

MOBILE ROBOTIK – PROJEKTARBEIT

LOKALISIERUNG EINES MOBILEN ENDGERÄTES MITTELS GPS UND INERTIALSENSORIK

Im Rahmen dieser Projektarbeit soll die Bewegung einer mobilen Plattform durch bordfeste Sensoren aufgezeichnet und anschließend durch geeignete Auswertelgorithmen rekonstruiert und visualisiert werden.

Mobile Plattform

Es wird eine Roboterplattform angenommen, die sich im dreidimensionalen Raum translatorisch und rotatorisch frei bewegen kann (6 Freiheitsgrade - 6 DoF). Die Plattform sei mit einem GPS-Empfänger sowie einer Inertialmesseinheit (IMU) ausgestattet, welche Drehraten und Beschleunigungen in jeweils drei orthogonalen Raumachsen erfasst. Da diese Sensoren auch in handelsüblichen Smartphones und Tablet-Computern integriert sind, wird im Projekt stellvertretend für einen mobilen Roboter ein solches Endgerät verwendet. Mit Hilfe einer Android-App wurden bereits verschiedene Messdatensätze aufgezeichnet, die zusammen mit den Belegunterlagen zur Verfügung gestellt werden. Bei Bedarf können Sie die Sammlung mit Hilfe der ebenfalls zur Verfügung gestellten App *Nav-Sense* und Ihres eigenen Android-Gerätes erweitern.

Sensoren

Aufgrund der geringen Abmessungen des mobilen Endgerätes kann der räumliche Versatz der einzelnen Sensoren zueinander vernachlässigt werden. Wir nehmen stattdessen an, dass alle Sensoren im Ursprung des Gerätekoordinatensystems (=körperfestes System $\{\mathbf{B}\}$) platziert sind.

Jeder Messwert ist mit einem Zeitstempel versehen. Diese sind für die Auswertung unbedingt notwendig, denn es ist weder garantiert, dass einzelne Sensoren in äquidistanten Zeitintervallen Messwerte liefern, noch sind die verschiedenen Sensoren untereinander synchronisiert.

GPS-Receiver: Der GPS-Receiver ermittelt aus den Signalen mehrerer Satelliten die eigene Position sowie Geschwindigkeit auf der Erde. Hier soll jedoch nur die Positionsinformation verwertet werden. Darüber hinaus liefert der Receiver auch eine Abschätzung der horizontalen Genauigkeit, die von der momentanen Satellitenkonfiguration abhängt. Für die vertikale Genauigkeit wird im Rahmen dieses Projektes die Hälfte der horizontalen Genauigkeit angenommen.

Drehratensensoren: Die Drehratensensoren bestimmen die inertialen Winkelgeschwindigkeiten ${}^{\mathbf{B}}\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{IB}}$ um die drei Raumachsen des körperfesten (=sensorfesten) Koordinatensystems. Als wesentliche Fehlereinflüsse sind den realen Drehraten ein mittelwertfreies weißes Rauschen sowie ein Offset (Bias) überlagert, der sowohl vom jeweiligen Sensor als auch von verschiedenen Umgebungsbedingungen abhängt (z. B. Temperatur). Diese Fehlereinflüsse müssen zunächst abgeschätzt und später kompensiert werden (siehe Aufgabe 1).

Beschleunigungssensoren: Die Beschleunigungssensoren messen die inertialen Beschleunigungen ${}^{\mathbf{B}}\mathbf{a}_{\mathbf{IB}}$ entlang der drei Raumachsen des sensorfesten (=körperfesten) Koordinatensystems. Auch hier sind ein Offset sowie Rauschen überlagert. Die Abschätzung der Fehlergrößen des Beschleunigungssensors ist bereits implementiert.

Messdatenverarbeitung

Mittels eines erweiterten Kalman-Filters (EKF) sollen aus den Messdaten die Zeitverläufe der Position ${}^{\mathbf{N}}\mathbf{r}_{\mathbf{NB}}(t)$, der translatorischen Geschwindigkeit ${}^{\mathbf{N}}\mathbf{v}_{\mathbf{NB}}(t) = \dot{{}^{\mathbf{N}}\mathbf{r}_{\mathbf{NB}}}(t)$ sowie der Lage ${}^{\mathbf{N}}\mathbf{q}_{\mathbf{B}}(t)$ der mobilen Plattform rekonstruiert werden. Die Bezeichnungen der beteiligten Koordinatensysteme sowie die Nomenklatur für Vektoren werden wie folgend definiert:

	Position	Geschwindigkeit	Beschleunigung
Translation	${}^C\mathbf{r}_{AB} = [{}^C\mathbf{r}_{AB_x} \ {}^C\mathbf{r}_{AB_y} \ {}^C\mathbf{r}_{AB_z}]^T$ <p>Vektor von A nach B (bzw. vom Ursprung des Systems {A} zum Ursprung des Systems {B}), dargestellt im System {C}</p>	${}^C\mathbf{v}_{AB} := {}^C\dot{\mathbf{r}}_{AB}$ <p>Translatorische Geschwindigkeit des Systems {B} bezüglich {A}, dargestellt im System {C}</p>	${}^C\mathbf{a}_{AB} := {}^C\dot{\mathbf{v}}_{AB}$ <p>Translatorische Beschleunigung des Systems {A} bezüglich {B}, dargestellt im System {C}</p>
Rotation	${}^B_A\mathbf{q} = [{}^B_Aq_1 \ {}^B_Aq_2 \ {}^B_Aq_3 \ {}^B_Aq_4]$ bzw. B_AR <p>Quaternion bzw. Rotationsmatrix, beschreibt die Lage von {A} in/bezüglich {B}. Der Realteil des Quaternions ist B_Aq_4</p>	${}^C\boldsymbol{\omega}_{AB}$ <p>Drehrate des Systems {B} bzgl. {A}, dargestellt in {C}</p>	

Die verwendeten Koordinatensysteme sind in Abbildung 1 zusammengefasst:

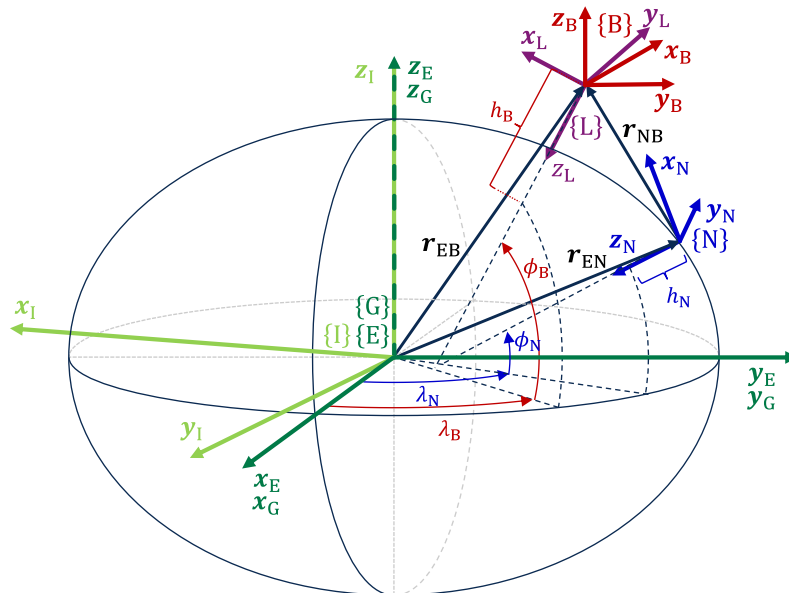


Abbildung 1: Koordinatensysteme

- {I}** Inertialsystem, dessen Ursprung im Erdmittelpunkt verankert ist. Das System dreht sich nicht mit der Erde mit!
- {E}** Earth-Centered-Earth-Fixed (ECEF) System, welches ebenfalls im Erdmittelpunkt verankert ist. Dieses System folgt jedoch der Erddrehung, wobei die Drehrate gegenüber {I} mit ${}^E\boldsymbol{\omega}_{IE} = [0, 0, 7.27 \times 10^{-5}]^T$ in Relation zu den betrachteten Vorgängen sehr gering ist. Für den Beleg ist es daher sinnvoll ${}^E\boldsymbol{\omega}_{IE} \approx \mathbf{0}$ und somit $\{E\} \approx \{I\}$ anzunehmen!
- {G}** Geodätisches Koordinatensystem, das zu {E} äquivalent ist, aber eine Position nicht durch $x_E/y_E/z_E$ -Koordinaten sondern durch einen Längengrad λ , einen Breitengrad ϕ und eine Höhe h parametrisiert.
- {N}** North-East-Down (NED) System, welches an einem beliebigen Punkt auf der Erdoberfläche fixiert ist. Üblicherweise verwendet man den *Startpunkt* der mobilen Plattform als Ursprung. Die $x_N/y_N/z_N$ -Achsen zeigen dem Namen entsprechend nach Norden/Osten/Unten. Somit bestimmt die Ursprungsposition \mathbf{r}_{EN} auch eindeutig die Lage ${}^E_N\mathbf{q}$ gegenüber dem System {E}.
- {L}** Lokales System, dessen Ursprung im Körperschwerpunkt der mobilen Plattform fixiert ist und sich mit der Plattform mitbewegt. Die Koordinatenachsen von {L} drehen sich jedoch nicht mit der Plattform, sondern zeigen wie die Achsen von {N} nach Norden/Osten/Unten. Die Lage ${}^E_L\mathbf{q}$ ist damit wie auch bei {N} eindeutig durch die Ursprungsposition \mathbf{r}_{EL} (=Plattformposition) festgelegt. Für den typischen Fall, dass {N} und {L} in Relation zu den Abmessungen der Erde in geringem Abstand voneinander positioniert sind, gilt ${}^E_L\mathbf{q} \approx {}^E_N\mathbf{q}$.
- {B}** Body-System = körperfestes System der mobilen Plattform, das sich mit der Plattform mitbewegt ($\mathbf{r}_{EB} = \mathbf{r}_{EL}$) und dreht (${}^E_L\mathbf{q} \neq {}^E_B\mathbf{q}$).

Unter Verwendung dieser Nomenklatur und der definierten Koordinatensysteme setzt sich der Zustandsvektor des zu implementierenden Filters folgendermaßen zusammen:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{N} \mathbf{r}_{\mathbf{NB}}^T \mathbf{N} \mathbf{v}_{\mathbf{NB}}^T \mathbf{N} \mathbf{q}^T]^T = [\mathbf{N} \mathbf{r}_{\mathbf{NB}_x} \mathbf{N} \mathbf{r}_{\mathbf{NB}_y} \mathbf{N} \mathbf{r}_{\mathbf{NB}_z} \mathbf{N} \mathbf{v}_{\mathbf{NB}_x} \mathbf{N} \mathbf{v}_{\mathbf{NB}_y} \mathbf{N} \mathbf{v}_{\mathbf{NB}_z} \mathbf{N} \mathbf{q}_1 \mathbf{N} \mathbf{q}_2 \mathbf{N} \mathbf{q}_3 \mathbf{N} \mathbf{q}_4]^T \in \mathbb{R}^{10}$$

Das System $\{\mathbf{N}\}$ wird wie üblich am Startpunkt der Plattform fixiert, d. h. $\mathbf{r}_{\mathbf{EN}} = \mathbf{r}_{\mathbf{EB}}(\mathbf{0}) = \mathbf{r}_{\mathbf{EL}}(\mathbf{0})$. Die Systemeingänge werden von den Beschleunigungs- und Drehratensensoren der Inertialmesseinheit (IMU) bereitgestellt:

$$\tilde{\mathbf{u}} = [\mathbf{B} \tilde{\mathbf{a}}_{\mathbf{IB}}^T \mathbf{B} \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathbf{IB}}^T]^T = [\mathbf{B} \tilde{\mathbf{a}}_{\mathbf{IB}_x} \mathbf{B} \tilde{\mathbf{a}}_{\mathbf{IB}_y} \mathbf{B} \tilde{\mathbf{a}}_{\mathbf{IB}_z} \mathbf{B} \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathbf{IB}_x} \mathbf{B} \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathbf{IB}_y} \mathbf{B} \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathbf{IB}_z}]^T \in \mathbb{R}^6$$

Der GPS-Empfänger liefert Messungen der Ausgangsgrößen:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{G} \tilde{\mathbf{r}}_{\mathbf{EB}}^T = [\tilde{\boldsymbol{\phi}}_{\mathbf{B}} \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{h}}_{\mathbf{B}}]^T \in \mathbb{R}^3$$

Zur Umrechnung zwischen den Koordinatensystemen sowie für weitere Details zum erweiterten Kalman-Filter sei auf den Foliensatz zur Vorlesung *Localization II* und Hilfsblatt verwiesen.

Beschreibung der Projektdateien

Die Projektarbeit ist wie auch die Übungsaufgaben unter Verwendung von Matlab zu lösen. Die Projekt-Dateien werden über das Git-Repository zur Lehrveranstaltung verteilt. Aktualisieren Sie daher bitte zunächst Ihre Kopie des Repositories. Die relevanten Dateien sind im Unterordner `project` abgelegt. Dort finden Sie eine Reihe von Matlab-Dateien, die in der folgenden Tabelle kurz beschrieben sind. In der letzten Spalte ist die Aufgabe angegeben, in der die jeweilige Datei vervollständigt werden muss. Ist hier keine Nummer eingetragen, müssen Sie an der Datei keine Änderungen vornehmen.

Datei	Beschreibung	Aufg.
launcher.m	Grafische Benutzeroberfläche („Projektlauncher“, siehe Abb. 2) zum Parametrieren und Starten von Experimenten. Alle Aufgaben können über diese Oberfläche gestartet werden.	-
project.m	Hauptdatei zum Prozessieren und Visualisieren von Experimentdaten. Gewöhnlich wird diese Datei über die grafische Oberfläche gestartet. Für spezielle Experimentkonfigurationen kann sie aber auch direkt aus der Matlab-Konsole oder eigenen Skripten aufgerufen werden. Für Aufruf-Beispiele siehe launcher.m.	-
wCalibration.m	In dieser Datei sollen Rausch- und Offset-Parameter des Drehratensensors berechnet werden.	1a
aCalibration.m	In dieser Datei ist die Berechnung der Rausch- und Offset-Parameter für den Beschleunigungssensor implementiert.	-
WGSpos2ECEFpos.m	Umrechnung zwischen einer geodätischen Position $\mathbf{G} \mathbf{r}$ in WGS84-Darstellung in eine Position $\mathbf{E} \mathbf{r}$ in ECEF-Darstellung.	2
WGSpos2NEDquat.m	Bestimmung des Lage-Quaternions $\mathbf{E} \mathbf{q}(\mathbf{G} \mathbf{r})$ eines NED-Systems zu einer vorgegebenen geodätischen Position $\mathbf{G} \mathbf{r}$	2
System_dx.m	Nichtlineare Systemfunktion $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ des zeitkontinuierlichen Systems	3a
System_A.m	Matrix $\mathbf{A} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x}$ des linearisierten zeitkontinuierlichen Systems	3a
System_B.m	Matrix $\mathbf{B} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{u}$ des linearisierten zeitkontinuierlichen Systems	3a
System_N.m	Kovarianzmatrix $\mathbf{N} = \mathbf{cov}(\tilde{\mathbf{u}})$ der Messungen der Systemeingänge	1b
System_y.m	Nichtlineare Ausgangsfunktion $\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x})$ des Systems	4a
System_C.m	Ausgangsmatrix $\mathbf{C} = \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x}$ des Systems	4a
System_W.m	Kovarianzmatrix $\mathbf{W} = \mathbf{cov}(\tilde{\mathbf{y}})$ der Messungen der Systemausgänge	4b

Weiterhin finden Sie im Repository diverse Ordner mit Testdatensätzen (Ordnername entspricht Zeitstempel der Experimentaufzeichnung). Diese werden von Projektlauncher automatisch eingelesen und angezeigt. Bitte nehmen Sie in diesen Ordnern keine Änderungen vor! Zur Aufzeichnung eigener Datensätze muss die Android-App *Navsense.apk* auf dem eigenen Android-Mobilgerät installiert sein.

Aufgezeichnete Experimente können als zip-Archiv aus der App heraus z. B. per E-Mail oder via Dropbox auf den Rechner übertragen werden. Verwenden Sie anschließend die Schaltfläche *.zip im Projektlauncher, um das Experiment in das Arbeitsverzeichnis zu entpacken.

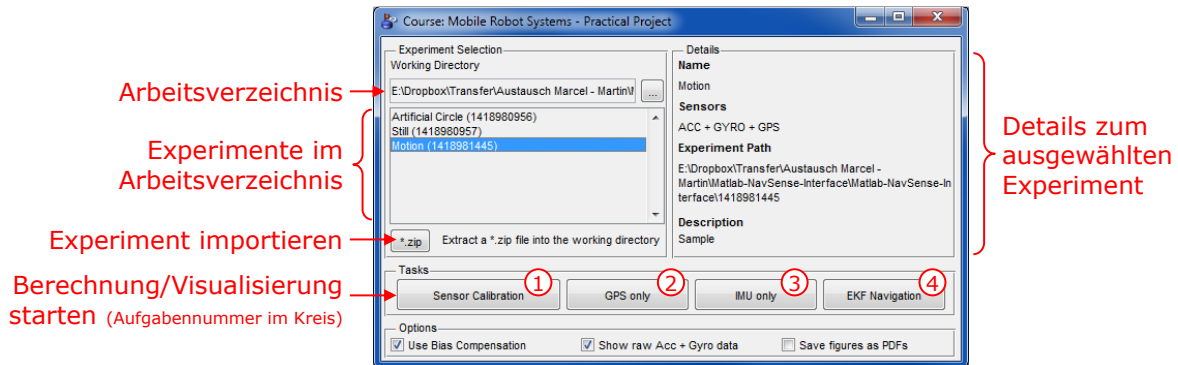


Abbildung 2: Projektlauncher: Grafische Benutzeroberfläche launcher.m

Abgabe der Projektergebnisse

Lösen Sie die unten aufgeführten Aufgaben durch Vervollständigen der angegebenen Dateien. Prüfen Sie, ob die Ergebnisse Ihren Erwartungen und den vorgegebenen Kontrollabbildungen entsprechen.

Ergänzen Sie unbedingt die Informationen in der Datei Abgabeinformationen.txt wie folgt:

Nachname: Mustermann

Vorname: Max

Matrikelnummer: 1234567

Studiengang: Beispielstudiengang

Immatrikulationsjahr: 1234

Zur Abgabe der Projektarbeit komprimieren Sie den Ordner project als zip-Archiv und benennen es „NachnameVorname.zip“. Senden Sie diese Datei mit dem Betreff „**Projekt Mobile Robotik**“ an chao.yao@tu-dresden.de. Ihre E-Mail sollte die folgende Form haben:

Empfänger: chao.yao@tu-dresden.de

Betreff: Projekt Mobile Robotik

Anhang: MustermannMax.zip

Text: - leer -

Sollten Sie symbolische Berechnungen durchführen, so fügen Sie diese dem zip-Archiv bei. Ansonsten bitten wir Sie ausdrücklich auf umfangreiche Ausführungen oder zusätzliche Dateien zu verzichten! Diese werden nicht beachtet oder bewertet.

Achten Sie in jedem Falle auf die Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit der von Ihnen hinzugefügten Code-Abschnitte und stellen Sie sicher, dass der abgegebene Quellcode fehlerfrei ausführbar ist.

Aufgabe 1 – Ermittlung von Offset und Messrauschen des Drehratensensors

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, sind die gemessenen Drehraten mit einem konstanten Offset (Bias) und einem mittelwertfreien weißen Rauschen überlagert. Durch Bestimmung der Mittelwerte sowie der Standardabweichungen aus den Messwertverläufen eines Experiments ohne Eigenbewegung des Mobilgerätes können die Parameter dieser Fehlereinflüsse näherungsweise bestimmt werden. Ein derartiges Experiment mit der Bezeichnung „Still“ ist Teil der Belegunterlagen.

- Vervollständigen Sie die Datei `wCalibration.m`, um den Bias \mathbf{b}_ω sowie die Standardabweichung σ_ω aus dem Messwertverlauf von ω zu berechnen.
Führen Sie anschließend im Projektlauncher für das Experiment „Still“ die Funktion *Sensor Calibration* aus. Wenn die angezeigten Werte Ihren Erwartungen entsprechen, speichern Sie diese zur zukünftigen Verwendung, indem Sie den angezeigten Dialog mit „Yes“ bestätigen.
- Implementieren Sie innerhalb der Datei `System_N.m` die Berechnung der Kovarianzmatrix \mathbf{N} der Eingangsmessungen.

Aufgabe 2 – Rekonstruktion des Positionsverlaufs aus GPS-Messungen

In dieser Aufgabe soll der Verlauf der Position ${}^E\mathbf{r}_{EB}$ nur aus GPS-Messungen rekonstruiert werden. Der GPS-Empfänger gibt die Position jedoch in geodätischen Koordinaten ${}^G\mathbf{r}_{EB} = [\phi_B \ \lambda_B \ h_B]^T$ (Längen-/Breitengrad und Höhe) aus. Implementieren Sie deren Umrechnung in das ECEF-System in der Datei `WGSpos2ECEFpos.m`.

Implementieren Sie außerdem die Berechnung der Lage des lokalen NED-Systems ${}^E\mathbf{q}$ bezüglich des Erdsystems in der Datei `WGSpos2NEDquat.m`.

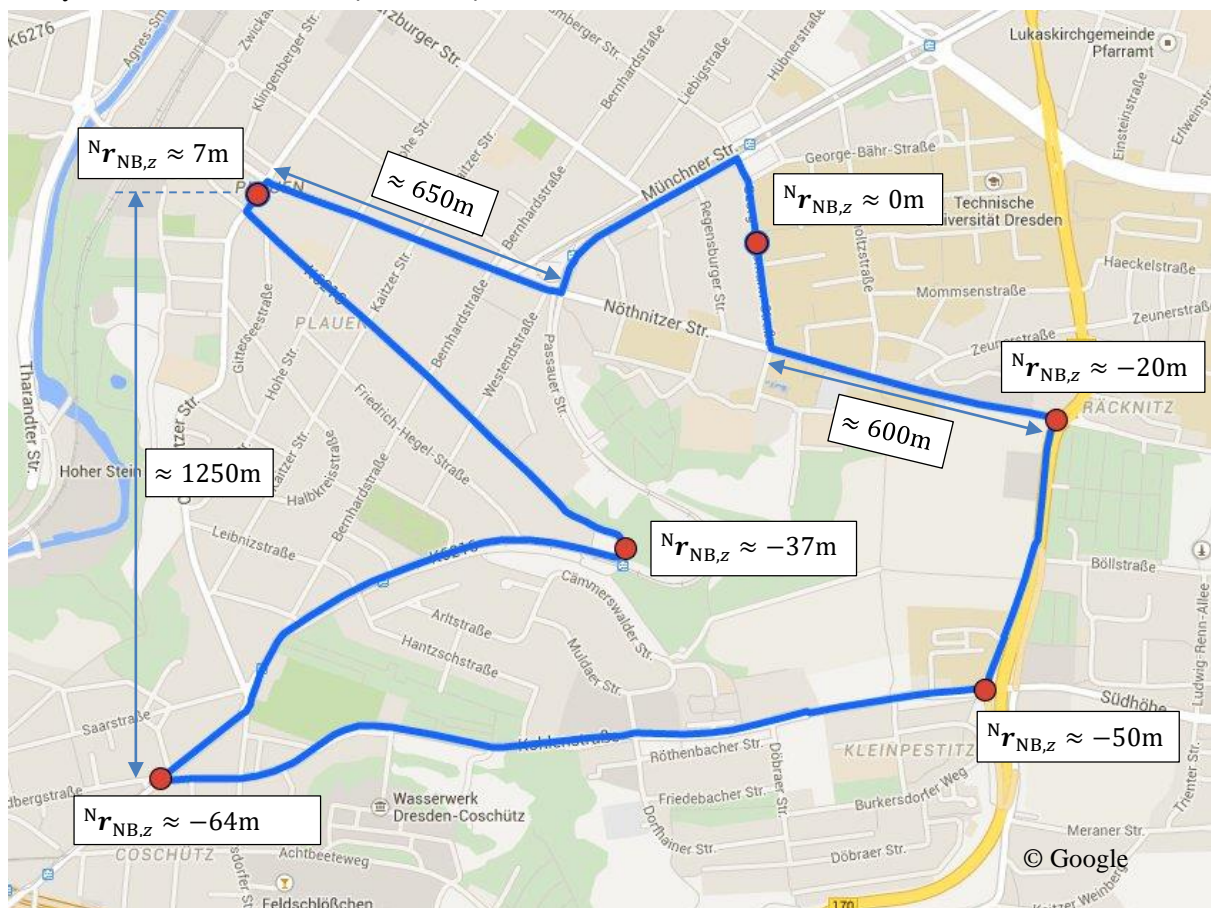


Abbildung 3: Fahrtroute für das Experiment „Motion“

Überprüfen Sie Ihre Implementierung, indem Sie im Projektlauncher für das Experiment „Motion“ die Funktion *GPS only* ausführen. Die angezeigte Trajektorie (Fenster „3D GPS Trajectory“) sollte nun

der in Abbildung 3 dargestellte Fahrtroute entsprechen! Vergleichen Sie die in Abbildung 3 markierten Höhen und Abmessungen mit Ihrer Lösung. (Die angegebenen Höhen sind den fehlerbehafteten GPS-Messungen entnommen und weichen daher ggf. von der tatsächlichen geographischen Höhe ab.) Neben dem Trajektorienverlauf wird für jeden GPS-Messpunkt auch das lokale NED-System dargestellt. Überprüfen Sie, ob die dargestellte Lage des Koordinatensystems sinnvoll ist.

Aufgabe 3 – Rekonstruktion des Zustandsverlaufs aus IMU-Messungen

Der Zustand (relativ zum Startwert) kann durch Integration der Beschleunigungs- und Drehratenmessungen rekonstruiert werden. Dies entspricht einem Kalman-Filter ohne Korrekturschritt. Hierbei akkumulieren sich jedoch prinzipbedingt Fehler, sodass über einen längeren Zeitraum ein Wegdriften der Systemgrößen zu erwarten ist. Wie sich zeigen wird, ist dieser Effekt auch nur bedingt kompensierbar. Als Vorbereitung auf das vollständige EKF in Aufgabe 4 sollen hier die erforderlichen Zusammenhänge für den Prädiktionsschritt implementiert werden.

- (a) Bestimmen Sie zunächst die nichtlinearen zeitkontinuierlichen System-Differentialgleichungen $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ des kinematischen Modells und implementieren Sie diese in der Datei `System_dx.m`. Ermitteln Sie anschließend die Matrizen $\mathbf{A} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x}$ und $\mathbf{B} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{u}$ des linearisierten zeitkontinuierlichen Systems und implementieren Sie diese in den Dateien `System_A.m` und `System_B.m`. Die Berechnung der Systemmatrizen \mathbf{F} und \mathbf{H} des zeitdiskretisierten Systems aus \mathbf{A} und \mathbf{B} ist bereits vorgegeben.
Testen Sie die Prädiktion mit Hilfe der synthetischen Trajektorie „Artificial Circle“ durch Auswahl der Funktion *IMU only* im Projektlauncher. Bei korrekter Implementierung sollte sich das dargestellte Body-System auf einer horizontalen Kreisbahn bewegen. Ist dies nicht der Fall, korrigieren Sie bitte Ihre Systemgleichungen, bevor Sie mit weiteren Teilaufgaben fortfahren. Beachten Sie, dass Fehler aus den Systemgleichungen ggf. auch in die Systemmatrizen eingeflossen sein können.
- (b) Testen Sie Ihre Implementierung nun mit realen Messdaten aus dem Experiment „Still“ (keine Bewegung, nur Offset und Messrauschen, vgl. Aufgabe 1).
Wählen Sie wieder die Funktion *IMU only* im Projektlauncher. Achten Sie darauf, dass das Häkchen bei der Option *Use Bias Compensation* gesetzt ist.
- (c) Deaktivieren Sie nun zu Testzwecken die Option *Use Bias Compensation* und führen Sie das Experiment erneut durch. Wie bewerten Sie die Ergebnisse von (b) und (c)?

Aufgabe 4 –EKF mit Prädiktion und Korrektur

Die Ergebnisse aus den Aufgaben 2 und 3 sollen nun zu einem vollständigen EKF kombiniert werden.

- (a) Bestimmen Sie die nichtlinearen Ausgangsgleichungen $\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x})$ sowie die linearisierte Ausgangsmatrix $\mathbf{C} = \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x}$ und vervollständigen Sie die Dateien `System_y.m` und `System_C.m` entsprechend.
- (b) Implementieren Sie die Kovarianzmatrix \mathbf{W} der Ausgangsmessungen innerhalb der Datei `System_W.m`. Beachten Sie dabei, dass der GPS-Receiver die Positionsmessunsicherheit im lokalen NED-System $\{\mathbf{L}\}$ ausgibt, während die eigentliche Positionsrückkopplung in einem anderen Koordinaten vollzogen wird!

Wählen Sie im Projektlauncher das Experiment „Motion“ und starten Sie die Funktion *EKF Navigation*, um die vollständige Navigationslösung zu testen. Das Android-Smartphone befand sich zur Aufnahme dieser Trajektorie annähernd aufrecht und mit dem Display Richtung Innenraum am Armaturenbrett eines PKW. Sie sollten diese Ausrichtung nun auch in der angezeigten Trajektorie (Fenster „EKF Filter: 3D Position & Attitude“) erkennen können. Diese Lagebeobachtbarkeit wird erst durch die Sensorfusion möglich. Die Ergebnisse der Aufgaben 2 und 3 bestätigen, dass die Lageinformation nicht verfügbar ist, wenn nur GPS- oder IMU-Messdaten verwendet werden.