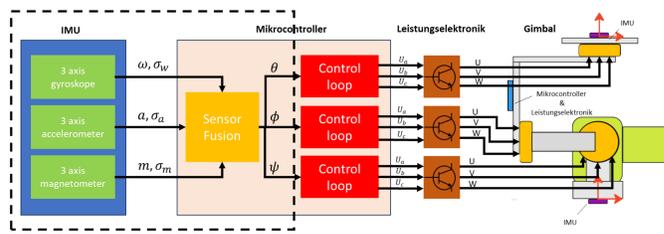


SENSOR FUSION AUF EINEM µC

BERECHNUNG DER ORIENTIERUNG EINES OBJEKTES DURCH EINE 9 DOF-IMU

Dominik Zovko (MME), Daniel Koch (MME)
Betreuer: Prof. Dr. Gimpel

1. Ziel der Projektarbeit



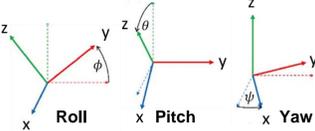
Das Projektziel war die Entwicklung eines Kamerastabilisators (Gimbal), der eine Kamera trotz Bewegungen des Trägersystems stabil hält. Dies wird durch Korrekturen basierend auf der aktuellen Orientierung erreicht. Aufgrund der Komplexität konzentrierten wir uns auf die Implementierung eines Sensor Fusion Prinzips zur Bestimmung der Kameraorientierung, berechnet auf einem Mikrocontroller.

2. Theoretische Grundlagen

0 – Orientierung im Raum:

Die Raumorientierung ist essentiell in Robotik und Mechatronik, speziell bei Stabilisierungssystemen wie Gimbals. Sie bezieht sich auf die Ausrichtung eines Objekts (Body-frame) zum Ursprungskordinatensystem (Inertial-frame). Zwei Methoden zur Beschreibung der Rotation sind gebräuchlich:

1. **Euler-Winkel:** Drei Winkel repräsentieren Drehungen um die Achsen des Koordinatensystems, oft als Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel bezeichnet. Eine Euler-Transformation wandelt Euler-Winkelgeschwindigkeiten in Körpergeschwindigkeiten um und umgekehrt. Ein Nachteil ist das Gimbal-Lock-Phänomen, bei dem zwei Rotationsachsen kollinear ausgerichtet werden und ein Freiheitsgrad verloren geht.



2. **Quaternionen:** Diese Erweiterung der komplexen Zahlen stellt Raumrotationen effizient dar und vermeidet den Gimbal-Lock. Trotz ihrer Effizienz sind sie mathematisch komplex und für Anwendungen wie Gimbals mit mechanischen Drehbeschränkungen möglicherweise überdimensioniert. Daher haben wir uns für die intuitivere Euler-Winkel-Darstellung entschieden.

1 – Aufbau und Funktionsweise einer IMU:

Eine 9DOF IMU (Inertial Measurement Unit) ist ein elektronisches Gerät, das drei Sensoren kombiniert: ein Dreiachs-Gyroskop, einen Dreiachs-Beschleunigungsmesser und ein Dreiachs-Magnetometer.

- Der **Beschleunigungsmesser** misst die lineare Beschleunigung entlang der X-, Y- und Z-Achsen. Er kann dynamische Beschleunigungen (verursacht durch Bewegung oder Vibrationen) und statische Beschleunigungen (wie die Schwerkraft) erfassen. Durch Messung der Schwerkraft kann der Neigungswinkel des Geräts im Ruhezustand bestimmt werden. Allerdings ist er anfällig für Fehler durch dynamische Bewegungen und Vibrationen.
- Das **Gyroskop** erfasst die Winkelgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der sich das Gerät um jede seiner drei Achsen dreht. Durch Integration der gemessenen Winkelgeschwindigkeiten über die Zeit kann die aktuelle Ausrichtung des Geräts bestimmt werden. Jedoch neigen seine Messungen dazu, im Laufe der Zeit zu drifteten.
- Das **Magnetometer** misst das Magnetfeld entlang der drei Achsen und kann die Ausrichtung des Geräts relativ zum Erdmagnetfeld bestimmen, ähnlich wie ein Kompass. Es ist jedoch anfällig für magnetische Störungen.

Jeder dieser Sensoren hat spezifische Stärken und Schwächen. Durch die Kombination ihrer Daten in einem **Sensorfusion-Algorithmus** können die Vorteile jedes Sensors genutzt und seine Schwächen ausgeglichen werden.

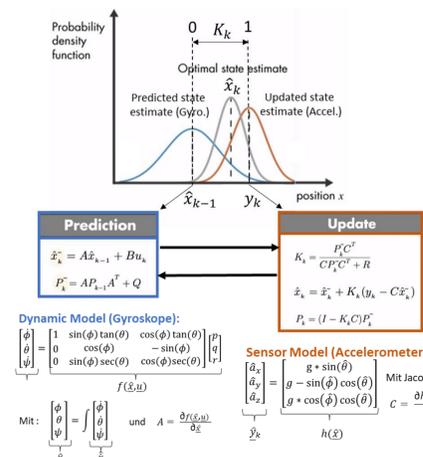
2 – Sensor Fusion Algorithmen:

Sensorfusion-Algorithmen kombinieren Daten aus mehreren Sensoren, um eine genaue Zustandsschätzung eines Systems zu erreichen. Dabei werden Modellunsicherheiten und Messfehler berücksichtigt. Für die Datenfusion einer IMU sind Methoden, die auf Wahrscheinlichkeitstheorie, Bayes'scher Inferenz und Gauß'scher Verteilung basieren, besonders geeignet. Diese probabilistischen und statistischen Ansätze ermöglichen eine effektive Modellierung und Handhabung von Unsicherheiten. Zu den gängigsten Methoden gehören **Kalman-Filter**, **Extended Kalman Filter (EKF)**, **Mahony-Filter**, **Madgwick-Filter**, **Komplementärfilter** und **Unscented Kalman Filter**.

3 – Sensor Fusion Konzept zur Bestimmung der Euler-Winkel:

Das Konzept der Sensorfusion zur Ermittlung der Euler-Winkel stützt sich hauptsächlich auf den erweiterten Kalman-Filter (EKF) und dem Komplementärfilter. Durch die Kombination von Beschleunigungsmesser und Gyroskop wird eine optimale Schätzung von Roll- und Pitch-Winkeln erreicht. Der Yaw-Winkel wird durch einen Komplementärfilter geschätzt, der auf der Vorhersage des EKF und einem Sensormodell des Magnetometers basiert.

1. Roll und Pitch Schätzung mittels Extended Kalman Filter (EKF)



Der **Extended Kalman Filter (EKF)** ist eine Erweiterung des klassischen Kalman Filters, der entwickelt wurde, um nichtlineare Systeme zu behandeln. Die grundlegende Idee des Kalman Filters und auch des EKF besteht darin, eine Vorhersage über den aktuellen Zustand des Systems zu treffen und diese Vorhersage dann mit den tatsächlichen Messdaten zu aktualisieren. Das geschieht in zwei Schritten: Der Vorhersage (Predict) und der Aktualisierung (Update).

Predict: In der Vorhersagephase wird der aktuelle Zustand des Systems basierend auf dem vorherigen Zustand und dem Systemmodell vorhergesagt. Da das Systemmodell im Fall des EKF nichtlinear ist, wird eine Linearisierung durchgeführt. Dies wird üblicherweise durch die Berechnung der Jacobimatrix, die die erste Ableitung des Systems repräsentiert, erreicht. Dieser Schritt generiert die vorhergesagte Zustandsschätzung und die vorhergesagte Kovarianz.

Update: In der Aktualisierungsphase wird die vorhergesagte Zustandsschätzung mit den tatsächlichen Messdaten verglichen. Die Abweichung zwischen der Vorhersage und den tatsächlichen Messdaten wird als Innovation bezeichnet. Diese Innovation wird dann genutzt, um die Zustandsschätzung und die Kovarianz zu aktualisieren.

2. Yaw Schätzung mittels Komplementärfilter

Der Yaw-Winkel, vorhergesagt durch den erweiterten Kalman-Filter (EKF), neigt zur zeitlichen Drift. Um dies auszugleichen, wird im Aktualisierungsschritt der Yaw-Winkel aus Magnetometerdaten berechnet und mit dem EKF-Wert gewichtet kombiniert. Zwei Ansätze zur Yaw-Berechnung wurden betrachtet und verglichen:

- Erzeugung zweier orthogonaler Vektoren durch Kreuzprodukte des Magnetfeld- und Gravitationsvektors. Der Yaw-Winkel wird durch den arctan2 des projizierten Magnetfeldvektors auf die durch die orthogonalen Vektoren definierte Ebene berechnet.
- Drehung des Magnetfeldvektors mittels Rotationsmatrizen um Pitch und Roll ins Inertial-Frame, gefolgt von einer Yaw-Berechnung mittels Arctan-Funktion. Hierbei wird der Yaw-Winkel als Winkel zwischen projiziertem Magnetfeldvektor und Nordrichtung berechnet.

4. Ergebnisse

Messaufbau: Zur Validierung der Messergebnisse kommen 3D-gedruckte Bauteile zum Einsatz (rechts zu sehen). Die Sensoren sind auf einem Kunststoffblock montiert. Eine Winkelvorlage beinhaltet mehrere Schrägen mit 0°, 15°, 45° und 80°.

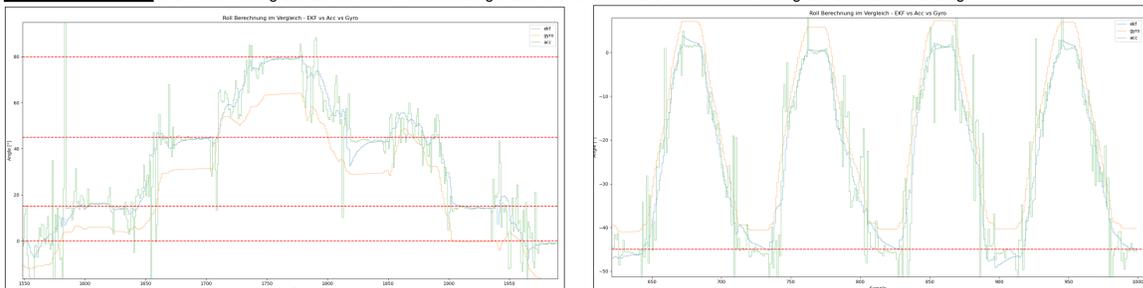
Validierung Extended Kalman Filter (Pitch- und Roll-Auslenkung):

- statisch:** Der Sensorblock wird nacheinander in die verschiedenen Schrägen eingelegt, sodass er sich immer um eine Achse dreht. Zunächst wird um die Pitch-Achse gedreht und im Anschluss um die Roll-Achse.
- dynamisch:** Der Sensorblock wird in der Mitte der Winkelvorlage auf den Kanten der 45°-Schräge platziert, sodass er parallel zur Tischkante steht und um 0° ausgelenkt ist. Aus dieser Ausgangsstellung heraus, wird er durch eine Drehbewegung in die 45°-Schräge gedrückt. Danach wird der Block - mit einer etwa gleichbleibenden Frequenz - zwischen diesen zwei Stellungen bewegt.

Messergebnisse:

- statisch:** Die statische Messung zeigt, dass der EKF die Winkel korrekt berechnet, auch wenn das Gyro bereits weg gedriftet ist. Außerdem sind die Ergebnisse deutlich rauschärmer als die Winkelberechnungen aus den Beschleunigungssensordaten.
- dynamisch:** Im Grunde genommen ist das selbe Verhalten wie bei der statischen Messungen festzustellen.

Zusammenfassung: Die Fusionierung der Sensordaten erzielt eine genauere und vertrauensvollere Bestimmung der Sensorausrichtung.



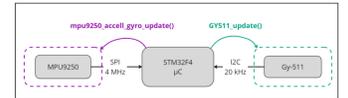
Vergleich der verschiedenen Winkelberechnungsarten. Blau: EKF-Berechnung, orange: Integrierte Gyroskop-Messdaten, grün: Trigonometrische Umrechnung der Beschleunigungsmesswerte
*die roten Linien markieren die Schrägen der Winkelvorlage (0°, 15°, 45°, 80°). Linkes Bild: statische Messung, rechtes Bild: dynamische Messung

3. Umsetzung und Probleme

Hardware: Als **Mikrocontroller** wird ein in der Industrie weit verbreiteter STM32 eingesetzt, der einen ARM-Cortex M4 Mikroprozessor mit einer FPU (Floating Point Unit) beinhaltet. Die **MPU9250** kombiniert einen Beschleunigungs-, Drehraten- und Magnetsensor und unterstützt das SPI-Protokoll, welches aufgrund der hohen Performanceanforderungen geeignet ist. Außerdem werden die Messdaten direkt über einen DMA Port auf dem µC in den RAM geladen, um die CPU zu entlasten. Wird die MPU9250 im SPI-Mode eingesetzt, können die Magnetometer Daten nicht parallel ausgelesen werden. Dafür wird zusätzlich das Magnetometer **GY511** verwendet, das jedoch nur über eine I2C-Schnittstelle verfügt. Da wir die Sensordaten des Magnetometers jedoch nur im Update-Step des EKF's auslesen, ist die Übertragung mittels I2C ausreichend.

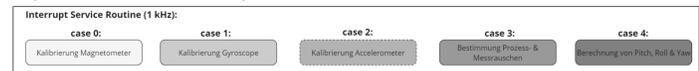
Hardware/Software Interface:

Die Treiber zur Kommunikation über SPI und I2C sind in C (Bare Metal) programmiert. Im rechten Schaubild ist die Kommunikation der Hardware mittels der erstellten Funktionen abstrakt dargestellt.



Software:

Die feldorientierte Regelung der Elektromotoren ist zeitkritisch und sollte möglich echtzeitfähig sein. Auftretende Latenzen könnten eine ruckelfreie Videoaufnahme gefährden. Daher muss das Auslesen und Auswerten der Sensordaten innerhalb eines festen Zeitrahmens geschehen. Für die Umsetzung wird ein Timer verwendet, der einen Software-Interrupt mit einer Frequenz von 1 kHz auslöst. In der ISR (Interrupt Service Routine) wird ein Zustandsautomat implementiert, da im Vorfeld der eigentlichen Messung noch Kalibrierungen durchgeführt werden müssen. Folgende Zustände werden dabei durchlaufen.



0 – Kalibrierung Magnetometer:

Ein Magnetometer muss kalibriert werden, um Störungen zu korrigieren, die durch Hard- und Soft-Iron-Effekte verursacht werden. Diese Störungen können das vom Magnetometer gemessene Magnetfeld verzerren und führen zu Ungenauigkeiten in den Messdaten. Dieses Verhalten beobachteten wir ebenfalls in unseren Messungen, deren Grafiken nachfolgend aufgeführt sind.

- Hard-Iron-Verzerrungen:** Hard-Eisen-Störungen entstehen durch magnetische Materialien in der Nähe des Sensors, die ein ständiges Magnetfeld erzeugen. Dies führt zu einer ständigen Abweichung der Messwerte in eine bestimmte Richtung, was als Nullpunktverschiebung bezeichnet wird. Die Kalibrierung kann dazu beitragen, diese konstante Abweichung zu korrigieren, um den Nullpunkt des Sensors zu bestimmen.

- Soft-Iron-Verzerrungen:** Diese entstehen durch Materialien, die das Magnetfeld verzerren, aber kein eigenes Magnetfeld erzeugen. Sie führen dazu, dass das gemessene Magnetfeld nicht mehr ein perfekter Kreis ist, sondern eine Ellipse. In einem idealen System ohne Störungen würde das Magnetometer bei einer Drehung um 360 Grad einen perfekten Kreis aufzeichnen. In Anwesenheit von Soft-Eisen-Störungen wird dieser Kreis jedoch zu einer Ellipse verzerrt.

Messdaten Aufbereitung: Die Rohwerte des Magnetometers müssen zunächst aufbereitet werden, um die Absolutposition der Yaw-Achse bestimmen zu können. Die Korrektur erfolgt mit Hilfe einer Transformationsmatrix und eines Offsetvektors. Um die aufwendige Bestimmung der Koeffizienten der Transformationsmatrix zu umgehen, werden alle magnetisch leitfähigen Materialien (z.B. Schrauben) in Sensornähe entfernt. Der Offsetvektor wird anhand einer Messreihe bestimmt, in der das Magnetometer im Raum in allen Achsen gedreht wird.

1 – Kalibrierung Gyroskop:

Die gemessenen Drehraten des Gyroskops werden integriert, um die Winkeländerungen zu erhalten. Der anfängliche Offsetwert kann daher zu einem wegdriften führen und muss so gering wie möglich sein. Durch eine Messung in Ruhelage der Sensoren wird dieser ermittelt und von den Sensorrohdaten abgezogen. Wie die Diagramme (rechts) zeigen, konnte der Gyrodrift durch den Kalibriervorgang, etwa um den Faktor 4 verringert werden.

2 – Kalibrierung Beschleunigungssensor:

Der Beschleunigungssensor hat ebenfalls Offsetwerte die durch eine Kalibrierung bestimmt werden können. Durch die Referenz zur Gravitationskraft kann außerdem ein Scalewert ermittelt werden, der die Sensorempfindlichkeit korrigiert. Der Sensorblock wird nach dem Schema (rechts) kalibriert. Dabei müssen die sechs Ebenen nacheinander waagrecht zur Erdoberfläche ausgerichtet werden. Nachdem die Messungen in einer Ebene erfolgt sind, kann mittels des integrierten Push-Buttons in den nächsten Zustand gewechselt werden.

3 – Bestimmung der Kovarianzmatrizen:

Im Kontext des EKF's, der ein Gyroskop für den Vorhersageschritt (Predict Step) und einen Beschleunigungsmesser für den Aktualisierungsschritt (Update Step) verwendet, haben die Kovarianzmatrizen folgende Bedeutung:

1. **Prozess-Kovarianzmatrix (Q):** Die Prozess-Kovarianzmatrix beschreibt die Unsicherheit der Vorhersage des Modells, die sich aus dem Prozessrauschen ergibt. In diesem Kontext repräsentiert das Prozessrauschen das Rauschen oder die Unsicherheit, die mit den Gyroskopmessungen einhergeht. Wenn beispielsweise das Gyroskop dazu neigt, über die Zeit zu drifteten (ein häufiges Problem), würde dies zu einer höheren Varianz in der Prozess-Kovarianzmatrix führen. Das bedeutet, dass der Kalman-Filter weniger Vertrauen in die von ihm erzeugte Vorhersage hat.

2. **Mess-Kovarianzmatrix (R):** Die Mess-Kovarianzmatrix beschreibt die Unsicherheit, die sich aus dem Messrauschen ergibt. In diesem Kontext repräsentiert das Messrauschen die Unsicherheit oder das Rauschen, das mit den Beschleunigungsmessungen einhergeht. Wenn beispielsweise der Beschleunigungsmesser hohe Rauschpegel hat, würde dies zu einer höheren Varianz in der Mess-Kovarianzmatrix führen. Das bedeutet, dass der Kalman-Filter weniger Vertrauen in die Messungen hat und sie weniger stark zur Aktualisierung des Zustands heranzieht.

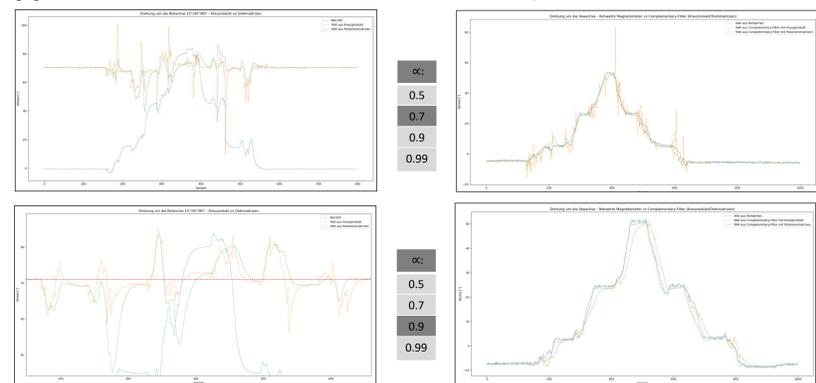
Ein korrektes Einstellen dieser Matrizen kann helfen, den Einfluss von Mess- und Prozessrauschen zu minimieren und die Genauigkeit des Kalman-Filters zu verbessern. Diese können ebenfalls durch eine Messung bestimmt werden.

4 – Berechnung von Pitch, Roll und Yaw:

Nachdem die Kalibrierung abgeschlossen ist, werden im letzten Case die Berechnungen der Winkel Roll, Pitch und Yaw durchgeführt. Der Predict-Step wird jede Millisekunde in der ISR ausgeführt und der Update-Step alle zehn Millisekunden. Hier werden die Winkel Roll und Pitch durch den EKF geupdatet, hingegen der Yaw-Winkel durch zwei verschiedene Verfahren geupdatet wird, deren Performance-Vergleich im nächsten Kapitel erläutert ist. Bevor der Yaw-Winkel berechnet werden kann, liest der µC die Magnetometerdaten aus.

Validierung und Vergleich des Komplementärfilters zur Bestimmung der Yaw-Auslenkung:

- Der Sensorblock wird nacheinander in die verschiedenen Schrägen eingelegt.
 - Der Sensorblock wird nacheinander in die die verschiedenen Schräge der gekippten Winkelvorlage eingelegt.
- Je höher Alpha gewählt wird desto genauer ist die Berechnung durch das Kreuzprodukt, gegenüber der Drehmatrizen.
 - Bei größerem Alpha kommt es zu einer Verzögerungen bei der Yaw-Berechnung durch das Kreuzprodukt.



Ergebnis: Grundsätzlich ist das Magnetometer zu meiden, da es sehr schwer zu kalibrieren ist und sich nahezu überall Störquellen befinden. Zur Ermittlung des Yaw-Winkels durch einen Komplementärfilter, ist die Berechnung über Drehmatrizen die bessere Wahl. Der Alphawert sollte zwischen 0,9 und 0,95 liegen.