

ERWEITERUNG EINES KI-GESTÜTZTEN ASSISTENZSYSTEMS ZUR OPTIMIERUNG VON LASERSCHNEIDPARAMETERN FÜR EDELSTAHLBLECHE

Projektarbeit T2000

des Studienganges Elektrotechnik
Fachrichtung Automation
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg
Standort Stuttgart

Tudor Lupsa

08.09.2025

Bearbeitungszeitraum	02.06.25 - 08.09.25
Matrikelnummer, Kurs	1491114, TEL23GR3
Dualer Partner	TRUMPF SE+Co.KG, Ditzingen
Betreuer des Dualen Partners	Manuel Geiger, M.Sc

Sperrvermerk

Die vorliegende Projektarbeit beinhaltet interne und vertrauliche Informationen der Firma TRUMPF SE + Co. KG. Die Weitergabe des Inhalts, der Arbeit im Gesamten oder in Teilen, sowie Anfertigen von Kopien oder Abschriften, auch in digitaler Form, sind grundsätzlich untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung durch Herrn Manuel Geiger, Betreuer dieser Projektarbeit bei TRUMPF SE + Co. KG Ditzingen.

Dieser Sperrvermerk gilt zum 12. Januar 2026.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Projektarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keinem anderem Prüfungsgremium vorgelegen.

Datum: _____ Unterschrift: _____

Kurzreferat

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Quellcodeverzeichnis	VIII
1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Vorgehensweise	1
1.3 Anwendungsszenario Lageschätzung	2
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Rapid Control Prototyping	3
2.2 Modellbasierte Entwicklung mit Matlab/Simulink	3
2.3 Quaternionen und Euler-Winkel	4
2.4 Lageschätzung mittels Sensorfusion	6
Literaturverzeichnis	7

Abkürzungsverzeichnis

RCP	Rapid Control Prototyping
IMU	Inertial Measurement Unit, deutsch: Inertialmesseinheit

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung der Euler-Winkel	4
---	---	---

Tabellenverzeichnis

Quellcodeverzeichnis

1 Einführung

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in die Thematik der Projektarbeit. Es werden die Zielsetzung und die geplante Vorgehensweise beschrieben.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Projektarbeit ist es eine Versuchsplattform für die Automatisierungstechnik zu entwickeln bei der typische Regelungstechnische Methoden experimentelle untersucht werden und anschließend auf die Zielplattform übertragen werden können. Hierfür soll ein cro:RCPRapid Control Prototyping (RCP)-System verwendet werden, um die Regelungsalgorithmen in Echtzeit auf der Zielplattform auszuführen, indem bereits vorhandene Hardware und Software Bausteine genutzt werden. Das RCP ist ein Verfahren mit dem zu regelnde Systeme schnell und flexibel entwickelt und getestet werden können. Hierbei ist es nicht notwendig manuelle Implementierung in Programmiersprachen für die Zielhardware zu erstellen, sondern es kann direkt von einer grafischen Simulationsumgebung wie z.B. *Matlab/Simulink* auf die Zielhardware übertragen werden mithilfe von einer automatischen Codegenerierung. Dies ermöglicht eine schnelle Iteration und Anpassung der Regelungsalgorithmen, was besonders in der Entwicklungsphase von Vorteil ist, da somit schnell und kosteneffizient Prototypen erstellt und getestet werden können. Die Versuchsplattform soll einen durchgängigen Prozess von der Modellerstellung über die Simulation bis zur Echtzeitausführung auf der Zielhardware abbilden und dabei die experimentelle Parametrierung, Optimierung sowie die Beobachtung relevanter Signale und Messgrößen ermöglichen, indem eine Kopplung zwischen Entwicklungsrechner und Zielplattform zur Signal und Parameterkommunikation genutzt wird (Hoyos-Gutiérrez et al. 2023).

1.2 Vorgehensweise

Die Projektarbeit setzt auf eine Einarbeitung in das Rapid Control Prototyping, um die theoretischen Grundlagen, die verwendeten Begriffe und typische Prozessabläufe einzuordnen und daraus geeignete Vorgehensprinzipien abzuleiten. Aufbauend auf diesem Kenntnisstand werden Anforderungen an die zu entwickelnde Versuchsplattform definiert. Dabei werden funktionale Anforderungen beschrieben, die sich aus den geplanten Experimenten ergeben, sowie nicht funktionale Anforderungen festgelegt, die unter anderem die Umsetzbarkeit, Erweiterbarkeit und Randbedingungen der Nutzung betreffen.

Nachdem die Randbedingungen gesetzt wurden, erfolgt die Auswahl geeigneter Hardware und Software Werkzeuge für die Umsetzung der Versuchsplattform. Ziel ist es, eine Kombination

aus Hardware und Software zu identifizieren, die eine effiziente Entwicklung, Simulation und Echtzeitausführung der Regelungsalgorithmen ermöglicht.

Parallel zum physischen Aufbau wird die Versuchsplattform in Matlab und Simulink modelliert, um ein ausführbares Systemmodell für die Simulation bereitzustellen. In diesem Modell werden Sensorik, Aktorik und die wesentlichen dynamischen Eigenschaften des Prozesses abgebildet, sodass Algorithmen vor der Implementierung auf der realen Plattform unter definierten Bedingungen untersucht werden können. Abschließend wird der Ansatz des Rapid Control Prototyping exemplarisch angewendet, indem ausgewählte Funktionen in Simulink entworfen, simuliert und anschließend mittels automatischer Codegenerierung auf die Zielhardware übertragen werden. Die Implementierung wird getestet und validiert, um die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der entwickelten Versuchsplattform zu gewährleisten.

Für die Umsetzung der RCP-Methodik wird in der Projektarbeit ein Anwendungszenario der "Lageschätzung" genutzt. Hierbei soll eine cro:IMU Inertial Measurement Unit, deutsch: Inertialmesseinheit (IMU) simuliert werden und gegebenenfalls aus der ausgewählten Hardware eine reale IMU ausgelesen werden. Anschließend soll die Lage des Systems in Form von Quaternionen/Eulerwinkeln geschätzt werden (HIER VERWEIS KAPITEL 2.4). Die Lageschätzung soll auf Grundlage einer Sensorfusion funktionieren, indem Beschleunigungs- und Gyroskopdaten kombiniert werden. Hierfür sollen verschiedene Algorithmen implementiert und getestet werden, um die Genauigkeit und Robustheit der Lageschätzung zu bewerten. Ziel ist es, eine zuverlässige Methode zur Bestimmung der Systemlage zu entwickeln, die in Echtzeit auf der RCP-Plattform ausgeführt werden kann.

1.3 Anwendungsszenario Lageschätzung

2 Grundlagen und Stand der Technik

Für die vorliegende Arbeit sind Kenntnisse in den Bereichen Rapid Control Prototyping, modellbasierte Entwicklung mit Matlab und Simulink, Inertialsensorik sowie Lageschätzung mittels Sensorfusion erforderlich, weshalb in den folgenden Kapiteln die hierfür relevanten Grundlagen und der Stand der Technik dargestellt werden.

2.1 Rapid Control Prototyping

Rapid Control Prototyping (RCP) bezeichnet einen Entwicklungsansatz,

2.2 Modellbasierte Entwicklung mit Matlab/Simulink

"Tudor"

2.3 Quaternionen und Euler-Winkel

Für die Lageschätzung einer IMU ist eine Orientierungsdarstellung erforderlich, da die Lage der IMU aus den Messgrößen des Gyroskops, Beschleunigungssensors geschätzt und anschließend bewertet werden soll. Für die Umsetzung der Filteralgorithmen wird eine mathematische Beschreibung der Rotation benötigt.

Grundsätzlich kommen hierfür sowohl Quaternionen als auch Euler-Winkel in Frage. Quaternionen eignen sich besonders für die interne Berechnung, da sie eine kompakte und singularitätsfreie Darstellung von Rotationen ermöglichen. Zur Ausgabe und Visualisierung der Ergebnisse werden hingegen häufig Euler-Winkel verwendet, da sie die Orientierung anschaulich durch drei Winkel (Yaw, Pitch und Roll) beschreiben. Euler-Winkel besitzen jedoch Singularitäten und sind daher als interne Zustandsdarstellung nur eingeschränkt geeignet.

Euler-Winkel beschreiben die Orientierung durch drei aufeinanderfolgende Rotationen und werden üblicherweise als Yaw, Pitch und Roll angegeben. Abbildung 1 zeigt diese Winkel als Rotationen um die körperfesten Achsen: Roll entspricht einer Rotation um die x-Achse, Pitch einer Rotation um die y-Achse und Yaw einer Rotation um die z-Achse.

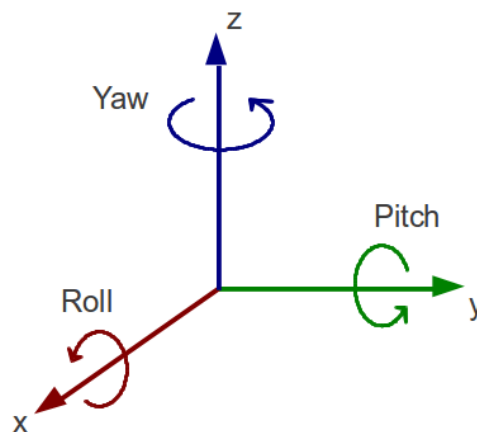


Abb. 1: Schematische Darstellung der Euler-Winkel Iman Bagheri 2026

Die konkrete mathematische Beschreibung hängt von der gewählten Rotationsreihenfolge ab, da unterschiedliche Reihenfolgen zu unterschiedlichen Umrechnungsformeln zwischen Euler-Winkeln und Quaternionen führen.

Ein zentrales Problem dieser Darstellung ist das Auftreten von Singularitäten. Für die Yaw-Pitch-Roll-Reihenfolge tritt der kritische Fall in der Nähe von Pitch 90° auf, da zwei Rotationsachsen dabei effektiv zusammenfallen. In diesem Bereich sind Yaw und Roll nicht mehr unabhängig bestimmbar, sodass bereits kleine Änderungen der tatsächlichen Orientierung zu

großen oder sprunghaften Änderungen einzelner Euler-Winkel führen können. Dieses Verhalten wird als Gimbal-Lock bezeichnet. Tamim Asfour 2026

Quaternionen ... Formeln einbinden

2.4 Lageschätzung mittels Sensorfusion

git

Literaturverzeichnis

- Hoyos-Gutiérrez, Jose; Cardona-Aristizabal, Jaiber; Muñoz-Gutiérrez, Pablo Andrés; Ramirez-Jimenez, Diego (2023):** A Systematic Literature Review on Rapid Control Prototyping Applications. In: *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*. IEEE Xplore Document 10056232. DOI: 10.1109/RITA.2023.3250559. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10056232> (Abruf: 12.01.2026).
- Iman Bagheri (2026):** Euler Angles (Yaw, Pitch and Roll). URL: https://www.researchgate.net/figure/Euler-Angles-Yaw-Pitch-and-Roll_fig2_342145524 (Abruf: 10.01.2026).
- Tamim Asfour (2026):** Robotik U: Einführung in die Robotik. URL: https://pasta.place/Informatik/Robotik_1_%5BHIS%5D/Folien/WS_17-18/01-Mathematische-Grundlagen.pdf (Abruf: 10.01.2026).