

Evaluation of Kalman Filter Configurations for Robot Localization Using Sensor Data Fusion

Evaluierung von Kalman Filter Konfigurationen zur Roboterlokalisierung mittels Sensordatenfusion

Stefan Hensel*, Marin Marinov**, Christopher Kupitz*, Dimitre Trendafilov **

* University of Applied Sciences Offenburg, Department for Electrical Engineering
Offenburg, Germany, stefan.hensel@hs-offenburg.de

** Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Department of Electronics
Sofia, Bulgaria, mbm@tu-sofia.bg

Abstract — In this work, three different configurations of the Kalman filter developed by Tom Moore for the Robot Operating System are presented. These form the basis for localization using sensor fusion in the ROS framework used. The aim of this work is the construction and verification of localization for a mobile robot system Husky A200 from Clearpath Robotics. For this purpose, the possibilities of the existing system were examined, and several versions of localization filters were configured. In the end, a verification of the results in different scenarios is compared. For this purpose, the results of a variant of the Extended Kalman filter in 2D (EKF2D), a variant of the Unscented Kalman filter in 2D (UKF2D), and a variant of the Extended Kalman filter in 3D (EKF3D) are verified and compared. The investigations showed that the EKF2D provides the best and most robust results for localization, despite having a 17.3% higher end position deviation compared to the UKF2D variant. The EKF3D configuration variant selected in this project is not suitable for a meaningful position determination due to its strong inaccuracies in height determination.

Zusammenfassung — In dieser Arbeit werden drei verschiedene Konfigurationen der von Tom Moore, für das Robot Operating System, entwickelte Kalman-Filter vorgestellt. Diese bilden die Grundlage für eine Lokalisierung mittels Sensorfusion in dem verwendeten ROS-Framework. Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau und die Verifikation einer Lokalisierung für ein mobiles Robotersystem Husky A200 der Firma Clearpath Robotics. Hierzu wurden die Möglichkeiten des bestehenden Systems untersucht und mehrere Versionen von Lokalisierungsfiltern konfiguriert. Am Ende, wird eine Verifikation der Ergebnisse in verschiedenen Szenarien gegeneinandergestellt. Hierzu werden die Ergebnisse einer Variante des Extended Kalman-Filters in 2D (EKF2D), eine Variante des Unscented Kalman-Filter in 2D (UKF2D) und eine Variante des Extended Kalman-Filters in 3D (EKF3D) verifiziert und verglichen. Die Untersuchungen ergaben dass der EKF2D die besten und robustesten Ergebnisse für eine Lokalisierung erbringt, trotz, im Vergleich zu der UKF2D Variante, 17,3 % höhere Endpositionsabweichung aufweist. Die in diesem Projekt gewählte EKF3D Konfigurationsvariante eignet sich, wegen seinen starken Ungenauigkeiten in der Höhenbestimmung nicht für eine aussagekräftige Positionsbestimmung.

I. EINFÜHRUNG

Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau und die Verifikation einer Lokalisierung für ein mobiles Robotersystem Husky A200 der Firma Clearpath Robotics [1]. Diesbezüglich wurde der Roboter erstmal auf die Möglichkeiten untersucht dieses Ziel zu erreichen. Daraufhin musste der bestehende Aufbau der verteilten Computersysteme analysiert werden. Es musste festgelegt werden welche Sensoren mit welchem der Computer verbunden werden muss. Die nötigen Hardwaretreiber für die bestehenden Sensoren mussten gefunden, installiert getestet und richtig konfiguriert werden. Anschließend mussten die physische Position und Orientierung der Sensoren ausgemessen und dem ROS-System bekannt gemacht werden. Nachdem alle Hardware- und Treibereinstellungen konfiguriert waren und das System wie gewünscht arbeitete, konnten erste Testfahrten aufgenommen werden. Es wurden zu externer Auswertung, Aufzeichnungen aller Sensordaten des ROS-Systems in einem Rosbag aufgenommen. Diese Daten können in einem beliebigen ROS-System wieder abgespielt werden und so

Simulierte „echte“ Daten wieder gespiegelt werden. Das ermöglicht eine spätere Auswertung losgelöst von dem Robotersystem selbst. Zur Erreichung der gesetzten Ziele wurden mehrere Kalman-Filter mit dem ROS eigenen `robot_localization` softwarepaket konfiguriert und dessen Ergebnisse validiert. Hierzu wurde mehrere, vorher aufgenommene, Rosbags mit den verschiedenen Arten der Kalman- Filter gefiltert und verglichen.

II. FILTERAUFBAU UND SYSTEMKONFIGURATION

In diesem Kapitel wird der gewählte Filteraufbau mit seinen einzelnen ROS (Robot Operating System) Nodes erklärt. Des Weiteren werden drei Konfigurationen für die Verwendung in 2D, 3D und als UKF-Variante erläutert. Das gemeinsame Grundgesamtsystem der in der Evaluierung getesteten Filtervarianten wird aufgezeigt und die wichtigen Parameter erklärt. Die für die Lokalisierung zur Verfügung stehenden Daten sind die Daten der XSens IMU, der Husky Odometrie und die GNSS-Daten der Arduino GNSS. Um die in REP-105

und für die Koordinatensysteme getroffenen Vereinbarungen zu erfüllen, kann das Filtersystem, das die Daten der gewählten Sensoren fusionieren soll, in zwei Teilsysteme aufgeteilt werden [2]. Eines das die quasikontinuierlichen Daten fusioniert und eine Transformation von *odom*-Koordinatensystem zum *base_link*-Koordinatensystem. Und eines das die quasi kontinuierlichen Daten mit den diskret sprunghaften GNSS-Daten fusioniert und dadurch eine Transformation von *map*-Koordinatensystem in das *odom*-Koordinatensystem errechnet. Nur dadurch ist eine Erfolgreiche Transformation von *base_link*-Koordinatensystem in das *map*-Koordinatensystem möglich.

In Abb. 1. beschreibt den strukturellen Aufbau eines ROS-Lokalisierungsfiltersystem das quasikontinuierlichen Sensordaten mit sprunghaft sich ändernden GNSS-Daten fusioniert. Dieser ist unterteilt in eine Instanz der *ekf_lokalization_node* die Daten der IMU und der Achsen Odometrie des Huskys zu einer Roboterpose fusioniert. Dieser ist in Abbildung 4-1 mit *ekf_local* bezeichnet. Und in eine Instanz der *ekf_lokalization_node* die quasikontinuierlichen Sensordaten mit den von der *navsat_transform_node* transformierten GNSS-Daten fusioniert. Dieser wird in Abbildung 1 mit *ekf_global* bezeichnet. Lokale Pfad- und Bewegungsplanung sollte unter Verwendung der Schätzungsergebnisse des *ekf_local* durchgeführt werden.

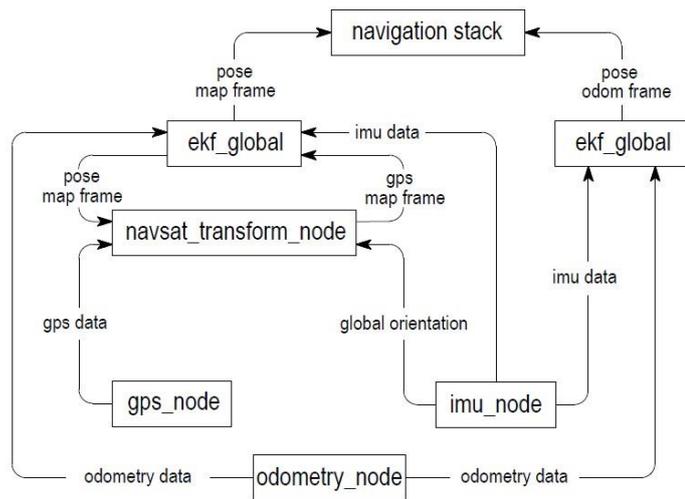


Abb. 1. Filtersystemaufbau um Vereinbarungen in REP-105 zu entsprechen

A. Konfiguration des Lokalen Extended Kalman-Filters

Die Konfiguration der Instanz der lokalen EKF Node lässt sich in drei wesentliche Abschnitte unterteilen [3].

Einmal in die Konfiguration der Koordinatensysteme des Filters, in die Konfiguration der verwendeten Sensordaten und in die Festlegung des Topics der ausgehenden Lokalisierungsschätzung. Es werden die Koordinatensysteme des lokalen EKFs festgelegt und die verwendeten Koordinatensystemnamen werden der *ekf_lokalization_node* mitgeteilt. Diese Instanz der *ekf_lokalization_node* fusioniert die Daten der IMU und der Husky Odometrie. Zusätzlich wird festgelegt, dass das Koordinatensystem der Lokalisierungsschätzungen das *odom*-Koordinatensystem ist.

Die wichtigste Einstellung in diesem Abschnitt ist die Festlegung der *[Sensor]_config* Parameter. Dieser bestehen aus einem 15-dimensionalen binären Vektor und entscheidet

welche Informationen der Sensordaten in die Berechnung des KF mit aufgenommen werden. Zum Beispiel Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit des Gyroskops und die ermittelten Beschleunigungsmesswerte des Beschleunigungsmessers werden in die Berechnung eingehen.

B. Globalen Extended Kalman-Filters

Die Konfiguration der Instanz der globalen EKF Node lässt sich in vier wesentliche Abschnitte unterteilen. Zunächst werden wie bei der lokalen Instanz die Koordinatensysteme des Filters festgelegt. Anschließend werden die Sensordaten mit ihren *[Sensor]_config*-Parametervektoren festgelegt. Anders wie die lokale Instanz wird bei dieser eine Prozessunsicherheitsmatrix Q hinzugefügt. Abschließend werden die berechneten Positionsdaten in ein vom Standard abweichenden Topic umgeleitet. Es werden die verwendeten Koordinatensystemnamen der *ekf_lokalization_node* mitgeteilt. Zusätzlich wird festgelegt, dass das Koordinatensystem der Lokalisierungsschätzungen das *map*-Koordinatensystem ist.

Diese Instanz der *ekf_lokalization_node* fusioniert die Daten der IMU, der Husky Odometrie und die transformierten GNSS-Daten. Die globale Instanz des Filters weist die gleichen Einstellungen wie die lokale Instanz des Filters, in Bezug auf die Daten der IMU und der Husky Odometrie, auf. Zusätzlich werden die *navsat*-transformierten GNSS-Koordinaten unter dem Namen *odom1* hinzugefügt. Der *odom1_config* Parametervektor ist so konfiguriert das nur die transformierten Positionsdaten ($[X, Y, Z, \dots]$) des GNSS in die Filterberechnung eingehen. Die Prozessunsicherheitsmatrix, üblicherweise mit Q bezeichnet, wird verwendet, um die Unsicherheit im Aktualisierungszyklus der Filteralgorithmen zu modellieren. Dieser Parameter ist nicht nötig, kann aber massive Verbesserungen des Vorhersageergebnisses bewirken. In diesem Projekt wurden die Hauptdiagonalwerte der 15x15 Matrix durch mehrfaches Testen an ein gewünschtes Optimum angenähert.

C. Konfiguration der Unscented Kalman-Filter

Der Unscented Kalman-Filter (UKF) wurde von Julier und Uhlmann entwickelt und ist eine weitere Methode, mit der eine Zustandsschätzung in einem stark nichtlinearer Systeme durchgeführt werden kann [4].

UKF verwendet ein lineares Kalman-Filter-Framework und definiert eine Stichprobenauswahlstrategie anstelle der Wahl von zufälligen Stichproben. Die Stichprobenpunkte sind allgemein als Sigma Punkte definiert. Die Anzahl der Stichprobenpunkte in UKF ist gering und hängt von der gewählten Stichprobenstrategie ab. Die Konfiguration der Filtersystemvariante mit den Unscented Kalman-Filtern ist äquivalent zu der EKF-Variante. Es werden lediglich die Namen der verwendeten Nodes von *ekf_lokalization_node* zu *ukf_lokalization_node* geändert und die UKF eigenen Parameter α , β und κ hinzugefügt. Diese UKF-Filtervariante wird in Kapitel 3-Evaluierung mit UKF2D bezeichnet.

D. Konfiguration der navsat_transform_node

Die *navsat_transform_node* ist Bestandteil des *robot_localization* Softwarepakets. Sie ermöglicht die Verwendung von GNSS-Koordinaten, die im *utm*-Koordinatensystem befinde, in einem Fusionsalgorithmen die in anderen Koordinatensystemen arbeitet. Dieses Node benötigt

für ihre Berechnungen Informationen über die globale Orientierung (*sensor_msgs/Imu*), die aktuelle GNSS-Position (*sensor_msgs/NavSatFix*) und die aktuelle Position (*nav_msgs/Odometry*) der geschätzten Position. Diese Informationen werden in der Standardkonfiguration von den Topics */imu/data*, */gps/fix* und */odometry/filtered* bezogen. Unter Berücksichtigung der globalen Orientierungsdaten wird die Empfangene GNSS-Position von dem *utm*-Koordinatensystem in das Koordinatensystem des Positionsschätzers transformiert und im Topic */odometry/gps* zu weiterer Verwendung veröffentlicht. Die Transformationsbeziehung zwischen dem eingangsseitigen Koordinatensystem des Positionsschätzers und dem *utm*-Koordinatensystem wird mit einer *tf2_msgs/TFMessage* unter dem Topic */tf_static* veröffentlicht. Des Weiteren transformiert die Node die Odometriedaten des Positionsschätzers in das *utm*-Koordinatensystem und publiziert diese im Standardtopic */gps/filtered*. Damit ist es möglich diese Positionen auf einer globalen Karte in GNSS-Koordinaten darzustellen.

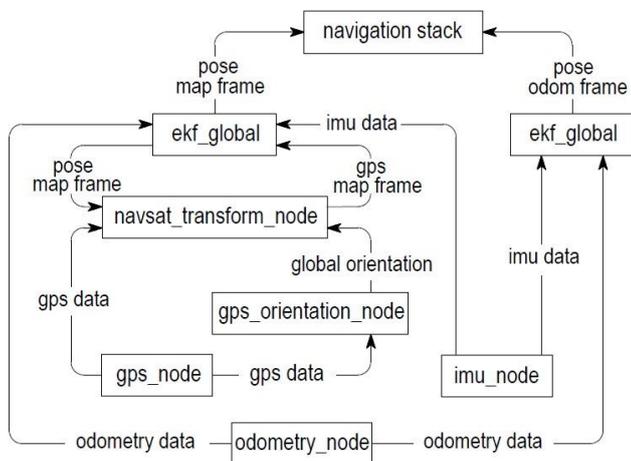


Abb. 2. Filtersystemaufbau unter Verwendung der GNSS-Orientierung anstelle der globalen Orientierung der IMU

Standardmäßig nutzt die *navsat_transform_node* die globalen Orientierungsdaten einer IMU, um die GNSS-Daten in das Zielkoordinatensystem zu transformieren. Hierzu müssen die Orientierungsdaten ausreichend genau sein, besonders die des Yaw-Winkels (Rotationswinkel um die z-Achse eines Roboters). Um eine, für die Transformation, ausreichend hohe Genauigkeit muss die IMU sich mittels Magnetometer kalibrieren. Das fordert eine komplette Rotation um jede Koordinatenachse des Roboters. Da dies nicht möglich ist verzichtet man in dem hier verwendeten Aufbau auf die globalen Orientierungsdaten der IMU. Stattdessen wird die globale Orientierungsreferenz von den GNSS-Daten bezogen. Diese werden von der *gps_orientation_node* bereitgestellt.

Durch diese Änderung verändert sich der Aufbau des in Abbildung 1 dargestellten Filtersystems zu dem Abbildung 2 dargestellten.

E. Konfiguration für eine Lokalisierung in 3 Dimensionen

Die Nodes des *robot_localization* Softwarepaketes weisen jeweils einen Parameter auf, mit der sich die Positionsschätzung in zwei oder drei Dimensionen einstellen lässt. Dieser Parameter ist standardmäßig auf eine Positionsschätzung in zwei Dimensionen eingestellt. Für eine Änderung auf eine dreidimensionale Positionsschätzung muss der Parameter

two_d_mode in den Konfigurationen der *ekf_lokalization_node* und *ukf_lokalization_node* mit dem Wert *false* definiert werden. Außerdem muss in der Konfiguration der *navsat_transform_node* der Parameter *zero_altitude* mit dem Wert *false* definiert werden. Diese dreidimensionale Filtervariante wird in Kapitel Evaluierung mit EKF3D bezeichnet, wohingegen die zweidimensionale Filtervariante mit EKF2D bezeichnet wird.

F. Konfiguration der gps_orientation_node

Die *gps_orientation_node* ist eine eigene für dieses Projekt programmierte Node, die die globale Orientierung anhand der GNSS-Daten bestimmt. Da die Erde eine Kugel ist und GNSS Koordinaten Kugelkoordinaten entsprechen, wird sie zur Bestimmung der globalen Orientierung der sphärischen Geometrie angenommen. Im Allgemeinen ändert sich Ihre aktuelle Orientierung, wenn Sie einem Pfad auf einer Kugel (Orthodrome) folgen (siehe Abbildung 3). Die endgültige Orientierung unterscheidet sich von der ursprünglichen Orientierung in unterschiedlichem Maße je nach Entfernung und Breitengrad.

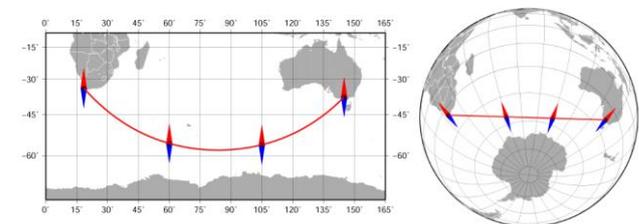


Abb. 3. Darstellung der Änderung der Orientierung beim Folgen einer Orthodrome

G. Das konfigurierte Gesamtsystem

Alle Konfigurationen der einzelnen Nodes sind in einer ROS (Robot Operating System) Launch-Datei zusammengefasst. Diese Launch-Datei startet alle Vorgestellten Nodes und konfiguriert diese gemeinsam. So ist gewährleistet das alle nötigen Teilsysteme während der Verifikationsläufe gestartet sind.

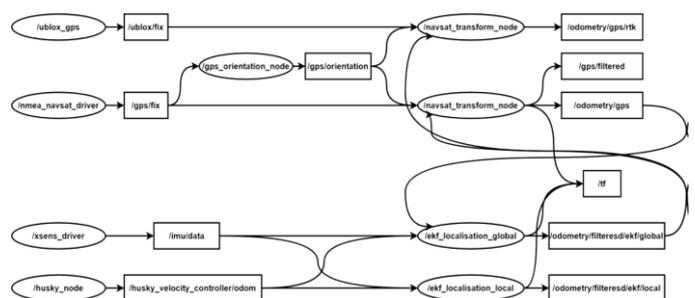


Abb. 4. Darstellung aller Konfigurierten Nodes des Lokalisierungssystems

Details des Hardware- und Softwarewareaufbaus des Robotersystems sind in ausführlich vorgestellt [5].

III. EVALUIERUNG

Nachdem in Kapitel 2 detailliert auf die Konfigurationen der verschiedenen Filteraufbauten eingegangen worden ist, soll nun mit einer Evaluierung eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der Filtersysteme in Hinsicht auf die Genauigkeit der Bestimmung der Roboterposition getroffen werden. In diesem Kapitel werden für jede

Filtersystemkonfiguration mehrere Szenarien vorgestellt. Bei den Untersuchungen und Bewertungen der Ergebnisse sollen unter anderem folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie präzise wird die Position, in Bezug auf den absoluten Positionierungsfehler der mobilen Plattform ermittelt?
- Ist der absolute Positionierungsfehler ausreichend gering für eine Verwendung in weiteren Forschungsprojekten?
- Welche äußeren Einwirkungen haben Einfluss auf die Genauigkeit der Positionslokalisierung?
- Ist Verbesserungspotential im Aufbau der Hardware, im Aufbau der Filtersysteme oder in der Wahl der Softwarepakete zu erkennen?

Als Vergleichssystem in den Evaluierungsszenarien wird das auf dem Roboter verbaute RTK GNSS verwendet.

A. Evaluationsszenarien

Es werden fünf verschiedenen Szenarien vorgestellt mit denen die drei Systemkonfigurationen EKF2D, UKF2D und EKF3D auf ihre Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Genauigkeit der Positionsbestimmung getestet werden.

1) Szenario 1 Einfache Fahrt auf dem Hochschulparkplatz

Das erste vorgestellte Szenario ist eine einfache in sich geschlossene Fahrt auf dem Hochschulparkplatz der Hochschule Offenburg. Das gewählte Szenario befindet sich auf einem ebenen Parkplatz, ohne grobe Hindernisse die GNSS-Signale reflektieren und beinhaltet sowohl Rechts- als auch Linkskurven. Durch das Fahren eines geschlossenen Kreises (engl. closed loop verification), wo der Endpunkt dem Startpunkt entspricht, ist die Differenz dieser zwei Punkte der absolute Fehler der Lokalisierung.

2) Szenario 2 Einfache Fahrt mit sporadischen GNSS-Ausfällen

Das hier vorgestellte Testszenario entspricht dem vorgestellten Szenario 1 mit zwei künstlich eingefügten GNSS ausfällen. Diese Ausfälle wurden sporadisch hinzugefügt und befinden sich nicht an speziell ausgewählten Orten. Dieses Szenario soll das Verhalten der Lokalisierung bei kurzzeitig aussetzendem GNSS aufzeigen.

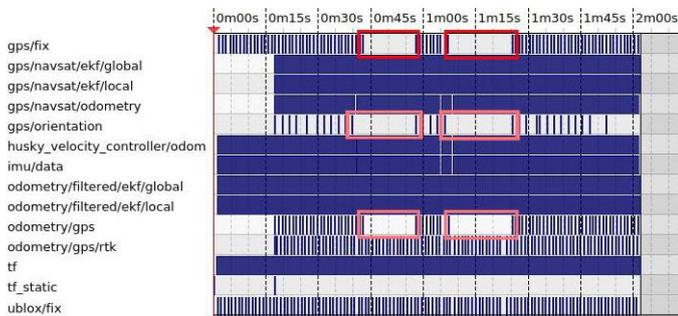


Abb. 5. Ausschnitt des *rqt_bag* Graphen zur Darstellung der künstlich erzeugten GNSS-Ausfälle in den aufgenommenen Rosbag Datei des Szenario 2

In Abb.5 sind die zwei künstlich erzeugten GNSS-Ausfälle mit Rot markiert. Die in helleren rot markierten Lücken in den Datenströmen sind auf das Fehlen der GNSS-Daten zurück zu führen.

3) Szenario 3 Abschattung des GNSS-Signals durch Bäume

Das in diesem Abschnitt vorgestellte Szenario ist wieder eine Fahrt in einem geschlossenen Kreis. Jedoch werden an vereinzelt Stellen die GNSS-Signale von Bäumen oder von einer Überdachung abgeschattet. Dieses Szenario soll das Verhalten des Filtersystems bei Abschattungs- und Multipath-Effekten aufzeigen. Die folgende Abbildung 5-4 zeigt die GNSS-Punkte der RTK-Referenz. Die nachträglich eingefügten grünen Kreise stellen die Position und Größe der dort vorhandenen Bäume dar und soll die Abschattung in diesem Szenario verdeutlichen. Des Weiteren stellt die breite graue Linie eine von dem Gebäude A ausgehende Überdachung dar, die die GNSS-Signale zusätzlich abschattet.



Abb. 6. Darstellung des Szenario 3 auf dem Kartendienstes *openstreetmap.org*

4) Szenario 4 Reflektions-, Mutlipath-Effekte und Ausfall des GNSS durch Gebäude

In diesem Unterkapitel wird das Szenario 4 mit seinen vorhandenen Umgebungseigenschaften und möglichen Schwierigkeiten für das Filtersystem vorgestellt. Das vierte Szenario spielt zwischen drei recht großen Gebäuden der Hochschule Offenburg (siehe Abbildung 5-5). Außerdem führt ein Teil der Strecke durch das Gebäude E des Campus. Der Weg zum dargestellten Gebäude E weist eine Steigung auf, die zusätzlich zu Fehlern in der Positionsbestimmung führen kann.

5) Szenario 5 Steigungen und leichte Abschattung durch Bäume

Das letzte Testszenario besteht aus zwei Teilen. Eine Hälfte des Szenarios 5 besteht aus der Fahrt auf dem flachen Hochschulparkplatz. Die andere Hälfte besteht aus einem 1,4 m hohen (Höhe gemessen ab Parkplatz) Damm, der auf einer Seite eine Steigung von 44° aufweist. Auf der anderen Seite weist er eine Steigung von ca. 23° auf. Das Ziel dieses Szenarios besteht darin die Lokalisierungsergebnisse bei sich schnell änderndem Nick- Winkel und bei sich ändernder Höhe zu prüfen.

B. Zweidimensionaler Extended Kalman-Filter

In diesem Unterkapitel wird der EKF2D auf seine Leistungsfähigkeit in verschiedenen Szenarien geprüft. Hierzu werden die absoluten Fehler der gefahrenen Testszenarien aufgelistet. Die gesamte Gegenüberstellung aller Ergebnisse der fünf Szenarien sind in abgebildet. Die Spalte der IMU+Odometrie spiegeln das Ergebnis des lokalen EKF wider wohingegen die Spalte GPS+IMU+Odometrie den Ergebnissen des globalen EKF entsprechen.

TABELLE 1. ABSOLUTER FEHLER VON LOKALEN UND GLOBALEN EKF DER EKF2D KONFIGURATION

Szenarien EKF2D	GPS+IMU+Odometrie, m	IMU+Odometrie, m
Szenario 1	1,7988	4,7057
Szenario 2	1,5305	5,7222
Szenario 3	2,6144	31,3333
Szenario 4	2,6144	33,511
Szenario 5	3,1064	14,946

1) Ergebnis EKF2D Szenario 1

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der EKF2D Konfiguration auf das Szenario 1 betrachtet. Es wird grafisch die zurückgelegte Strecke und die Positionsunsicherheit in Form der Kovarianz grafisch dargelegt.

In Abb. 7 sind die Positionsdaten des RTK-Referenz, Arduino GNSS, lokalen EKF's und globalen EKF's zu erkennen. Die dargestellten Kreise entsprechen den Fixpunkten der GNSS-Empfänger. Die roten Kreise sind der RTK-Referenz zugeordnet wohingegen die blauen Kreise dem Arduino GNSS zugeordnet werden können. Die grüne Linie entspricht dem Ergebnis des lokalen EKF's (IMU+Odometrie). Die blaue Linie entspricht dem Positionsergebnis der globalen EKF's (GNSS+IMU+Odometrie). Es ist zu erkennen das der Graph des lokalen EKF eine gewisse Ähnlichkeit aufweist und der absolute Positionsfehler eines geschlossenen Kreises nur 4,7057 m beträgt, aber die gefahrene Strecke nicht ansatzweise der tatsächlichen entspricht. Aus diesem Grund ist die alleinige Verwendung des lokalen EKF nicht für eine Lokalisierung ausreichend.

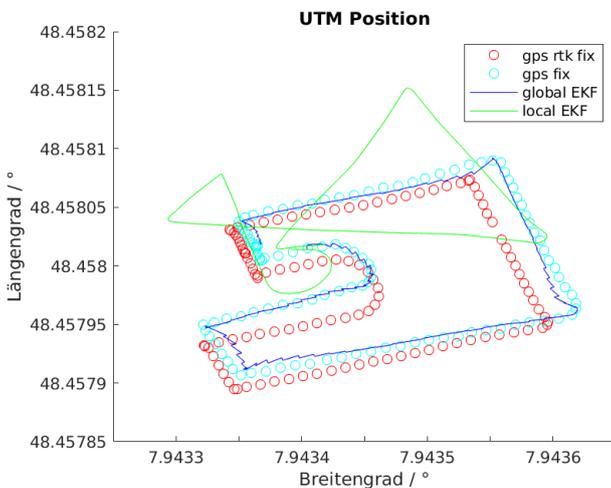


Abb. 7. Darstellung der Ergebnisse des EKF2D angewandt auf das Szenario 1

2) Ergebnis EKF2D Szenario 4

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der EKF2D Konfiguration auf das Szenario 2 betrachtet. Abb. 8 zeigt die Ergebnisse des EKF2D auf das Szenario 4.

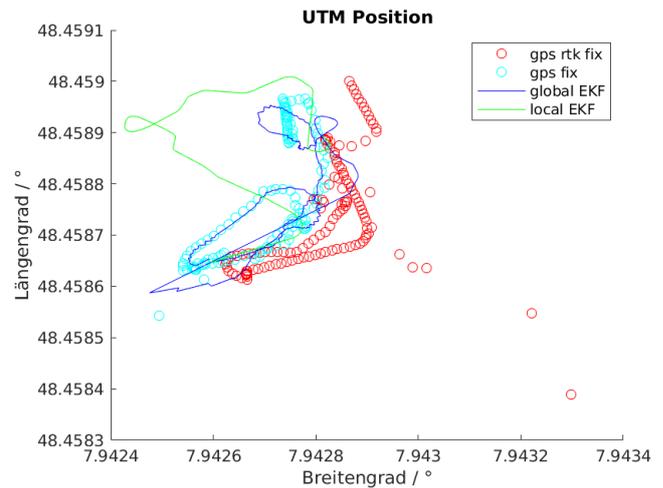


Abb. 8. Darstellung der Ergebnisse des EKF2D angewandt auf das Szenario 2

Vergleicht man die Markierungen der RTK-Referenz mit dem beschriebenen Fahrtweg wird deutlich, dass die umliegenden Gebäude die GNSS-Daten stark beeinflussen. Da zusätzlich die Fehler in den GNSS-Daten vom System nicht erkannt werden und die Kovarianzmatrix konstant bleibt, wird das Ergebnis des globalen EKF's maßgeblich falsch beeinflusst was zu einem unbrauchbaren Ergebnis der Lokalisierung führt.

C. Zweidimensionaler Unscented Kalman-Filter

In diesem Unterkapitel wird der UKF2D auf seine Leistungsfähigkeit in verschiedenen Szenarien geprüft. Hierzu werden die absoluten Fehler der gefahrenen Testszenarien aufgelistet. Die gesamte Gegenüberstellung aller Ergebnisse der fünf Szenarien sind in Tabelle 2 abgebildet.

TABELLE 2. ABSOLUTER FEHLER VON LOKALEN UND GLOBALEN UKF DER UKF2D KONFIGURATION

Szenarien UKF2D	GPS+IMU+Odometrie, m	IMU+Odometrie, m
Szenario 1	1,6024	5,1368
Szenario 2	1,1562	6,3161
Szenario 3	7,4512	31,256
Szenario 4	3,2923	34,092
Szenario 5	2,8231	12,874

D. Dreidimensionaler Extended Kalman-Filter

In diesem Abschnitt wird der EKF3D auf seine Leistungsfähigkeit in verschiedenen Szenarien geprüft. Hierzu werden die absoluten Fehler der gefahrenen Testszenarien aufgelistet. Die gesamte Gegenüberstellung aller Ergebnisse der fünf Szenarien sind in Tabelle 3 abgebildet.

TABELLE 3. ABSOLUT FEHLER VON LOKALEN UND GLOBALEN UKF DER UKF3D KONFIGURATION

Szenarien EKF3D	GPS+IMU+ Odometrie, m	IMU+Odometrie, m
Szenario 1	7,2528	22,364
Szenario 2	8,2917	27,279
Szenario 3	12,412	85,544
Szenario 4	2,8495	48,941
Szenario 5	9,9951	31,845

Ergebnis EKF3D Szenario 5

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der EKF3D Konfiguration auf das Szenario 5 betrachtet. Es werden grafisch die Positionen des RTK-Referent und des globalen EKF in Abb. 9 dargestellt. Der grüne Punkt markiert den Startwert der Schätzung und der magentafarbene Punkt markiert die Position am Ende des Szenarios.

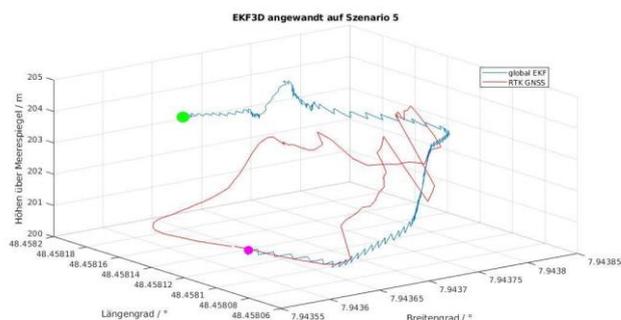


Abb. 9. Dreidimensionale Darstellung der Ergebnisse des EKF3D angewandt auf das Szenario 5

Untervernachlässigung der Höhendifferenz zwischen der Positionsschätzung und der Position des RTK GNSS ähnelt die Form des blauen Grafen in der ersten Hälfte des Szenarios sehr der wahren gefahren Strecke. Die in der zweiten Hälfte des Szenarios aufgetretene abrupten Positionsänderungen des RTK GNSS sind einer Abschattung und/oder durch Reflexion verursacht. In dieser Hälfte entspricht die EKF-Schätzung tendenziell eher dem Pfad des Szenario 5.

Aus den Daten des globalen EKF geht eine Steigung für den in Szenario 5 vorkommenden Damm von $47,654^\circ$ und $20,166^\circ$ hervor. Das entspricht einer relativen Abweichung von 8,3 % für das hinauf fahren des Damms und einer relativen Abweichung von 12,3 % für die geringere Steigung beim Herabfahren. Zudem ergab der Filteralgorithmus einen geschätzten Höhenunterschied von 1,12397 m. Das entspricht einer relativen Abweichung von 19,7 % zu der zuvor ermittelten Dammhöhe.

E. Vergleich EKF2D, UKF2D und EKF3D

Nun wird der Vergleich zwischen den drei Konfigurationsvarianten EKF2D, UKF2D und EKF3D gezogen. Es wird jedoch nur ein Vergleich zwischen den Ergebnissen des globalen EKF gezogen, da sich die Ergebnisse des lokalen EKF für nicht ausreichend genau erwiesen. Diese weisen zwar einen akzeptablen Endpositionsfehler auf, aber weichen zwischenzeitlich sehr stark von der wahren Position ab. Dies macht die Ergebnisse des lokalen EKF für eine Positionsbestimmung unbrauchbar und muss aus den genannten Gründen nicht in die folgenden Vergleiche aufgenommen werden. Die Ergebnisse des Szenario 4 durch sehr starke Reflexions- und Multipath-Effekte unbrauchbar gemacht und werden deswegen im folgenden auch Vergleich vernachlässigt.

Abb. 10 stellt die Endpositionsabweichungen der Filterkonfigurationen unterteilt in die fünf Szenarien dar. Es ist deutlich ersichtlich, dass die Fehleranfälligkeit bei der Schätzung in drei Dimensionen erhöht ist. Dies ist auf den weiteren Freiheitsgrad der Berechnung zurückzuführen.

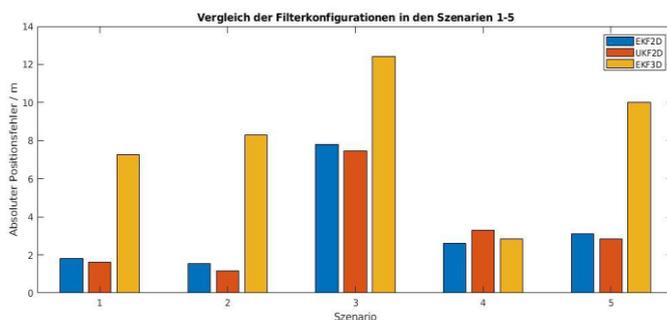


Abb. 10. Darstellung der Endpositionsabweichungen der Verschiedenen Konfigurationen aufgezeigt pro Szenario

Des Weiteren ist zu erkennen das Szenario 2 keinen großen Abweichungen zu Szenario 1 aufweist. Das bedeutet das kurzzeitige GNSS ausfälle zwar kurzzeitige Positionsfehler hervorrufen (siehe Anhang H.2 und I.2), jedoch durch das Wiedereintreffen von GNSS-Daten die Position schnell korrigiert wird. Aus Szenario 3 lässt sich ablesen, dass die Abschattung zwar die Lokalisierung ungenauer machen, diese aber dennoch möglich ist (siehe Anhang H.3 und I.3). Eine Umgebung mit viel Potenzial für Reflexionen (Szenario 4) hingegen verhindert die Lokalisierung dauerhaft. Da die Verwendung von sehr stark verzerrten GNSS-Daten unbrauchbare Ergebnisse erzeugen.

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Fazit

Abschließend kann zusammengefasst werden das alle drei Konfigurationen eine mehr oder weniger genaue Lokalisierung ermöglichen. Die UKF2D Konfiguration erreicht bessere Endpositionsergebnisse, weicht jedoch zwischenzeitlich sehr stark von der wahren Position ab. Dahingegen liegt die Schätzung der EKF2D Konfigurationsvariante, trotz durchschnittlich 17,3 % hoher Endpositionsabweichung, deutlich besser an der wahren Position. Die Ergebnisse des dreidimensionalen EKF Variante EKF3D hingegen weisen einen sehr hohen Fehler auf und eignen sich, in dieser Konfiguration nicht für eine genaue Lokalisierung. Die besten Lokalisierungsergebnisse erbringt der zweidimensionale EKF. Dieser erwies sich am robustesten und am genauesten gegenüber den zwei anderen Varianten. Es werden akzeptable Ergebnisse auch bei erschwerten Bedingungen gebildet, beispielsweise durch schweres Gelände, vereinzelt Bäume und Überraschungen. Jedoch erwiesen sich alle Varianten für unbrauchbar in Regionen, die sehr starke Reflexion- und Multipath-Effekte aufweisen. Einzelne kurzzeitige GNSS ausfälle hingegen beeinflussen das Ergebnis nur dahingehend, dass während des GNSS-Ausfalls der globale EKF dem Ergebnis des lokalen EKF folgt. Das führt dazu, dass das Ergebnis beginnt zu driften. Dieses Verhalten wird jedoch beim Eintreffen neuer GNSS-Daten korrigiert.

Ausblick

Eine interessante Möglichkeit die Lokalisierung Ergebnisse verbessern zu können wäre das Verwenden noch weiterer Sensoren. Dahingehend könnte untersucht werden, wie stark eine visuelle Odometrie mittels einer oder mehrere Kameras die Lokalisierungsergebnisse verbessern würde. Oder zu was für eine Verbesserung die Verwendung von Sensoren zu Höhen Ermittlung (bspw. Barometer) oder globalen Orientierung (bspw. Magnetometer), insbesondere in der dreidimensionalen Anwendung führt.

ACKNOWLEDGMENT

The research is carried out within the frames of the contract № 222ПД0014-03, Scientific and Research Sector at the Technical University of Sofia.

REFERENCES

- [1] Clearpath Robotics Inc., "Husky UGV - Outdoor Field Research Robot by Clearpath".
- [2] Wim Meeussen, "REP 105 -- Coordinate Frames for Mobile Platforms (ROS.org)".
- [3] Welch, G., Bishop, G, "An introduction to the Kalman filter," in SIGGRAPH 2001, August 12-17, Los Angeles, CA, 2001
- [4] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "New extension of the Kalman filter to nonlinear systems," in AeroSense '97, Orlando, FL, USA, 1997.
- [5] S. Hensel, M. B. Marinov and M. Schmitt, "Experimental Setup for Investigation and Evaluation of a Mapping and Localization System," in Proceedings of the 9th FDIBA Conference - Challenges of the Digital World, Sofia, Bulgaria, 28–29 November 2019.
- [6] T. Schneider, M. Dymczyk, M. Fehr, K. Egger, S. Lynen, I. Gilitschenski and R. Siegwart, "maplab: An Open Framework for Research in Visual-inertial Mapping and Localization," CoRR, vol. abs/1711.10250, 2017
- [7] S. Hensel, M. K. C. Marinov and D. Trendafilov, "Experimental Setup for Testing and Evaluation of Kalman Filter Configurations," in FDIBA Conference, Sofia, 2022.