfe von Accelerometer und Gyroskop findet eine Positionsschätzung nur auf dem Routing-Graph (Kanten-Knoten-Modell) statt, das damit unabhängig von weiteren Stützinformationen ist. Der Nachteil ist die starke Generalisierung von Bewegungsmustern im Gebäude. In diesem Ansatz wird eine Navigation mit möglichst wenigen Abfragen umgesetzt. Dabei soll die Positionsschätzung weitgehend robust erfolgen. Eine fehlerhafte Auswahl einer Routing Kante muss daher abgefangen werden. Dadurch kann eine parallele Mehrfachberechnung vermieden werden, wie das sonst beim Map Matching mit PF üblich ist (ASCHER 2014).

3.1 Algorithmus für MEMS Positionierung auf dem Routing-Graph

Der Ablauf einer Positionsschätzung setzt die sinnvolle Verwendung der verfügbaren Sensordaten voraus. Die Drehraten aus dem Gyroskop werden zu Winkeln integriert. Der Beschleunigungssensor findet als Schrittzähler Anwendung. Dabei wird eine mittlere Schrittlänge angenommen. Abbildung 5 zeigt den verwendeten Schrittzähler. Zu Beginn wird das Messrauschen des Sensors in Ruhelage bestimmt. Dazu wird das Smartphone locker in der Hand gehalten. Mit diesen Daten werden personenabhängige Grenzwerte bestimmt. Diese werden auf die ausgerichtete z-Achse angewendet (blaue Linien). Eine Schritterkennung erfolgt nach dem Überschreiten des Maximums und dem Unterschreiten des Minimums.

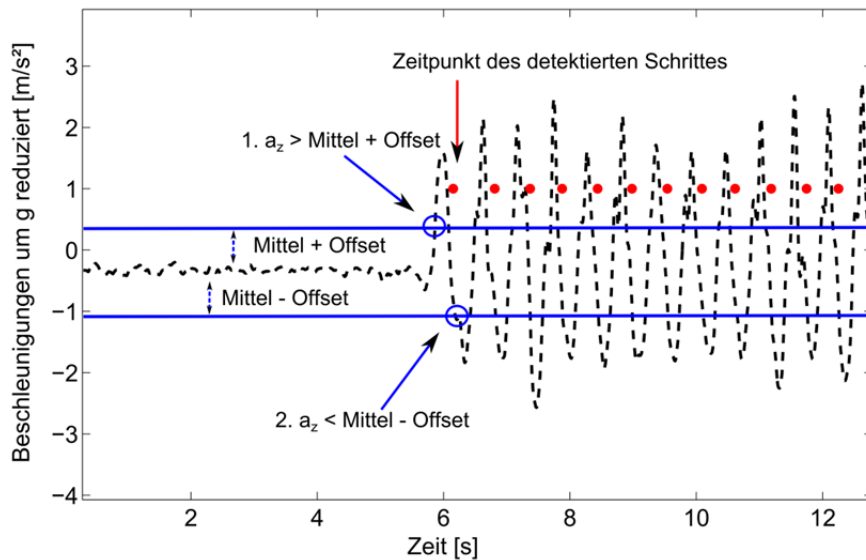


Abb. 5: Schritterkennung auf der z-Achse des Accelerometer (WILLEMSSEN 2016)

Die Bedingungen 1 und 2 in Abbildung 5 müssen nacheinander erfüllt werden. Wird ein Schritt erkannt (rote Punkte bei 1 m/s²) werden die Bedingungen erneut hintereinander abgefragt. Für die Übergänge zum Stillstand wird ein Zeitfenster (< 1sec) verwendet. Dies soll zu viel detektierte Schritte verhindern.

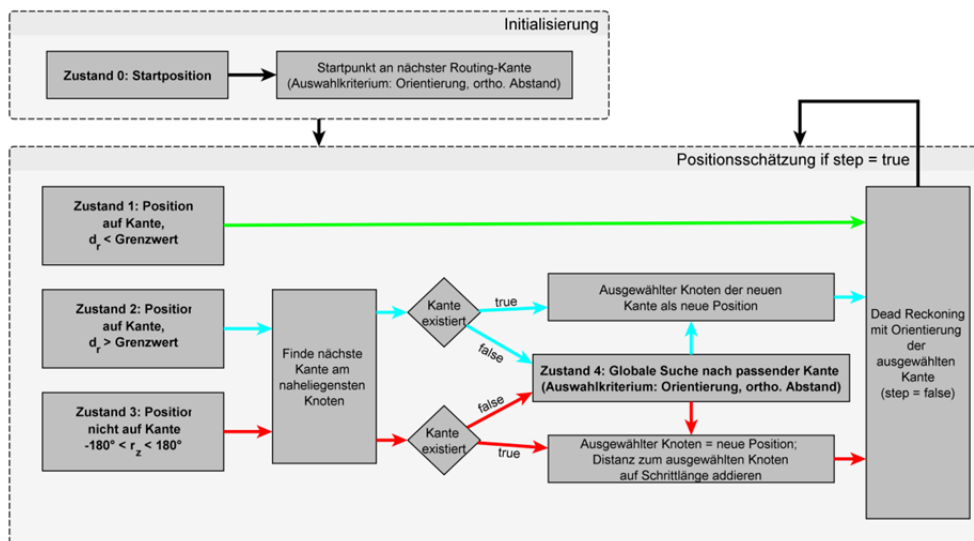


Abb. 6: Arbeitsprinzip des Algorithmus (WILLEMSSEN 2016)

Initialisierung: Zu Beginn muss eine Startposition auf die wahrscheinlichste Routing Kante berechnet werden. Die Startposition kann beispielsweise eine Raumkoordinate sein, sie kann mittels QR-Code am Türschild oder über die Eingabe einer Raumnummer importiert werden. Die Berechnung auf die Routing Kante erfolgt durch die Bestimmung aller orthogonalen Abstände im Datensatz. Der Fußpunkt der Startposition bildet die Startkoordinate für die relative Positionsschätzung mit Inertial-Sensoren. Die ausgewählten Kanten definieren die Laufachse, deren eindeutige Richtung aus den Gyroskop Daten abgeleitet wird.

Positionsschätzung: Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen ein Ablaufdiagramm und grafisch die Umsetzung zur Positionsschätzung mit MEMS und Routing-Graph. Die Initialisierung findet nur zu Beginn statt und liefert lediglich die erste Bezugskante für das Kanten bezogene Dead Reckoning. Anschließend wird die Berechnung bei jedem detektierten Schritt aktiv. Daher ist in diesem Ansatz eine Zustandserkennung für den Stillstand unnötig. Die Positionsschätzung enthält vier Zustände. Diese Zustände werden bei einer Schrittserkennung abgefragt.

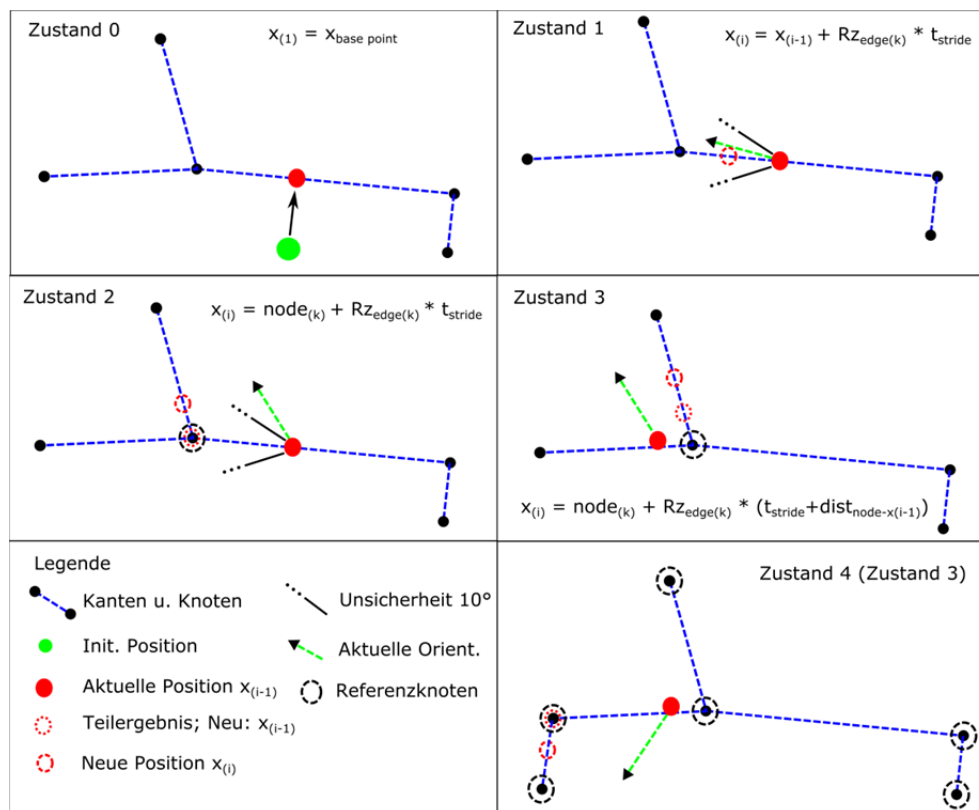


Abb. 7: Graphische Darstellung der verschiedenen Zustände (WILLEMSSEN 2016)

Der Zustand 1 dient der Fortbewegung auf einer Kante. Es wird eine Unsicherheit für die Detektion einer Kantenrichtung mit 10° angenommen. In diesem Unsicherheitsbereich findet keine Orientierungsänderung statt. Weiterhin befindet sich die aktuelle Position auf

der zuvor favorisierten Kante. Dies wird über einen Distanzvergleich zu den Endknoten bestimmt. Sind diese Kriterien erfüllt findet ein Dead Reckoning auf der Kante statt. Anschließend wird auf die nächste Schritterkennung gewartet.

Der Zustand 2 beschreibt eine Richtungsänderung auf der ausgewählten Kante. Die Laufrichtung ist mit der Kante nicht mehr vereinbar ($>10^\circ$). In diesem Fall wird der nächste Knoten der ausgewählten Kante gesucht. Die Richtung aus dem Gyroskop wird anschließend mit allen Kanten, die vom Knoten abgehen, verglichen. Wird im Unsicherheitsband zum Gyroskop eine Kante ausgewählt wird der nächste Knoten dieser Kante als neue Position angenommen. Dies minimiert den Einfluss der stark generalisierten Laufwege durch den Routing-Graph. Wird keine passende Kante gefunden wird der Zustand 4 aktiv.

Im Zustand 3 liegt die aktuelle Position nicht mehr auf der zuvor ausgewählten Kante. Wie im Zustand 2 wird nach einer neuen Kante vom nächsten Knoten gesucht. Wird eine neue Kante ausgewählt, muss der zu viel gelaufene Weg Berücksichtigung finden. Dieser Abstand zum Knoten wird für das Dead Reckoning zur Schrittlänge addiert.

Wird im Zustand 2 und 3 keine Kante gefunden greift der Zustand 4 ein. Aufgrund ungenauer Schrittlängenangaben bei langen Kanten oder aufgrund sehr kurzen Kanten (<2 steps) ist ein falscher Knoten ausgewählt worden. Die passende Kante hat keinen Anschluss am neuen Knoten. Im Zustand 4 findet eine globale Suche einer neuen Kante statt. Die Auswahl der neuen Kante ist abhängig von der Orientierung zum Gyroskop und von dem orthogonalen Abstand.

3.2 Beispieltrajektorie

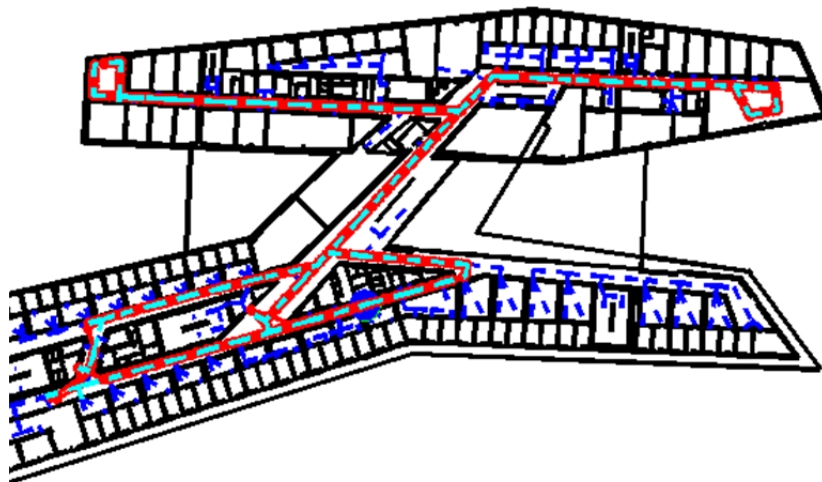


Abb. 8: Ansatz mit der Positionsschätzung auf dem Routing-Graph (WILLEMSSEN 2016)

Die Trajektorie aus dem zuvor beschriebenen Algorithmus und dem Testdatensatz ist in Abbildung 8 gezeigt. Start- und End-Position passen auf < 2 m zusammen. Dazu mussten die offenen Bereiche allerdings um Kanten und Knoten erweitert werden, da durch die

starke Generalisierung dort keine Laufwege repräsentiert wurden. In einer Erweiterung dieses Ansatzes gibt es eine Möglichkeit der Entkopplung vom Kanten und Knoten Modell.

4 Diskussion zur Nutzung von MEMS

Kalman Filter, Partikel Filter, oder der hier vorgestellte Ansatz liefern gute Ergebnisse in der Positionsschätzung, aber nur mit der Berücksichtigung von Karten- und Routinginformationen. Tabelle 1 zeigt einen Vergleich ausgewählter Positionen in der Trajektorie. Da sich der Ansatz ohne Filter nur auf dem Routing Graph bewegt, sind Unsicherheiten durch das generalisierte Kanten-Knoten-Modell mit zu berücksichtigen. In diesem Beispiel sind offene Bereiche kaum vorhanden, bei denen der Einfluss der Generalisierung sehr groß wird. Lediglich die Unsicherheiten durch die globale Suche der nächsten Position bringen kurzzeitig hohe Positionsfehler ein.

Tabelle 1: Vergleich von KF, PF und der Zustandserkennung auf dem Routing Graphen und Abweichung von den Referenzpunkten

ID	KF [m]	PF [m]	Zustandserkennung [m]
1	0,7	1,8	1,3
2	1,5	1,4	0,5
3	3,1	3,7	3,4
4	0,8	1,7	2,9
5	1,3	4,9	0,2

Der Vorteil des Kalman Filters ist das Bewegungsmodell als Basis. Bei bekanntem Vorwissen über den Bewegungsablauf können so unsichere Daten im Filter abgefangen werden. Allerdings ist das Bewegungsverhalten einer sich bewegenden Person stark unvorhersehbar, Flugzeuge und Fahrzeuge bewegen sich gleichmäßiger.

Der Partikel Filter findet immer dann Einsatz, wenn eine Initialisierungsposition unbekannt ist. Allerdings ist das für eine Indoornavigation unnötig, da auch das Routing zu Beginn berechnet wird. Weiterhin lassen sich Stützungen aus Karten- und Routinginformationen durch die Gewichtsanzpassung der Partikel relativ einfach einbinden.

Der Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes ist die Einfachheit der Eingangsdaten, zudem ist dieser Ansatz wenig rechenintensiv. Lediglich ein Dead Reckoning und das Kanten-Knoten Modell des Routing findet Einsatz. Die Positionsbestimmung findet immer relativ zur vorherigen Kante statt. Dies ist für den Einsatz von MEMS Sensoren von großem Vorteil, da das Zeitfenster einer Stützung der Sensordaten vergleichsweise gering ist. Ein großer Nachteil ist die Anwendung in großen offenen Bereichen, hier ist das Routing zu stark generalisiert. Dies kann im aktuell einfachen Ansatz zu fehlerhaften Interpretationen führen. Ein Entkoppeln vom Routing-Graph kann in diesen Bereichen eine Möglichkeit sein, den Ansatz robuster zu gestalten. So kann auf Basis des hier vorgestellten Ansatzes ein Partikel Filter angewendet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag werden ausschließlich MEMS Inertial-Sensoren im Smartphone zur Positionsschätzung verwendet. Das Ziel dabei ist eine Positionsschätzung mit wenig Aufwand für Anwender und Anbieter. Am Beispiel des HCU-Gebäudes und dem Testgerät Google Nexus 4 kann eine funktionierende Positionsschätzung aufgezeigt werden. Lediglich Stützinformationen, welche keinen zusätzlichen Infrastrukturaufwand voraussetzen, finden Anwendung, in diesem Fall das vektorbasierte Kartenmaterial sowie der vektorbasierte Routing-Graph. Beim Kalman Filter und Partikel Filter wurden Stützinformationen aus den Karten- und Routingdaten abgeleitet. Als Stützinformationen mussten Schnittpunkte und orthogonale Abstände bestimmt werden. Beim hier detailliert vorgestellten Algorithmus findet keine Stützung statt. Die Positionsschätzung erfolgt ausschließlich auf dem vorhandenen Routing-Graph. Die Ergebnisse zeigen auf, dass eine Positionsschätzung von Inertial-Sensoren im Smartphone mit Stützinformationen aus Karte und Routing mit einer Genauigkeit unter fünf Meter möglich ist. Eine automatische Stockwerksidentifizierung durch Berücksichtigung des integrierten Barometers wurde hier nicht behandelt, der Barometer kann zudem die 2D-Position bei Stockwerksübergängen stützen. Die offenen Bereiche ohne Routinginformationen können durch die Kombination dieses Ansatzes mit einem Partikel Filter realisiert werden.

Literatur

- ASCHER, C. (2014): "Modulares multisensorielles Indoor Navigationssystem", Logos Verlag, Berlin, 2014.
- AWILOC: <http://www.iis.fraunhofer.de/de/bf/ln/technologie/rssi/prj1.html> Retrieved: 25. October 2013
- BLANKENBACH, J. & WILLER, V. (2009): „Robuster räumlicher Bogenschnitt – Ein Ansatz zur robusten Positionsberechnung in Indoor-Szenarien“, (Robust spatial Resection - An approach to robust position calculation in indoor scenarios), AVN, Heft 8-9/09, AVN – 8-9/2009.
- KALMAN, R. E. (1960): "A new approach to linear filtering and prediction problems", ASME Journal of Basic Engineering 82, 35-45, 1960.
- STERNBERG, H. & KELLER, F. & WILLEMSSEN, T. (2013): "Precise indoor mapping as a basis for coarse indoor navigation", Journal of applied geodesy 7-4, 227–308, 2013.
- WENDEL, J. (2011): "Integrierte Navigationssysteme", (Integrated Navigation Systems) 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2011.
- WILD-PFEIFFER, F. (2011): "Mems-sensoren, auch für die Geodäsie", Zeitschrift für Vermessungswesen.
- WILLEMSSEN, T. (2016): "Fusionsalgorithmus zur autonomen Positionsschätzung im Gebäude, basierend auf MEMS-Inertialsensoren im Smartphone", Shaker Verlag, Aachen 2016, ISBN:978-3-8440-4689-2.