



UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES
UPPER AUSTRIA

MASTERSTUDIENGANG

Robotic Systems Engineering

KSS4 Sensorkalibrierung und Kalman-Filter

Als LABORPROTOKOLL eingereicht

zur Erlangung des akademischen Grades

?? Akademischer Grad ??

von

Radlberger Paul / Gehmayr Emmanuel

Februar 2020

Betreuung der Arbeit durch

Ing. Michael Zauner BSc MSc

1 Aufgabenstellung

1.1 Laborübung 1 - Sensorkalibrierung

Aufgabe der Laborübung ist es geeignete Messungen mit der IMU durchzuführen um diese aufgrund der gemessenen Signale kalibrieren zu können. Beim Kalibriervorgang sollten sowohl der Offsetfehler, als auch der Skalierungsfehler der einzelnen Sensorachsen korrigiert werden. Außerdem sollten zusammengehörige Sensordaten auf einen Referenzwert normiert werden (z.B. Beschleunigungssensoren in x-,y- und z-Achse auf den Wert $9,81 \frac{m}{s^2}$), um ein korrektes Messergebnis gewährleisten zu können. Die Sensoren sollen auch bezüglich ihrer Varianz beurteilt werden. Um die systematischen Fehler der Sensoren zu korrigieren sollen zunächst eine Reihe von Messungen durchgeführt werden. Alle Messungen sind in Tabelle 1.1 gelistet.

Messung	Durchführung	Dauer
1	Messung der Erdbeschleunigung in positive x-Richtung	30 s
2	Messung der Erdbeschleunigung in positive y-Richtung	30 s
3	Messung der Erdbeschleunigung in positive z-Richtung	30 s
4	Messung der Erdbeschleunigung in negative x-Richtung	30 s
5	Messung der Erdbeschleunigung in negative y-Richtung	30 s
6	Messung der Erdbeschleunigung in negative z-Richtung	30 s
7	Messung des Magnetfeldes in x-, y- und z-Richtung – Sensor wird dabei um alle Achsen zufällig rotiert	60 s
8	Messung der Drehraten um die x-, y- und z-Achse – Sensor wird dabei nicht bewegt!	30 s

Tabelle 1.1: Messungen zur Sensorkalibrierung

1.1.1 Abgleich Beschleunigungssensor

Für die Kalibrierung des Beschleunigungssensors werden die Messungen 1-6 aus Tabelle 1.1 herangezogen. Als Referenzwert für die Kalibrierung wird die Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ verwendet, welche stets konstant ist und bei entsprechender Orientierung der IMU immer nur entlang einer der drei Koordinatenachsen wirkt. Aus jeweils einem Paar von Messungen (z.B. aus den Messungen 1 und 4) können a_{\min} und a_{\max} berechnet werden, wobei a_{\min} und a_{\max} jeweils aus dem Mittelwert der Messfolge jener Koordinatenachse sind. Anschließend kann der durchschnittliche Endausschlag bei voller Erdbeschleunigung

a_{peak} ermittelt werden.

$$a_{peak} = \frac{|a_{min}| + |a_{max}|}{2} \quad (1.1)$$

Über den Referenzwert g kann anschließend der Skalierungsfaktor für die Normierung (s_{norm}) berechnet werden.

$$s_{norm} = \frac{g}{a_{peak}} \quad (1.2)$$

Der entsprechende normierte Offsetabgleich lässt sich wie folgt berechnen berechnen.

$$a_{off} = (a_{max} - a_{peak}) \cdot s_{norm} \quad (1.3)$$

Der korrigierte Wert a_{ist} kann aus dem Messwert a_m berechnet werden.

$$a_{ist} = a_m \cdot s_{norm} - a_{off} \quad (1.4)$$

Diese Vorgehensweise ist für jede Achse durchzuführen.

1.1.2 Abgleich Magnetometer

Für die Kalibrierung des Magnetometers wird Messung 7 aus Tabelle 1.1 herangezogen. Als Referenzwert für die Kalibrierung kann die mittlere Stärke des Erdmagnetfeldes in Mitteleuropa m_e verwendet werden. Dies beträgt 48 μT . Aus jeweils der Messfolge der jeweiligen Koordinatenachse kann m_{min} und m_{max} bestimmt werden, wobei m_{min} und m_{max} über eine Maximalwertsuche bzw. eine Minimalwertsuche bestimmt wird. Analog zu den für den Beschleunigungssensor durchgeführten Berechnungen lassen sich anschließend auch für das Magnetometer die Kalibrierwerte über die nachfolgenden Formeln berechnen.

$$m_{peak} = \frac{|m_{min}| + |m_{max}|}{2} \quad (1.5)$$

$$m_{norm} = \frac{m_e}{m_{peak}} \quad (1.6)$$

$$m_{off} = (m_{max} - m_{peak}) \cdot s_{norm} \quad (1.7)$$

$$m_{ist} = m_m \cdot s_{norm} - m_{off} \quad (1.8)$$

1.1.3 Abgleich Gyroskope

Für die Kalibrierung des Gyroskops wird die Messung 8 aus Tabelle 1.1 herangezogen. Da keine definierte Drehbewegung um eine Koordinatenachse im Labor durchgeführt werden

kann, kann kein Referenzwert für das Gyroskop bestimmt werden. Aus diesem Grund kann die Skalierung des Gyroskops nicht kalibriert werden. Beim Gyroskop kann lediglich ein Offsetabgleich durchgeführt werden. Da sich bei den Messungen 8 der Sensor in Ruhelage befand, muss die Winkelgeschwindigkeit gleich Null sein. Durch Mittelwertbildung über die Messwertfolgen der Winkelgeschwindigkeiten können die Offsetwerte aller Achsen berechnet werden.

$$\omega_{ist} = \omega_m - \omega_{off} \quad (1.9)$$

1.1.4 Temperaturabgleich

Es wird eine Messreihe der kalibrierten Werte aufgenommen. Dabei wird der Sensor auf eine maximale Temperatur von 80 °C erwärmt. Im Anschluss können alle Einzelsensorwerte über der Temperatur dargestellt werden und eine Ausgleichsfunktion bestimmt werden.

1.1.5 Bestimmung der Varianz der einzelnen Sensoren

Für Bestimmung der Varianz kann die Messung 8 aus Tabelle 1.1 herangezogen werden.

1.2 Laborübung 2 - Kalman Filter

Es soll ein Kalman-Filter in Matlab implementiert werden:

1. Prädiktor-Schritt:

Bestimmung des Neigungswinkel mit Hilfe des Gyroskops.

$$\bar{\mu}_{t+1} = A \cdot \mu_t + B \cdot u_{t+1} \quad (1.10)$$

$$\bar{\Sigma}_{t+1} = A \cdot \Sigma_t \cdot A^T + \Sigma_u \quad (1.11)$$

2. Korrektur-Schritt:

Die Korrektur des Neigungswinkel wird mit Hilfe des berechneten Winkels der Beschleunigungssensoren durchgeführt.

$$K_{t+1} = \bar{\Sigma}_{t+1} \cdot H^T \cdot (H \cdot \bar{\Sigma}_{t+1} \cdot H^T + \Sigma_z)^{-1} \quad (1.12)$$

$$\mu_{t+1} = \bar{\mu}_{t+1} + K_{t+1} \cdot (z_{t+1} - H \cdot \bar{\mu}_{t+1}) \quad (1.13)$$

$$\Sigma_{t+1} = (I - K_{t+1} \cdot H) \cdot \bar{\Sigma}_{t+1} \quad (1.14)$$

Die Matrizen für die Drehbewegung um eine Achse können wie folgt eingegeben werden (siehe Skript):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Um eine Überprüfung der Funktionalität des zu implementierenden Kalman-Filters durchzuführen zu können, sollen IMU-Messungen, wie in Tabelle 1.1 angegeben, aufgenommen werden. Es werden zuerst Messungen aufgenommen, in welcher nur rotatorische Bewegungen getätigt wurden (Messung 1 - 3). In Messung 4 soll gezeigt werden, dass störende Querschleunigungen kompensiert werden können.

Messung	Durchführung	Dauer
1	Rotation um die x-Achse ($\pm 45^\circ$)	30 s
2	Rotation um die y-Achse ($\pm 45^\circ$)	30 s
3	Rotation um die z-Achse ($\pm 45^\circ$)	30 s
4	Rotation um die x-Achse und gleichzeitiges Bewegen in die positive und negative y-Richtung	30 s

Tabelle 1.2: Messungen zur Überprüfung des Kalman- Filters

2 Erfassung der Messwerte

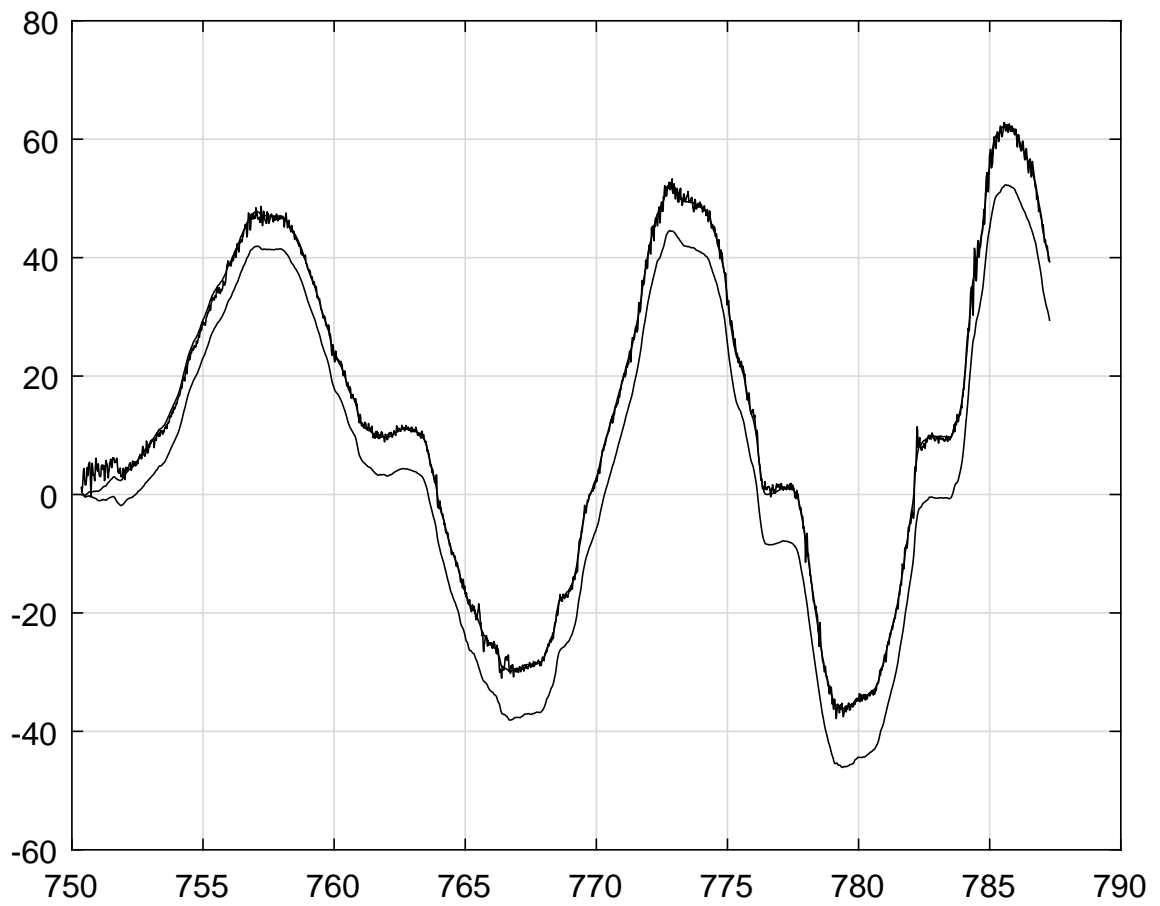


Abbildung 2.1: Grafik1

```
1 function [mue,integ_phi] = Kalman(u,z,Kov_u,Kov_z,dt)
2
3     A = [1 -dt;0 1];
4     B = [dt;0];
5     H = [1 0];
6     mueq = [0;0];
7     Kovq = [1 0;0 1];
8     Kov = [1 0;0 1];
9     K = [0;0];
10    mue = zeros(2,length(u));
11    integ_phi = zeros(length(u),1);
12
13    for t = 1:length(u)-1
14
15        integ_phi(t+1) = integ_phi(t) + u(t)*dt;
16
17        %Praediktor - Schritt
18
19        mueq = A*mue(:,t) + B*u(t);
20        Kovq = A*Kov*transpose(A) + Kov_u;
21
22        %Korrektur - Schritt
23
24        K = Kovq*transpose(H)*(H*Kovq*transpose(H)+Kov_z)^-1;
25        mue(:,t+1) = mueq+K*(z(t+1)-H*mueq);
26        Kov = (eye(2)-K*H)*Kovq;
27
28    end
29
30
31 end
```

Abbildung 2.2: Grafik2

3 Abkürzungsverzeichnis [optional]

Abkürzung	Erklärung

Das Abkürzungsverzeichnis kann bei einer Vielzahl von Abkürzungen verwendet werden. Sortieren Sie das Abkürzungsverzeichnis nach Fertigstellung in alphabetischer Reihenfolge.

4 Abbildungsverzeichnis [optional]

2.1	Grafik1	5
2.2	Grafik2	6

Das Abbildungsverzeichnis kann bei einer Vielzahl von Abbildungen verwendet werden.

5 Literaturverzeichnis

Nachstehend finden Sie zwei Muster-Literaturverzeichnisse, die die wichtigsten Arten von Veröffentlichungen abdecken (reine Internet-Quelle, Norm, Monografie, Aufsatz in einem Sammelband, technische Regel, Zeitschriftenaufsatz). Informationen zu weiteren Publikationstypen finden Sie für das Deutsche in der unten genannten ONR 12658, für das Englische in der unten genannten ISO 690. Beide Regelwerke sind in der Bibliothek des FH-OÖ-Campus Wels einsehbar.

5.1 Literaturverzeichnis bei Nutzung von Quellenangaben im Text (PDK) oder in der Fußnote (MEWI)

5.2 Literaturverzeichnis bei Nutzung von Quellenangaben in Form von Zahlen in eckigen Klammern (VTP, MEWI, MKT)

Erscheinungsbild

Das Aussehen des Literaturverzeichnisses hängt von der Zitierweise ab, die Sie in Ihrer wissenschaftlichen Arbeit anwenden müssen [siehe Abschnitt ?? auf S. ??].

Gliederung

Das Literaturverzeichnis kann bei Bedarf in folgende Unterkapitel untergliedert werden:

- Primärliteratur
- Sekundärliteratur
- Tertiärliteratur

Literaturrecherche

Auf den Internetseiten der Bibliothek des FH-OÖ-Campus Wels finden Sie eine sehr übersichtliche Liste mit zahlreichen Links zu:

- elektronischen Zeitschriften
- Datenbanken
- zahlreichen Bibliotheken
- Katalogen des Buchhandels
- Patentgesellschaften

Die MitarbeiterInnen der Bibliothek unterstützen Sie gerne bei der Literaturrecherche.