Interner Bericht

DLR-IB-FT-BS-2018-254

Positionsregelung einer Schwenk-Neige Einheit zur Nachführung und Stabilisierung einer Kamera

Hochschulschrift

Schubert, Thomas

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Flugsystemtechnik Braunschweig



Institutsbericht DLR-IB-FT-BS-2018-254

Positionsregelung einer Schwenk-Neige Einheit zur Nachführung und Stabilisierung einer Kamera

Schubert, Thomas

Institut für Flugsystemtechnik Braunschweig

- 062 Seiten
- 049 Abbildungen
- 013 Tabellen
- 015 Referenzen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Flugsystemtechnik Abteilung Unbemannte Luftfahrzeuge

Stufe der Zugänglichkeit: I, Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

Braunschweig, den 02.02.2024

- Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag
- Abteilungsleitung: Johann Dauer
- Betreuer:in: Nikolaus Ammann
- Verfasser:in: Thomas Schubert



Bachelorarbeit

von Thomas Schubert

Hochschule Hannover

University of Applied Science and Arts

Fakultät I: Elektro- und Informationstechnik Studiengang: Mechatronik

Bachelorarbeit

In Kooperation mit



"Positionsregelung einer Schwenk-Neige Einheit zur Nachführung und Stabilisierung einer Kamera"

Vorgelegt von:

Zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Engineering

| | 8.8.8 |
|-----------------------------|--|
| Verfasser: | Thomas Schubert |
| Matrikelnummer: | 1303188 |
| Themensteller / Erstprüfer: | Prof. Dr. Ernst Forgber |
| Betreuer / Zweitprüfer: | Nikolaus Ammann, M. Sc. |
| Bearbeitungsbeginn: | 15. November 2017 |
| Abgabetermin: | 15. Februar 2018 |
| Studienort: | Hochschule Hannover / DLR Braunschweig |

Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit behandelt die Entwicklung einer Steuerung für eine Schwenk-Neige Einheit zur Nachführung und Stabilisierung eines Sensorsystems, bestehend aus zwei Kameras und einer Laser Messeinrichtung.

Das Sensorsystem ist an der Schwenk-Neige Einheit befestigt und wird für die Umweltwahrnehmung und optische Navigation genutzt. Die Schwenk-Neige Einheit befindet sich am Landegestellt des Hubschraubers. Steuerung hat die Aufgabe die Schwenk-Neige Einheit und somit auch das Sensorsystem auf das jeweilige Ziel auszurichten. Zusätzlich sollen die Bewegungen und Lageänderungen des Hubschraubers kompensiert werden.

Um dieses Ziel zu erreichen wird zunächst die Ausgangssituation ausführlich analysiert und auf Basis der gewonnen Informationen eine Steuerung entwickelt.

Die Ursprüngliche Version der Steuerung führt jedoch zu einem ungewünschten Systemverhalten. Um die Ursache hierfür zu ermitteln, werden weitere Tests durchgeführt. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen bilden die Basis auf der eine entsprechende Steuerung realisiert werden kann.

Abstract

This bachelor thesis discusses the development of a controller for a pan-tilt unit to align a sensor system, consisting of two cameras and a laser measuring device.

The sensor system is attached to the pan-tilt unit and is used for environmental perception and visual navigation. The pan-tilt unit is located at the landing gear of the helicopter. The controller's task is to align the pan-tilt unit and thus the sensor system to the respective destination. In addition, the movements and changes in position of the helicopter should be compensated too.

In order to achieve this goal, the initial situation is first analyzed in detail and based on the information obtained initially developed.

However, the original version of the controller results in an unwanted system behavior. To determine the cause of this, further tests are performed. The findings of the studies provide the base on which a suitable control can be realized.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des DLR Braunschweig bedanken, die mir bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung mit Ihren Ideen und Anregungen geholfen haben. Ein besonderer Dank geht an Johann Dauer, der mich sehr unterstützt hat, viel Geduld bewies und mir immer eine große Hilfe war.

| Inhaltsverzeichnis | |
|--|---|
| 1 Einleitung | 5 |
| 1.1 Forschungsfrage | 7 |
| 1.2 Aufbau | 7 |
| 2 Ausgangsbeschreibung | 7 |
| 2.1 Pan-Tilt Unit Systems | |
| 2.2 Gesamtsystem | 9 |
| 2.3 Ist-Zustand | |
| 3 Systemanalyse | |
| 3.1 Anforderungen durch den Einsatz | |
| 3.2 Herstellerangaben | |
| 3.3 Tests | |
| 3.3.1 Validierung des Geschwindigkeitsprofils | |
| 3.3.2 Analyse der Beschleunigungskurve | |
| 3.3.3 Analyse der Regelstruktur | |
| 3.4 Auswertung | |
| 4 Konzipierung | |
| 4.1 Anforderungskatalog | |
| 4.2 Entwurf | |
| 4.3 Sollwertberechnung | |
| 4.4 Programmierung | |
| 5 Erprobung | |
| 5.1 Simulation | |
| 5.1.1 Simulationsergebnisse | |
| 5.1.2 Auswertung | |
| 5.2 Realer Test | |
| 5.2.1 Vorversuch | |
| 5.2.2 Hauptversuch | |
| 5.2.2.1 Versuchsergebnisse konzipierte Steuerung | |
| 5.2.2.2 Auswertung | |
| 5.2.2.3 Versuchsergebnis alternative Konzepte | |
| 5.2.3 Zusammenfassung | |
| 6 Fazit / Aussichten | |
| 7 Literaturverzeichnis | |
| 8 Quellen | |
| Eigenständigkeitserklärung | |

Abbildungsverzeichnis

| Abbildung 1: Bauartbedingtes FOV der Kamera [2] | 6 |
|--|----|
| Abbildung 2: PTU mit montierten Kameras und Laser Abstandsmesser | 9 |
| Abbildung 3: Gesamtsystem mit Nummerierung | 10 |
| Abbildung 4: Beispieldarstellung des ECEF Systems mit Koordinatenbezeichnung [4] | 11 |
| Abbildung 5: Beispielbild für das Body fixed Koordinatensystem inkl. Winkelbeziehungen | |
| [5] | 12 |
| Abbildung 6: Diagramm des Bahnverlaus für die Steuerung aus dem Praktikum | 13 |
| Abbildung 7: Darstellung des maximalen Schwenkbereichs der PTU [6, S. 26] | 16 |
| Abbildung 8: Vom Hersteller angegebenes Geschwindigkeitsprofil [7, S. 37] | 17 |
| Abbildung 9: Aufgenommenes Geschwindigkeitsprofil der Pan- und Tiltachse | 18 |
| Abbildung 10: Diagramm der Geschwindigkeit aus der Beschleunigungsanalyse | 18 |
| Abbildung 11: Diagramm der Drehrate aus der Regleruntersuchung | 20 |
| Abbildung 12: Detaildarstellung der Drehrate | 20 |
| Abbildung 13: Positionsdiagramm aus der Regleruntersuchung | 21 |
| Abbildung 14: Kaskadenstruktur mit Vorsteuerung und Sättigung | 23 |
| Abbildung 15: Kaskadenstruktur mit zusätzlichem Regeler | 23 |
| Abbildung 16: Bodediagramm der Beispielstrecke | 24 |
| Abbildung 17: Auswirkung einer zusätzlichen Verstärkung beim Anfahren einer Position | 24 |
| Abbildung 18: Target Vektor im BF Koordinatensystem | 27 |
| Abbildung 19: Änderung des Target Vektor bei Bewegung | 28 |
| Abbildung 20: Target Vektor im BF Koordinatensystem | 30 |
| Abbildung 21: Winkelbeziehung am Target Vektor für die Pan-Achse | 31 |
| Abbildung 22: Passivtransformation des Koordinatensystems | 32 |
| Abbildung 23: Winkelbeziehung am Target Vektor für die Tilt-Achse | 32 |
| Abbildung 24: Vergleich der Drehraten über die Zeit | 33 |
| Abbildung 25: Darstellung der intern Berechneten Bewegungstrajektorie der PTU | 34 |
| Abbildung 26: Klassendiagramm der Klasse "PanTiltObjectTracker" | 35 |
| Abbildung 27: Aktivitätsdiagramm des Objekts "PanTiltObjectTracker" | 36 |
| Abbildung 28: Ablaufplan der Funktion "controlPanTiltUnit (links) und "getAngle" (rechts) |) |
| | 37 |
| Abbildung 29: Ablaufplan der entwickelten Steuerung "updateDesiredState" | 38 |
| Abbildung 30: modellierte Mission für den virtuellen Test | 39 |
| Abbildung 31: Ausschnitt aus der visualisierungs Software | 39 |
| Abbildung 32: Soll und Ist Bahnverlauf Pan-Achse in der Simulation (links) | |
| Sollwertabweichung von der Soll Bahn (rechts) | 40 |
| Abbildung 33: Soll und Ist Bahnverlauf Tilt-Achse in der Simulation (links) | |
| Sollwertabweichung von der Idealbahn (rechts) | 40 |
| Abbildung 34: Testgelände für den Test an der realen PTU | 41 |
| Abbildung 35: Soll und Ist Bahnverlauf für die Pan- und Tiltachse mit Detailansicht für die | |
| lineare Bewegung | 43 |
| Abbildung 36: Soll und Ist Bahnverlauf für die Pan- und Tiltachse mit Detailansicht für die | 10 |
| Drehbewegung | 43 |
| Abbildung 3/: Abweichender Bahnverlauf bei Berechnung mit und ohne Beschleunigung | 44 |
| Abbildung 38: Soll und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse bei der kombinierten Bewegung | 46 |
| Abbildung 39: Detailansicht der Messwerte für den Bahnverlauf der kombinierten Bewegur | 1g |
| $A = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} $ | 46 |
| Abbildung 40: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll) | 4/ |
| Abbildung 41: Vergleich der Kommandierten Position Zur Ist-Position | 48 |
| Additioning 42: Authanmen von der Kamera an der PTU | 49 |

| Abbildung 43: Soll (Ideal) und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse ohne | |
|---|----|
| Beschleunigungsausgleich | 50 |
| Abbildung 44: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll) ohne | |
| Beschleunigungsausgleich | 50 |
| Abbildung 45: Soll (Ideal) und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse mit Zusatzwinkelbegrenzung | 51 |
| Abbildung 46: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll) mit | |
| Zusatzwinkelbegrenzung | 51 |
| Abbildung 47: Soll (Ideal) und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse mit P-Regeler | 52 |
| Abbildung 48: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll) mit P-Regler | 52 |
| Abbildung 49: Vergleich der Drehraten zwischen den unterschiedlichen Konzepten | 53 |
| | |

Tabellenverzeichnis

| - |
|---|
| Tabelle 2: Kommunikationsdelay der PTU |
| Tabelle 3: Programmierumgebung 10 |
| Tabelle 4: Gewichtslast die an der PTU befestigt ist 15 |
| Tabelle 5: Witterungsbedingungen bei denen die PTU eingesetzt wird |
| Tabelle 6: Werte für den maximalen Schwenkbereich der PTU16 |
| Tabelle 7: Einstellung für die Drehrate und Beschleunigung 16 |
| Tabelle 8: Errechnete Beschleunigung aus den Messwerten 19 |
| Tabelle 9: Anforderungskatalog |
| Tabelle 10: Einstellungen der jeweiligen Achse |
| Tabelle 11: Abweichung vom Sollwert |
| Tabelle 12: Vergleich der Sollwertabweichung zwischen den unterschiedlichen Konzepten. 53 |
| Tabelle 13: Checkliste für die Beurteilung der Steuerung |

Formelzeichen

| α | Winkelbeschleunigung |
|---|--|
| a | Beschleunigung |
| β | Winkel um die Y-Achse |
| γ | Winkel um die Z-Achse |
| $G_0(s)$ | Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises |
| $K_{\rm I}, K_{\rm P}$ | Verstärkungsfaktor |
| $\overrightarrow{P_{Diff}}$ | Vektor der Differenzposition |
| $\overrightarrow{P_{ECEF}}, \overrightarrow{P_1}, \overrightarrow{P_2}$ | Koordinatenvektor im ECEF System |
| <i>р</i> ғ, <i>q</i> ғ, <i>r</i> ғ | Rotation um die X-, Y- und Z_Achse im Body Fixed Koordinatensystem |
| Q | Quaternion |
| QF, Q F,neu | Lagerquaternion des Fahrzeugs |
| φ | Winkel / Winkelstrecke |
| φ0 | Anfangswinkel |
| $\Delta \phi$, d ϕ | Differenzwinkel |
| φsoll | Soll-Winkel |
| φIst | Ist-Winkel |
| φlinear | bei konstanter Drehrate zurückgelegte Winkelstrecke |
| Øbeschl | während der Beschleunigungsphase zurückgelegte Winkelstrecke |

| φkommandiert | kommandierter Winkel |
|-----------------|---|
| φr | Phasenreserve |
| S | Position / Strecke |
| S 0 | Anfangsposition |
| TI | Zeitkonstante |
| Δt | Zeitdifferenz |
| taktuell | aktuelle Zeit |
| tbeschl | Zeit die für die Beschleunigung benötigt wird |
| tletzter Aufruf | Zeit beim letzten Funktionsaufruf |
| v | Geschwindigkeit |
| V 0 | Anfangsgeschwindigkeit |
| ω | Drehrate |
| ω0 | Anfangsdrehrate |
| Wausgleich | Drehrate für Beschleunigungsausgleich |
| ωBasis | Basisdrehrate (nicht Base Speed) |
| ωSoll | Soll-Drehrate |
| ωKrit | Kritische Frequenz |

1 Einleitung

Diese Bachelorarbeit wird in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Flugsystemtechnik, Abteilung unbemannte Luftfahrzeuge durchgeführt.

"Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 16 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 7.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris und Washington D.C." [1]

Die Abteilung "Unbemannte Luftfahrzeuge" des Institutes für Flugsystemtechnik beschäftigt sich mit der Grundlagenforschung im Bereich der autonomen Luftfahrzeuge und bearbeitet die Themenfelder:

- Flugregelungs- und Missionssteuerungslösungen mit stark unsicheren System- und Umgebungseigenschaften,
- Sensorfusion und Umweltwahrnehmung in der Flugsteuerung
- Systemtechnische Lösungen für äußerst geringen Platzbedarf

Unmanned aerial vehicles (im folgenden UAVs abgekürzt) sind unbemannte Luftfahrzeuge die sich entweder ferngesteuert über eine Bodenstation oder autonom, d.h. computergestützt und ohne Eingriffe von außen, vom Start- zum Zielpunkt bewegen.

Ihr Einsatzspektrum erstreckt sich vom zivilen/kommerziellen über den polizeilichen, den geheimdienstlichen bis zum militärischen Bereich.

Sie werden häufig dort Eingesetzt wo es für den Menschen zu gefährlich, die Arbeit zu monoton ist oder bei schwer zu erreichenden Einsatzorten.

Beispielsweise zur Aufklärung in Konfliktregionen, bei Rettungseinsätzen, die Überwachung in Städten oder für die Zustellung von Pakten.

In diesen Anwendungsszenarien kommen u.a. Kameras zum Einsatz. Diese haben dabei unterschiedliche Aufgaben:

- Überwachung:

Bei der Überwachung dienen Kameras dazu Bilder aufzunehmen, um diese anschließend von einem Computerprogramm oder einem Menschen analysieren zu lassen und das Zielobjekt zu verfolgen. - Kollisionsvermeidung:

Kameras können auch als Sensor genutzt werden, indem die Aufnahmen in Echtzeit auf mögliche Hindernisse hin ausgewertet werden, um so Kollisionen mit festen Strukturen oder anderen Flugobjekten zu vermeiden.

Dadurch sind Kameras nicht nur passive Elemente die zur Aufzeichnung von Bildern dienen, sondern die auch aktiv in das System eingebunden werden.

(vgl. 3D path planning and stereo-based obstacle avoidance 2008)

- Navigation

Für die Navigation kommt meist eine Fusion aus GNSS und einer inertiale Messeinheit zum Einsatz. Der GNSS Empfang kann jedoch gestört werden, Beispielsweise in Städten durch Gebäude o.ä.

Durch die Möglichkeit der Echtzeitauswertung von Kamerabildern können diese in die Navigation eingebunden werden, um so die Wegfindung für autonome UAVs zu ermöglichen, wo der GPS Empfang gestört ist.

(vgl. Unterstanding GPS 2006, S. 243 ff)

Kameras, die als Sensoren genutzt werden, haben jedoch einen Nachteil gegenüber Beispielsweise Radar. Sie besitzen Bauartbeding einen eingeschränkten Sichtbereich, das so genannte field of view (FOV), siehe Abbildung 1. Dadurch kann nur ein Teil der Umgebung wahrgenommen werden.



Abbildung 1: Bauartbedingtes FOV der Kamera [2]

Um den Bereich der wahrgenommenen Umgebung zu vergrößern, kann die Kamera an einer Schwenk-Neige Einheiten befestigt werden, einer so genannte Pan-Tilt Unit (PTU). Die PTU ermöglicht die Lage der Kamera im Raum zu ändern und so zusätzliche Bereiche zu betrachten. Zusätzlich ermöglicht die PTU, die Kamera unabhängig von der Lage des Trägerfahrzeugs auszurichten und Bewegungen des Trägerfahrzeugs zu kompensieren, um so ein stabiles Bild zu gewährleisten.

1.1 Forschungsfrage

Um während des Einsatzes eines UAVs ein definiertes Objekt (Target) über eine gewisse Zeit zu beobachten, muss dieses Target stabil im Bild der Kamera gehalten werden. Durch die Bewegung des UAV verändert sich jedoch die Lage des Targets zum UAV, wodurch sich das Target aus dem Sichtbereich der Kamera heraus bewegen kann. Ziel ist es, die PTU so zu orientieren, dass das Target immer im Bildmittelpunkt ist.

Die Ausrichtung der PTU und die Kompensation der Bewegung des UAVs muss gesteuert werden.

Die Forschungsfrage lautet daher:

Wie muss die Steuerung aufgebaut sein, um die Kamera nachzuführen und zu stabilisieren?

1.2 Aufbau

Zunächst werden alle relevanten Informationen ermittelt, zusammengetragen und verglichen. Dies umfasst sowohl die Auflistung der verwendeten Komponenten, als auch die jeweiligen Herstellerangaben. Unter anderem zur PTU, der Sensorik und des Trägerfahrzeugs. Diese Informationen werden im Anschluss analysiert und danach bewertet, wie weit sie für die Einhaltung der Anforderungen relevant sind.

Um die Verlässlichkeit der Herstellerangaben zu prüfen und zusätzliche Informationen zu gewinnen werden Tests am realen System durchgeführt. Durch die Ergebnisse der Tests soll eine genaue Aussage über das System und dessen Verhalten getroffen werden.

Auf Basis der gesammelten Informationen wird ein Konzept für die Steuerung entwickelt und mit Hilfe der Simulation getestet.

Im Anschluss wird auf Basis der Informationen ein Algorithmus entwickelt der die PTU steuert und mit Hilfe einer Simulation getestet.

Ist das Ergebnis der Simulation zufriedenstellend, wird die Steuerung an der realen PTU getestet und die Einhaltung der gestellten Anforderungen überprüft.

2 Ausgangsbeschreibung

Die in dieser Bachelorarbeit behandelte Pan-Tilt Unit ist die "PTU-D48 E Series" (1, Abbildung 2) und stammt von der Firma "FLIR Motion Control Systems". Alle Überlegungen, Erkenntnisse und Entwicklungen basieren auf dieser PTU und sind nur für diese anwendbar.

2.1 Pan-Tilt Unit Systems

Die PTU weist laut technischem Datenblatt des Herstellers folgende Eigenschaften auf:

| Pan/Tilt Performance | Side Mount | Top Mount | | |
|------------------------------|--|-----------------------|--|--|
| Max. Payload | 15 lb | 10 lb | | |
| Pan Speed Range ¹ | 0.006°/sec - 100°/sec | 0.006°/sec - 100°/sec | | |
| Tilt Speed Range | 0.003°/sec - 50°/sec | 0.003°/sec – 50°/sec | | |
| Resolution – Pan | 0.006° | 0.006° | | |
| Resolution – Tilt | 0.003° | 0.003° | | |
| Pan/Tilt Features | | | | |
| Tilt Range | Programmable up to +30° to -90° from level (120° range) | | | |
| Pan Range | Programmable up to +/-188° range, nx360° with slip-ring option | | | |
| Duty Cycle | Up to 100% duty cycle | | | |
| Acceleration/Deceleration | On-the-fly speed and position changes | | | |

Tabelle 1: Herstellerangaben zur PTU [3]

Die Auswahl der Drehrate in dem vorgegebenen Bereich wird vom Anwender bestimmt und über die Konfiguration vorgegeben.

Gesteuert wird die PTU über drei unterschiedliche Arten:

- Kommandierung der Position, hierbei verfährt die PTU mit der voreingestellten, maximalen Drehrate.
- Kommandierung einer Drehrate, hierbei verfährt die PTU bis zum maximalen Winkel mit der kommandierten Drehrate. Die kommandierte Drehrate kann die voreingestellte nicht überschreiten.
- Kommandierung von Position und Drehrate, hierbei wird die gewünschte Position mit der vorgegebenen Drehrate angefahren. Die kommandierte Drehrate kann die voreingestellte nicht überschreiten.

Die Kommandierung beider Achsen kann sowohl gleichzeitig über einen Befehl, als auch unabhängig voneinander über zwei Befehle geschehen.

Zusätzlich zur Kommandierung der Soll-Position kann auch der aktuelle Status der Achsen abgefragt werden. Diese Abfrage umfasst sowohl Position als auch Drehrate beider Achsen.

Die PTU ist über eine serielle Verbindung mit dem Computer (5, Abbilung XXX) verbunden. Aus Tests im Vorfeld dieser Bachelorarbeit haben sich für die Übertragungs- und Verarbeitungszeit mit dieser Verbindung folgende Werte ergeben: Tabelle 2: Kommunikationsdelay der PTU

| Data transfer statistics for the PTU communication | | | | | | | |
|--|---------------------|---------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Function | Data size [Byte] | | averege time [ms] | | | | |
| | send | receive | Ethernet | Seriel 19200 Baud | Seriel 38400 Baud | Seriel 57600 Baud | Seriel 115200 Baud |
| getCurrentState | 8 | 36 | 348,446 | 21,012 | 10,655 | 7,215 | 3,683 |
| getDesiredState | 8 | 36 | 815,179 | 63,470 | 32,334 | 21,928 | 11,495 |
| movePanAxisToPosition | 12 | 12 | 116,654 | 10,658 | 5,467 | 3,721 | 2,003 |
| movePanTiltAxesToPosition | 12 | 12 | 116,654 | 10,615 | 5,493 | 3,758 | 1,961 |
| movePanAxisAtSpeed | 12 | 12 | 116,771 | 10,670 | 5,460 | 3,728 | 2,003 |
| moveTiltAxisAtSpeed | 12 | 12 | 116,654 | 10,640 | 5,444 | 3,711 | 2,006 |
| movePanTiltAxesAtSpeed | 16 | 12 | 233,308 | 21,270 | 10,875 | 7,370 | 3,995 |

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Werte für die Zeit, die benötigt wird, um den entsprechenden Befehl an die PTU zu senden und zu verarbeiten. Diese Bearbeitungszeit begrenzt die Häufigkeit, mit der Befehle an die PTU gesendet werden können. Die grün hinterlegten Befehle sind die im weiteren Verlauf genutzten Befehle.

2.2 Gesamtsystem

An beiden Seiten der PTU ist jeweils eine Kamera "Prosilica GT1380" der Firma "Allied Vision" befestigt (2, Abbildung 2). An der Unterseite der PTU befindet sich der Laserscanner "PuckTM VLP-16" von der Firma "Velodyne" (3, Abbildung 2).



Abbildung 2: PTU mit montierten Kameras und Laser Abstandsmesser

Die Kameras und der Laserscanner sollen durch die PTU permanent auf das Target gerichtet werden.

Für die Messung der Sensordaten zur Steuerung der PTU wird das INS / GNSS bidirektional gekoppelte Trägheitsnavigation, Messung, Vermessungs- und Kontrollsystem "iTraceRT-F400-Q-E" (2, Abbildung 3) der Firma "iMAR Navigation" (folgend als IMU bezeichnet) verwendet.

Die Daten werden von der IMU mit einer Frequenz von 400 Hz bereitgestellt und umfassen folgende Werte:

- Beschleunigung
- Geschwindigkeit
- Drehrate
- Position
- Lage

Diese Werte werden durch die Software, in die die Steuerung eingebunden wird, gefiltert und mit einer Frequenz von 100 Hz bereitgestellt.

Die Software für die Steuerung läuft auf einem Computer mit dem Betriebssystem Linux und einem Intel I7 Prozessor. Für die Entwicklung der Steuerung wurde folgende Programmierumgebung genutzt:

Tabelle 3: Programmierumgebung

| Programmiersprache: | C++ |
|-----------------------|----------------------------|
| Entwicklungsumgebung: | Code::Blocks Version 13.12 |
| Betriebssystem: | Microsoft Windows 7, Linux |



Abbildung 3: Gesamtsystem mit Nummerierung

Abbildung 3 zeigt das Gesamtsystem das für den Test an der realen PTU und in der Praxis verwendet wird. Die PTU inklusive Sensorik (1), die IMU (2) und der Computer (5) sind über eine spezielle Vorrichtung (6) am Landegestell (7) des Trägerfahrzeuges, einem "Dragon 50 v2" der Firma "Swissdrones Operation AG" befestigt. Die GPS Antennen (3&4) sind an der IMU angeschlossen und werden für die Positionsbestimmung benötigt.

Über das Labornetzteil (8) und den Verteiler (9) wird der Computer und die IMU mit Spannung versorgt. Die PTU wird über ein separates Netzteil (10) mit Spannung versorgt.

Beide Netzteile beziehen die Versorgung während des gesamten Versuches aus dem 50 Hz Drehstromnetz.

Mit Hilfe des Laptops (11) werden Befehle an den Computer (5) gesendet, um u.a. die Software zu starten.

Für die Angabe der Position wird das Erath-Centered, Earth-Fixed (ECEF) Koordinatensystem genutzt (Abbildung 4).



Abbildung 4: Beispieldarstellung des ECEF Systems mit Koordinatenbezeichnung [4]

Hierbei handelt es sich um ein kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Mittelpunkt des Rotationsellipsoidens. Die Position wird sowohl aus den Werten der X-, Y- und Z-Achse des Koordinatensystems angegeben, als auch über die Winkelbeziehung des Vektors und den Achsen. Diese Winkel werden als longitude und latitude bezeichnet, vgl. Abbildung XXX. Im Weiteren wird die Angabe über die X-, Y- und Z-Werte genutzt.

$$\overrightarrow{P_{ECEF}} = \begin{bmatrix} x_{ECEF} \\ y_{ECEF} \\ z_{ECEF} \end{bmatrix}$$

Für die Angabe der Bewegung des Trägerfahrzeugs wird im Weiteren das Body Fixed Koordinatensystem genutzt:



Abbildung 5: Beispielbild für das Body fixed Koordinatensystem inkl. Winkelbeziehungen [5]

Abbildung 5 zeigt das das Body Fixed Koordinatensystem, dass seinen Ursprung im Schwerpunkt des Trägerfahrzeugs hat. Tangentiale Bewegungen beziehen sich auf die Bewegung entlang der Längsachse x_F , der Querachse y_F und Hochachse z_F des Trägerfahrzeugs. Rotatorische Bewegungen p_F (rollen), q_F (nicken) und r_F (gieren) beziehen sich auf die Rotation um die jeweilige Achse des Trägerfahrzeuges.

2.3 Ist-Zustand

Mit der Systemkonfiguration (Abbildung 3) wurde bereits im Praktikum gearbeitet. Im Weiteren werden zwei Fälle bezüglich der Bewegungsart des Trägerfahrzeuges unterschieden:

- Statischer Fall:

Das Trägerfahrzeug behält während der Ausrichtungszeit der PTU auf das Target seine Position und Lage bei. Erst nach der Ausrichtung ändert das Trägerfahrzeug seine Position.

 Dynamischer Fall: Das Trägerfahrzeug bewegt sich während der Ausrichtung der PTU auf das Target.

Während des Praktikums wurde der statische Fall betrachtet. Dies erforderte nur ein kommandieren eines Winkels, ohne Vorgabe der Drehrate, den die PTU einnehmen soll.



Abbildung 6: Diagramm des Bahnverlaus für die Steuerung aus dem Praktikum

Abbildung 6 zeigt den idealen Bahnverlauf (blaue Linie) und den Bahnverlauf der PTU (rote Linie) für den dynamischen Fall. Der Bahnverlauf für die PTU resultiert aus der Steuerung des Praktikums. Der ideale Bahnverlauf wurde über die Berechnung der Soll-Position mit einer Frequenz von 100 Hz erstellt.

Es ist zu erkennen, dass der Bahnverlauf der Steuerung keine kontinuierliche Bewegung entlang des idealen Bahnverlaufes zeigt. Diese stockende Bewegung führt dazu, dass das Target nicht permanent im Mittelpunkt des Bildes liegt, wie es bei einer kontinuierlichen Bewegung wäre, sondern permanent die Position im Bild ändert. Die Bewegung des Targets im Bild und die ruckartige Bewegung der PTU beeinflussen somit die Aufnahmen der Kameras.

Aus diesem Grund soll eine Steuerung entwickelt werden, die eine Bewegung so kommandiert, dass ein Verlauf entlang der idealen Bahn mit einer möglichst geringen Abweichung resultiert.

3 Systemanalyse

Im ersten Schritt müssen die Systemgrenzen ermittelt werden, um daraus Rückschlüsse zu ziehen, wie dynamisch die Steuerung ausgelegt werden kann.

Entscheidende Aspekte der Hardware Eigenschaften der PTU sind generell:

- Tragkraft
- Genauigkeit
- Kommandorate
- Elektrische und mechanische Robustheit

Je häufiger Kommandos gesendet und je höher die Bewegungsgeschwindigkeit gesetzt werden kann, desto genauer ist die Steuerung der PTU, da es sich um ein zeitdiskretes System handelt. Dieser Aspekt wird in einem nachfolgenden Kapitel genauer betrachtet und aus diesem Grund hier nicht weiter erläutert.

Da die PTU an einem Hubschrauber zum Einsatz kommt, sind darüber hinaus auch die äußeren Einflüsse bei der Konzipierung zu berücksichtigen:

- Temperaturen
- Witterung
- Vibrationen
- Schmutz

Witterungsbedingungen, wie starker Wind und Regen, begrenzen den Einsatzbereich der PTU. Asymmetrisch angebrachte Sensorik erzeugt durch die Windkraft und der Fläche auf die der Wind wirkt ein Gegendrehmoment um die Drehachse, diesem muss der Motor der PTU entgegenwirken.

Die durch den Hubschrauber erzeugten Vibrationen können Einfluss auf die Genauigkeit der Sensorik in der PTU haben. Eine fehlerhafte Positionsbestimmung wirkt sich negativ auf die Positioniergenauigkeit aus und erzeugt so eine zusätzliche Soll-Wert Abweichung.

3.1 Anforderungen durch den Einsatz

Die Anforderungen an die PTU, die sich durch den Einsatz des Kooperationspartners ergeben, sehen wie folgt aus:

Tabelle 4: Gewichtslast die an der PTU befestigt ist

| Gewichtslast (Payload) | Anzahl | Einzelgewicht [g] |
|---------------------------|--------|-------------------|
| Kamera seitlich montiert | 2 | 315 |
| Kameraobjektiv | 2 | 300 |
| Laserscanner top montiert | 1 | 830 |
| Halterung | 1 | 300 |
| | | |
| Gesamtgewicht: | | 2360 |

Tabelle 5: Witterungsbedingungen bei denen die PTU eingesetzt wird

| Witterungsbedingungen | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Wetter | Trocken (gemäßigte Klimazone) |
| Temperatur | -10° bis +30° |
| Windstärke | 4 (5,5 m/s – 7,9 m/s) |

Alle nachfolgenden Bewertungen der Einsatzfähigkeit der PTU basieren auf diesen Angaben und haben, sofern nicht anders erwähnt, nur bis zu diesen Werten Gültigkeit.

3.2 Herstellerangaben

Aus den Unterlagen des Herstellers sind folgende Hardwareeigenschaften zu entnehmen:

- Maximale Payload
 - Seitlich montiert: 6,80 kg
 - Top montiert: 4,53 kg
- Bewegungsauflösung
 - Pan-Achse: 0,006°
 - Tilt-Achse: 0,003°
- IP 67 zertifiziert
- Temperaturbereich von -30°C bis +70°C
- Relative Luftfeuchtigkeit von 100%
- Geschützt gegen anhaltend wehenden Staub/Sand
- Überspannungs und -strom Schutz nach Militärstandart MIL-STD-1275D
- Vibrationsverträglichkeit nach Militärstandart MIL-STD-810G Method 514.6

Es ist zusätzlich darauf zu achten, dass die PTU über einen beschränkten Schwenkbereich verfügt, siehe Abbildung 7 und Tabelle 6.

| Achse | Maximalwinkel werksseitig [°] | Maximalwinkel genutzt [°] |
|-------|-------------------------------|---------------------------|
| Pan | ±188 | ±120 |
| Tilt | -90 bis +30 | -89 bis +30 |

Das Überschreiten kann zur Folge haben, dass die PTU und die daran befestigte Peripherie beschädigt werden.



Abbildung 7: Darstellung des maximalen Schwenkbereichs der PTU [6, S. 26]

Außerdem ist bei der Berechnung der Steuerbefehle das vom Hersteller vorgegebene Bewegungsprofil der PTU zu berücksichtigen (Abbildung 8).

Hierbei gibt es eine sogenannte "Base Speed", eine Geschwindigkeit mit der sich die entsprechende Achse sofort verfährt und ein "Upper Speed Limit", welches vom Anwender eingestellt wird und worauf das System konstant hin beschleunigt.

In dieser Systemkonfiguration sind die Werte wie folgt eingestellt

| Achse | Beschleunigung [°/s ²] | Base Speed [°/s] | Upper Speed Limit [°/s] |
|-------|------------------------------------|------------------|-------------------------|
| Pan | 60 | 10 | 60 |
| Tilt | 60 | 10 | 50 |

| Tabelle 7: Einstellung für die Drehrate und Beschleunigu | ıng |
|--|-----|
|--|-----|



Abbildung 8: Vom Hersteller angegebenes Geschwindigkeitsprofil [7, S. 37]

Die in den Unterlagen vom Hersteller angegebene Bezeichnung IP 67 beschreibt die Schutzart gegen das Eindringen von Fremdkörpern und Feuchtigkeit. Die Ziffern stehen für

- 6: staubdicht
- 7: Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen (vgl. DIN EN 60529; VDE 0470-1:2014-09)

Militärstandart MIL-STD-1275D schreibt u.a. eine Spannungsfestigkeit von 250V für 50 μ S vor. (vgl. MIL-STD-1275D 2006, S. 15)

Ein wesentlicher Aspekt ist die Vibrationsfestigkeit. Durch starke, anhaltende Vibrationen wie sie bei Hubschraubern auftreten, kann die Bestimmung der Achsposition beeinträchtigt werden, oder in einer ungewollten Bewegung der Achse resultieren.

Gemäß Militärstandart MIL-STD-810G Method 514.6 ist die PTU vibrationsresistent im Bereich von 3 Hz bis 2000 Hz mit Beschleunigungswerten von mehr als 4,75g. (vgl. MIL-STD-1275D 2000, S. 514.6C-22)

3.3 Tests

Um das vom Hersteller angegebene Bewegungsprofil zu validieren und die vorhandene Regelung genauer zu untersuchen, werden verschiedene Tests durchgeführt.

Hierdurch sollen Erkenntnisse gewonnen werden, ob eine Steuerung der PTU hinreichend oder eine Regelung der Soll-Position erforderlich ist.

3.3.1 Validierung des Geschwindigkeitsprofils

Zunächst wird überprüft, ob das Geschwindigkeitsprofil der PTU aus Abbildung 8 dem der realen PTU entspricht. Hierfür wird eine Sequenz von Geschwindigkeitswerten kommandiert und über die Zustandsabfrage der PTU die Ist-Geschwindigkeit in regelmäßigen Abständen abgefragt und aufgezeichnet.



Abbildung 9: Aufgenommenes Geschwindigkeitsprofil der Pan- und Tiltachse

Abbildung 9 zeigt, dass das vom Hersteller angegebene Geschwindigkeitsprofil dem der realen PTU entspricht. Daraus ergibt sich, dass ein proportionaler Zusammenhang zwischen Drehrate und Zeit in der Steuerung berücksichtig werden kann.

3.3.2 Analyse der Beschleunigungskurve

Im nächsten Schritt wird getestet, ob sich bei Vorgabe einer Drehrate, kleiner der Maximaldrehrate, die Winkelbeschleunigung der entsprechenden Achse verringert.

Hierfür wird die Winkelgeschwindigkeit im Abstand von einer Sekunde um 5 % angehoben. Zusätzlich wird in unregelmäßigen Abständen ein Gegenmoment an der Achse aufgebracht, um so die Beschleunigung unabhängig von den Kommandos aus dem Stillstand heraus zu betrachten.



Beschleunigungsanalyse

Abbildung 10: Diagramm der Geschwindigkeit aus der Beschleunigungsanalyse

In dem Diagramm in Abbildung 10 ist zu sehen, dass die Kurven des Beschleunigungsvorganges nach jedem Abbremsvorgang, wie auch in Abbildung 9, eine lineare Steigung aufweisen.

Mit Hilfe der aufgezeichneten Messwerte und des mathematischen Zusammenhangs aus Winkelbeschleunigung und Zeit

$$\Delta \omega = \alpha * \Delta t \tag{3.1}$$

umgestellt nach der Winkelbeschleunigung

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \tag{3.2}$$

wird die Winkelbeschleunigung für die entsprechenden Steigungen berechnet.

Tabelle 8: Errechnete Beschleunigung aus den Messwerten

| Steigung: | Δω [°/s] | Δt [s] | α [°/s²] |
|-----------|----------|--------|----------|
| 1 | 4,89 | 0,08 | 60,32 |
| 2 | 9,72 | 0,16 | 59,70 |
| 3 | 14,80 | 0,25 | 59,94 |
| 4 | 24,63 | 0,41 | 59,99 |
| 5 | 34,57 | 0,58 | 60,00 |

Die Berechnungen ergeben, dass die Beschleunigung unabhängig von der kommandierten Geschwindigkeit als konstant angenommen werden kann.

Somit muss dieser Aspekt nicht zusätzlich bei der Konzipierung berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist bei den mit 6 gekennzeichneten Stellen eine Bewegung des Antriebes zu erkennen, die aus dem im Versuch wahrgenommenen durchrutschen des Antriebes resultiert.

3.3.3 Analyse der Regelstruktur

Im letzten Test wird die interne Regelung genauer untersucht.

Hierbei ist es für die Steuerung von Bedeutung, wie diese aufgebaut ist. Wird intern eine Integration der Drehrate über

$$\varphi = \int \omega \, dt \tag{3.3}$$

durchgeführt um den Winkel zu bestimmen, respektive eine Differentiation der Winkelstrecke über

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \tag{3.4}$$

um die Drehrate zu ermitteln, hat dies entsprechende Auswirkung auf die Steuerung.

Die Integration der Drehrate respektive Differentiation des Winkelstrecke über der Zeit kann Beispielsweise über einen Geschwindigkeits- oder Stellungsalgorithmus realisiert werden, der gleichzeitig als Regelung dient. (vgl. Taschenbuch der Regelungstechnik 2014, S. 558 ff.) Aus dieser Analyse ergibt sich somit, wie die Steuerung aufgebaut wird und welche Werte an die PTU gesendet und welche intern berechnet werden. Um die interne Regelung zu untersuchen, werden eine positive Winkelgeschwindigkeit und ein positiver Winkel kommandiert. Gleichzeitig wird ein Gegenmoment aufgebracht, das größer dem Drehmoment ist. Dies führt zu einer Rotation entgegen der eigentlichen Drehbewegung in negative Richtung.

Aus den vorherigen Tests ist bekannt, dass durch das Aufbringen eines Gegenmomentes ein durchrutschen des Antriebs resultiert. Wird in der PTU eine Integration der Drehrate durchgeführt, ist eine Zunahme der Wegstrecke, trotz Gegenmoment, zu erkennen.

Wird eine Differentiation der Wegstrecke durchgeführt, resultiert hieraus eine negative Drehrate.



Regleruntersuchung - Drehratendiagramm

Abbildung 11: Diagramm der Drehrate aus der Regleruntersuchung



Abbildung 12: Detaildarstellung der Drehrate



Abbildung 13: Positionsdiagramm aus der Regleruntersuchung

Das Diagramm aus Abbildung 11 und 12 zeigt die von der PTU ausgegebene Drehrate und das Diagramm aus Abbildung 13 die ausgegebene Position der PTU für die Zeit des Versuchsdurchlaufes.

Die Sprünge auf die Base Speed in der Detailansicht Abbildung 12 resultieren durch das Durchrutschen des Antriebes und sind trotz der Bewegung in die negative Richtung positiv. In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass zudem die Bewegung der Achse in die entgegengesetzte Richtung detektiert wird, trotz einer positiven Drehrate und Kommandierung eines Positiven Winkels.

Daraus ergibt sich, dass die Winkelgeschwindigkeit und die Position unabhängig voneinander in der PTU erfasst und verarbeitet werden.

3.4 Auswertung

Die Gegenüberstellung der Anforderungen, die durch den Einsatz resultieren und der Leistung der PTU zeigt, dass die PTU alle Bedingungen erfüllt und somit die volle Leistung genutzt werden kann.

Es muss nicht mit reduzierter Geschwindigkeit aufgrund äußerer Einflüsse verfahren werden, um so eine möglichst genaue Positionierung zu gewährleisten, da die PTU sowohl gegen elektrische als auch mechanische Einflüsse geschützt ist.

Die Winkelbeschleunigung kann als konstant angenommen werden, eine Abhängigkeit von der Drehrate oder Position muss nicht berücksichtigt werden.

Eine Implementierung einer zusätzlichen Regelung ist nicht notwendig, da die interne Regelung optimal auf die Hardware angepasst ist, sehr genau arbeitet und somit die Positioniergenauigkeit nicht verbessert, sondern möglicherweise sogar verschlechtert werden. Darüber hinaus kann das System durch eine zusätzliche Regelung instabil werden, da die vorhandene Regelung nicht abgeschaltet oder umgangen werden kann. Es ist lediglich möglich eine Drehrate zu kommandieren, jedoch wird das Erreichen und Halten der Drehrate über die interne Regelung überwacht.

Dass eine zusätzliche Regelstruktur zu Instabilität führt, soll zunächst mit Hilfe des Bode-Diagramms verdeutlicht werden. Das Bode-Diagramm ermöglicht die theoretische Beurteilung der Systemstabilität linearer, zeitinvarianter Systeme (LZI).

Mit Hilfe einer Gleichung, die das System im Bildbereich beschreibt G(s) und den dazugehörigen Streckenparametern K_I und T_I lässt das Übertragungsverhalten des Systems darstellen. (vgl. Taschenbuch der Regelungstechnik 2014, S. 291 ff)

Entscheidende Parameter für die Beurteilung sind

- die Durchtrittsfrequenz ω₀,
 hierbei ist die Verstärkung 1dB und der Ausgangswert entspricht dem Soll-Wert
- die Phasenreserve φ_R,
 Sicherheitsreserve zur Stabilitätsgrenze, die bei Parameteränderung für Schutz vor Instabilität sorgt. Üblich ist eine Phasenreserve von 60°. (vgl. Taschenbuch der Regelungstechnik 2014, S. 301)
- die kritische Frequenz ω_{Krit},
 bei der das System beginnt instabil zu werden. Diese liegt bei 180°.

Es ist anzunehmen, dass es sich bei der vorhandenen Regelung um eine Kaskaden Struktur mit Vorsteuerung und Sättigung handelt (Abbildung 14). Dies ist eine der meist genutzten Strukturen, da sie mehrere Vorteile bietet. (vgl. Taschenbuch der Regelungstechnik 2014, S. 791)

- Komplizierte Prozesse können in einfache, auszuregelnde Teilprozesse untergliedert werden.
- Störungen durchlaufen nicht die gesamte Regelschleife, sondern werden von untergelagerten Regelkreisen ausgeregelt.
- Maximalwerte der Regelgrößen können zum Schutz begrenzt werden.



Abbildung 14: Kaskadenstruktur mit Vorsteuerung und Sättigung

Die unabhängige Verarbeitung von Geschwindigkeit und Position, sowie die Begrenzung der Soll-Werte deuten darauf hin.

Genauere Untersuchungen diesbezüglich würden einen sehr großen, zeitlichen Aufwand bedeuten, stellt jedoch keinen Mehrwert für diese Bachelorarbeit dar. Aus diesem Grund wird im Weiteren angenommen, dass es sich um eine Kaskaden Struktur handelt.

Wie zuvor erwähnt, kann die interne Regelung weder umgangen, noch abgeschaltet werden. Somit müsste eine zusätzliche Regelung in diese Struktur integriert werden. Daraus resultiert, dass eine zusätzliche Verstärkung (Gain) der Regeldifferenz e_{ω} in den Regelkreis eingebracht wird.



Abbildung 15: Kaskadenstruktur mit zusätzlichem Regeler

Ein zusätzliches Gain sorgt für eine Verschiebung der Durchtrittsfrequenz ω_0 .

Dies soll mit Hilfe eines I-Gliedes in Reihe zu einer IT₁-Strecke verdeutlicht werden, da hier der Einfluss besonders deutlich wird.

Die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises lautet

$$G_{01}(s) = \frac{K_{I1}}{1 + T_{I1}s} * \frac{K_{I2}}{T_{I2}s (1 + T_{I2}s)}$$
(3.5)

mit den Parametern

$$K_{I1} = 1, T_{I1} = 2s$$

 $K_{I2} = 1, T_{I2} = 2s$

Zu dieser Strecke wird eine Verstärkung

$$K_{P} = 10$$

in Reihe geschaltet, somit lautet die Gesamt Übertragungsfunktion für den zweiten Regelkreis





Abbildung 16: Bodediagramm der Beispielstrecke

Wie Abbildung 16 zeigt, führt die Zusätzliche Verstärkung K_P dazu, das ω_{Krit} überschritten und dadurch das Beispielssystem instabil wird.

Um diese Annahme zu bestätigen, wird ein Test am realen System durchgeführt. Hierfür wird zunächst die Position 90 ° kommandiert. Im nächsten Schritt wird diese Position über eine Regler-Struktur angefahren. Hierbei wird lediglich eine Drehrate kommandiert, die sich aus der Regeldifferenz zwischen Soll- und Ist-Position über den Abtastzeitraum ergibt.



Gain Vergleich

Abbildung 17: Auswirkung einer zusätzlichen Verstärkung beim Anfahren einer Position

Abbild 17 zeigt wie erwartet, dass das System bereits bei einer Verstärkung der Regeldifferenz *e* von 2 beginnt, um die Soll-Position zu schwingen. Mit steigender Verstärkung nimmt dieser Einschwingvorgang zu.

Eine Verstärkung von 1 ist zu schwach, da die Soll-Position erst nach vier Sekunden erreicht wird, dies ist in der Praxis unzureichend.

Das System ist bei einer Verstärkung von 10 noch nicht instabil, jedoch zeigt der Einschwingvorgang auf die Soll-Position, dass sich das System an der Stabilitätsgrenze befindet. Das Betreiben der PTU an der Systemgrenze ist aus Sicht der Regelungstechnik nicht zielführend, da Änderungen der Parameter oder der äußeren Einflüsse zu Instabilität führen können.

Daraus ergibt sich, dass eine Steuerung, die die vorhandene Regelung nutzt, die sinnvollste Alternative darstellt.

Weiter zeigt sich, dass die vorhandene Regelung das Optimum darstellt und diese daher am Besten in die Steuerung eingebunden wird. Somit ist gewährleistet, dass das Anforderungsprofil an die Steuerung eingehalten und eine optimale Nachführung der PTU gemacht wird.

4 Konzipierung

Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wird die Steuerung für die PTU konzipiert. Hierbei ist das gestellte Anforderungsprofil des Kooperationspartners an die Steuerung zu beachten.

4.1 Anforderungskatalog

Ausgangssystem

Eine Pan-Tilt Unit PTU-D48 E der der Firma "Flir Motion Control Systems", die an dem Landegestellt des Hubschraubers "Super Artis" befestigt ist und während des Flugbetriebs zum Einsatz kommen soll.

Ist Zustand

Die zu steuernde PTU ist fertig montiert und voll ausgestattet. Sie ist mit dem Hauptrechner verbunden und die zur Kommunikation und Steuerung benötigte Software ist auf dem Computer vorhanden. Aktuell wird die PTU nur über eine Winkelvorgabe gesteuert.

Zielsetzung

Es soll eine Steuerung entworfen werden, die ausgehend von der Position des Targets und der Position, Geschwindigkeit, Lage und Lageänderung des Luftfahrzeugs die Schwenk-Neige Einheit kommandiert, um eine optimale Nachführung der Kamera zu gewährleisten und das Target im Fokus der Kamera zu halten. Tabelle 9: Anforderungskatalog

| Nr | Anforderung / Ziel | Beschreibung | Erforderlich | Optional | |
|-------|---|--------------------------------------|--------------|----------|--|
| C4 or | | | | | |
| Stet | | | | | |
| | Differenzwinkel zum | Der Differenzwinkel zwischen | | | |
| | larget < 1° | PIU Ausrichtung und Zielposition | Х | | |
| | | soll unter 1° in der Zielausrichtung | | | |
| | | Detragen | | | |
| 2 | Schnelles Anfahren | Die Zielposition soll so schnell wie | Х | | |
| | T Z ' T ['] TI 1 ' | moglich angefahren werden | | | |
| 3 | Kein Überschwingen | Die PTU soll die Zielposition ohne | Х | | |
| | | Uberschwingen anfahren | | | |
| 4 | Systemgrenzen | Die Regelung für die PTU soll die | | | |
| | einhalten | Systemgrenzen nicht überschreiten | Х | | |
| | | (max. Drehrahte/-winkel) | | | |
| 5 | Harmonischer | Die Bewegung der PTU soll glatt | X | | |
| | Bahnverlauf | sein, nicht stockend | | | |
| 6 | Gestaffelte Regelung | Die Regelung berücksichtig das | | | |
| | | Bewegungsprofil der PTU und | | | |
| | | verfügt über mehrere Regler für die | | x | |
| | | unterschiedlichen | | 28 | |
| | | Geschwindigkeiten (Base-/max. | | | |
| | | Speed) | | | |
| Soft | tware | | | | |
| 7 | Kompakt | Der Umfang des Codes soll | | v | |
| | | minimal gehalten werden | | Λ | |
| 8 | Ressourcensparend | Die Abarbeitung des Codes soll das | | | |
| | | System so wenig wie möglich | | Х | |
| | | belasten | | | |
| 9 | Übersichtlich | Es sollen eindeutige | | | |
| | | Bezeichnungen gewählt und die | v | | |
| | | vorhandene Architektur | Λ | | |
| | | eingehalten werden | | | |

4.2 Entwurf

Die Systemanalyse hat ergeben, dass das volle Potential der PTU genutzt werden kann, die interne Regelung optimal auf die Hardware angepasst ist und eine zusätzliche Regelung das System näher an die Stabilitätsgrenze bringt.

Da die interne Regelung auch nicht umgangen werden kann, ist es am effizientesten eine Steuerung zu entwickeln, die diese Reglung nutzt, um so die gestellten Anforderungen an die Steuerung zu erfüllen.



Abbildung 18: Target Vektor im BF Koordinatensystem

Abbildung 18 zeigt die Ausgangssituation. Das Trägerfahrzeug an dem die PTU befestigt ist und das Target, das durch die PTU im Bild der Kameras gehalten werden soll. Das Trägerfahrzeug bewegt sich tangential entlang und rotatorisch um die Achsen, siehe Abbildung 5.

Wie in Abbildung 6 zu sehen, führt die Kommandierung einer Position ohne Drehratenvorgabe zu einer ruckelnden Bewegung, sobald sich das Trägerfahrzeug bewegt, da diese Position mit der maximalen Drehrate angefahren wird und die PTU nach Erreichen der Position stoppt. Daraus ergibt sich, dass für eine kontinuierliche Bewegung der PTU nicht nur die Soll-Position kommandiert, sondern zusätzlich eine Drehrate vorgegeben werden muss.

Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge

$$\Delta \varphi = \omega * \Delta t \tag{4.1}$$

ergibt sich nach der Drehrate umgestellt

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \tag{4.2}$$

wobei $\Delta \varphi$ die Winkeldifferenz zwischen Soll- und Ist-Position ist. Da es sich hierbei um ein zeitdiskretes System handelt, ist Δt gleich der Abtastzeit, respektive die Zeitdifferenz zwischen den Aufrufen der Kommandoschleife.

Unter dieser Annahme erreicht die PTU die Soll-Position erst beim nächsten Aufruf der Kommandoschleife. Bei Erreichen der Position wird bereits eine neue Soll-Position kommandiert, hierdurch soll theoretisch eine kontinuierliche Bewegung resultieren.

Die Änderung der Soll-Position der PTU ist abhängig von der Bewegung und Lageänderung des Trägerfahrzeuges. Diese Änderung ist maßgeblich für die Winkeländerung. Da sich die

Lage des Targets zum Trägerfahrzeug mit der gleichen Geschwindigkeit ändert, soll so das Target im Bildmittelpunkt der Kamera bleiben.

Hierbei ist zu beachten, dass die Kommandierung der Soll-Position die sich aus der aktuellen Lage ergibt, während sich das Trägerfahrzeug bewegt, zu einem Nachlaufen der PTU führt, da nur die zurückliegende Änderung ausgeglichen wird.

Dieser Zusammenhang soll anhand der Abbildung 19 verdeutlicht werden.



Abbildung 19: Änderung des Target Vektor bei Bewegung

Abbildung 19 zeigt die Lage des Trägerfahrzeugs zum Target zum Zeitpunkt t_1 (links) und Zeitpunkt t_2 (rechts) sowie die Winkel der Pan- und Tilt-Achse zum jeweiligen Zeitpunkt.

Das Nachlaufen der PTU ergibt sich daraus, dass sich zum Zeitpunkt t_1 das Trägerfahrzeug an der Position P_1 befindet. Auf Basis dieser Position werden die entsprechenden Winkel für die Pan- und Tilt-Achse berechnet. Während die PTU diese Positionen anfährt bewegt sich das Trägerfahrzeug bereits zur nächsten Position P_2 .

Für die Position P_2 ergeben sich zum Zeitpunkt t_2 andere Winkel für die Pan- und Tilt-Achse, da sich durch die Bewegung die Lage das Trägerfahrzeugs zum Target geändert hat. Die Größe der Winkeldifferenz $\Delta \varphi$ um die die PTU nachläuft hängt von der Beschleunigung, Geschwindigkeit entlang und Drehraten um die jeweiligen Achsen des Trägerfahrzeuges ab.

Um dem Nachlaufen der Kamera entgegen zu wirken, werden die Sensordaten aus der IMU genutzt, um die zukünftige Position des Trägerfahrzeuges über einen möglichst geringen Zeitschritt zu prädizieren. Somit wird zusätzlich die zukünftige Änderung ausgeglichen, sodass das Target in der Theorie zu jedem Zeitpunkt im Bildmittelpunkt der Kamera liegt.

Der Zeitschritt sollte möglichst gering gewählt werden, um eine Änderung der tangentialen und rotatorischen Bewegung schnell zu verarbeiten und die Abweichung von der realen Bahn möglichst gering zu halten.

4.3 Sollwertberechnung

Die Soll-Drehrate und –Position der PTU sind von der Position P_F , Lage Q_F und Bewegung des Trägerfahrzeugs sowie von der Position des Targets P_T abhängig.

Die Positionen werden von der übergeordneten Software im Erath-Centered, Earth-Fixed (ECEF) System bereitgestellt.

Die Lage des Trägerfahrzeuges wird in Quaternionen angegeben. Ein Quaternion ist eine reelle Zahl i, die um den imaginären Anteil j, k, und l, ähnlich der komplexen Zahlen, erweitert wird und so ein vierdimensionales Zahlensystem bilden.

$$Q = \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \\ l \end{pmatrix}$$
(4.3)

Die Rotationsmatrix für das Quaternion q = [i, j, k, l] lautet

$$R_q^{\ 3} = \begin{bmatrix} 1 - 2(k^2 + l^2) & 2(jk - il) & 2(jl + ik) \\ 2(jk + il) & 1 - 2(l^2 + j^2) & 2(kl - ij) \\ 2(jl - ik) & 2(kl + ij) & 1 - 2(j^2 + k^2) \end{bmatrix}$$
(4.4)

Gegeben sind zwei Quaternionen $q = (x_0, x_1, x_3, x_4)$ und $p = (y_0, y_1, y_2, y_3)$, dann ist

$$q * p = \begin{pmatrix} x_0 y_0 - x_1 y_1 - x_2 y_2 - x_3 y_3 \\ x_0 y_1 + x_1 y_0 + x_2 y_3 - x_3 y_2 \\ x_0 y_2 - x_1 y_3 + x_2 y_0 + x_3 y_1 \\ x_0 y_3 + x_1 y_2 - x_2 y_1 + x_3 y_0 \end{pmatrix}$$
(4.5)

(vgl. Quaternions and rotation Sequences 1999)

Für die Berechnung der Soll-Werte wird zunächst die Zeitdifferenz seit dem letzten Funktionsaufruf ermittelt

$$\Delta t = t_{aktuell} - t_{letzer Aufruf}.$$
(4.6)

Diese Zeitdifferenz dient als Basis für die Prädizierung der zukünftigen Lage und Position des Trägerfahrzeuges.

Dies ist möglich, da durch die übergeordnete Struktur und genügend Rechenkapazitäten eine gleichbleibende Bearbeitungszeit und Aufrufhäufigkeit gewährleistet wird.

Im nächsten Schritt wird der zukünftige Zustand für die Position und Lage berechnet. Auf Basis der physikalischen Zusammenhänge

$$s = s_0 + v * \Delta t + \frac{1}{2} * a * \Delta t^2$$
(4.7)

und

$$v = v_0 + a * t \tag{4.8}$$

respektive

$$\varphi = \varphi_0 + \omega * \Delta t + \frac{1}{2} * \alpha * \Delta t^2$$
(4.9)

und

$$\omega = \omega_0 + \alpha * t \tag{4.10}$$

wird mit den vorhandenen Sensordaten werden die Werte des Trägerfahrzeuges für die X-, Yund Z-Achse nach 4.7 bestimmt.

Für die Prädizierung der Lage mit dem Quaternion der Drehraten $Q_D = (0, p_F, q_F, r_F)$ gilt

$$Q_{F,neu} = Q_F + 0.5 * \Delta t * Q_F * Q_D$$
(4.11)

Anschließend wird das Quaternion über

$$normal(Q) = \frac{i+j+k+l}{\sqrt{i^2+j^2+k^2+l^2}}$$
 (4.12)

normiert, um die Orthonormalität sicherzustellen. Die Positionsdaten des Targets bleiben unverändert.

Als nächstes wird über

$$\overrightarrow{P_{diff}} = \overrightarrow{P_T} - \overrightarrow{P_F}$$
(4.13)

der Differenz Vektor von $P_{\rm T}$ und $P_{\rm F}$ gebildet. Dadurch ändert sich der Ursprung des Koordinatensystems vom Mittelpunkt des Rotationsellipsoiden, hin zu dem des Trägerfahrzeuges, siehe Abbildung 20.



Abbildung 20: Target Vektor im BF Koordinatensystem

Im nächsten Schritt wird das Koordinatensystem um die Lage Trägerfahrzeuges korrigiert. Hierfür wird der Differenz Vektor mit der Rotationsmatrix multipliziert.

$$\overrightarrow{P_{neu}} = \overrightarrow{P_{diff}} * R_q^{3}$$
(4.14)

4.4 in eingesetzt in 4.14 ergibt somit

$$\begin{bmatrix} x_{neu} \\ y_{neu} \\ z_{neu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{diff} \\ y_{diff} \\ z_{diff} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} (a^2 + b^2 + c^2 + d^2) & 2(bc - ad) & 2(bd + ac) \\ 2(bc + ad) & (a^2 + b^2 + c^2 + d^2) & 2(cd - ab) \\ 2(bd - ac) & 2(cd + ab) & (a^2 + b^2 + c^2 + d^2) \end{bmatrix}$$

$$(4.15)$$

Mit Hilfe der trigonometrischen Beziehungen kann nun der Winkel für die Pan- und Tilt-Achse berechnet werden.



Abbildung 21: Winkelbeziehung am Target Vektor für die Pan-Achse

Abbildung 21 zeigt den Vektor vom Trägerfahrzeug zum Target, die Abstände dx und dy und den resultierenden Winkel γ .

Hierbei ist zu beachten, dass zuerst der Winkel γ für die Pan-Achse berechnet wird, da diese die Hauptdrehachse ist. Für die trigonometrischen Zusammenhänge gilt

$$\tan(\gamma) = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{4.16}$$

Umgestellt nach dem Winkel γ ergibt sich

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \tag{4.17}$$

Anschließend muss eine Passivtransformation des Koordinatensystems durchgeführt werden, da sich durch die Rotation der PTU die Position auf der *x* Achse im Koordinatensystem ändert. Wird diese Transformation nicht durchgeführt, würde der Winkel für die Tilt-Achse ausgehend von der Ursprungsposition berechnet werden.

Wenn sich das Target Beispielsweise hinter dem Trägerfahrzeug befindet, ergibt die Berechnung der Winkel für die Pan- und Tilt-Achse jeweils 180°. Das führt dazu, dass die PTU vom Target weg zeigt.



Abbildung 22: Passivtransformation des Koordinatensystems

Da es sich um eine reine Rotation um die z-Achse handelt, muss nur x_p neu berechnet werden, da der Wert für die y-Achse für die Berechnung nicht relevant ist. Hierfür werden wieder die trigonometrischen Zusammenhänge genutzt

Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, ergibt sich für x_{p*}

$$x_{p*} = x_p * \cos(\gamma) + y_p * \sin(\gamma) \tag{4.18}$$

Nach der Transformation wird der Winkel für die Tilt-Achse nach 4.18 über

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta z}{\Delta x}\right) \tag{4.19}$$

berechnet.



Abbildung 23: Winkelbeziehung am Target Vektor für die Tilt-Achse

Abbildung 23 zeigt den Vektor vom Trägerfahrzeug zum Target, die Abstände dx und dz und den resultierenden Winkel β .

Mit Hilfe der Zustandsabfrage werden die aktuellen Pan- und Tilt-Winkel der PTU bestimmt. Diese werden von dem Soll-Winkel abgezogen

$$\Delta \varphi = \varphi_{Soll} - \varphi_{Ist} \tag{4.20}$$

HSH|DLR

um so die zukünftige Winkeldifferenz $\Delta \phi$ zu ermitteln und den Basiswert ω_{Basis} über

$$\omega_{Basis} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \tag{4.21}$$

zu berechnen.

Die Winkeldifferenz $\Delta \phi$ wird nur dann innerhalb von Δt verfahren, wenn die PTU den Basiswert ω_{Basis} sofort einnimmt. Dies ist jedoch nur im Bereich der Base Speed der Fall (siehe Abbildung 9). Drehraten, die höher als die Base Speed sind, erfordern eine Beschleunigungsphase mit der Beschleunigungszeit tbeschl.

Die Wegstrecke φ ist die Fläche unter dem Graphen der Drehrate ω über die Zeit *T*.



Abbildung 24: Vergleich der Drehraten über die Zeit

Abbildung 24 zeigt den Verlauf von zwei Drehraten über die Zeit. Die blaue Linie zeigt den Verlauf für eine Drehrate die sofort eingenommen wird, die rote Linie für eine Drehrate bei der auf den Endwert hin beschleunigt werden muss.

Es ist zu erkennen, dass die Fläche unter der roten Linie kleiner ist, als unter der blauen. Daraus resultiert eine Differenz des zurückgelegten Weges. Um diese Differenz zu kompensieren, muss eine höhere Soll-Drehrate ω_{Soll} kommandiert werden, damit die Fläche unter beiden Graphen gleich groß ist.

Die Soll-Drehrate ω_{Soll} ergibt sich aus dem Basiswertes ω_{Basis} und dem Ausgleichswert $\omega_{auslgeich}$ für die Beschleunigungsphase. Der Ausgleichswert $\omega_{auslgeich}$ ist abhängig von der Höhe des Basiswertes ω_{Basis} und der momentanen Drehrate ω_{Ist} der jeweiligen Achse und ergibt sich wie folgt:

Die Soll-Position ist die Summe aus der linearen Bewegung und der gleichförmig beschleunigten Bewegung

$$\varphi_{Soll} = \varphi_{linear} + \varphi_{beschleunigung} \tag{4.22}$$

wobei

$$\varphi_{linear} = \varphi_{ist} + \omega_{Ist} * \Delta t \tag{4.23}$$

ist und

$$\varphi_{beschleunigung} = \frac{1}{2} * \alpha * t_{beschl}^2$$
(4.24)

Für den Ausgleichswert wird 4.22 umgestellt nach der Beschleunigungszeit tbeschl

$$t_{beschl} = \sqrt{\frac{2*\Delta\varphi}{\alpha}} \tag{4.25}$$

und ergibt eingesetzt in 4.10

$$\omega_{ausgleich} = \sqrt{2 * \Delta \varphi * a} \tag{4.26}$$

Ist wBasis größer als wIst ergibt sich für die Soll-Drehrate wSoll

$$\omega_{Soll} = \omega_{Basis} + \omega_{ausgleich} \tag{4.27}$$

Ist wasis kleiner als wist ergibt sich für die Soll-Drehrate wsoll

$$\omega_{Soll} = \omega_{Basis} - \omega_{ausgleich} \tag{4.28}$$

Bei der zu kommandieren Soll-Position φ_{Soll} ist ein weiterer Aspekte zu beachten. Die interne Regelung ist so ausgelegt, dass die PTU an der Soll-Position φ_{Soll} zum Stehen kommt. Um dies zu erreichen, wird intern eine Trajektorie berechnet die vorgibt, bis zu welchem Punkt die PTU beschleunigt und ab wann sie wieder verzögert.



Abbildung 25: Darstellung der intern Berechneten Bewegungstrajektorie der PTU

Dies kann u.U. dazu führen, dass die Soll-Drehrate wsoll nicht erreicht wird, da die intern berechnete, maximale Drehrate geringer ist.

Ist die Soll-Drehrate wsoll größer der Base-Speed ergibt sich die kommandierte Position **Ø**kommandiert ZU

$$\varphi_{kommandiert} = \varphi_{Soll} + \Delta \varphi \tag{4.29}$$

um diesen Sachverhalt zu kompensieren, da die Base-Speed von der PTU sofort erreicht wird und somit die Beschleunigungsdifferenz entfällt.

Damit ist gewährleistet, dass die PTU bis zu φ_{Soll} beschleunigt und erst danach verzögert. Da bei Erreichen der Position bereits eine neue Soll-Position berechnet wurde, wird somit die Verzögerungsphase umgangen.

Gleichzeitig sorgt dies dafür, dass sollte sich der nächste Aufruf der Steuerung sich verzögern, die PTU nicht an der Soll-Position stehen bleibt und dies zu einer stockenden Bewegung führt.

4.4 Programmierung

Auf Basis des Entwurfes wird die Steuerung programmiert und in das bestehende System integriert. Dazu wird die Klasse "PanTiltObjectTracker" genutzt.



Abbildung 26: Klassendiagramm der Klasse "PanTiltObjectTracker"

Abbildung 26 Zeigt das Klassendiagramm des PanTiltObjectTracker, die enthaltenen Attribute und Funktionen der Klasse sowie die dazugehörigen Oberklassen.

Das Klassendiagramm wurde nach UML2 Kompakt (2005), S. 24 angefertigt.



Abbildung 27: Aktivitätsdiagramm des Objekts "PanTiltObjectTracker"

Abbildung 27 zeigt das Aktivitätsdiagramm des Objekts "PanTiltObjektTracker" und den Ablauf innerhalb des Objektes nach Aufruf des entsprechenden Kommandos, für das Objekt im PTUController.

Das Aktivitätsdiagramm wurde nach UML2 Kompakt (2005), S. 27 angefertigt. Die Rechtecke gliedern sich wie folgt:

- ohne abgerundete Ecke beschreiben die Objekte
- mit den abgerundeten Ecken die Aktivität
- mit einer Spitze das Senden einer Aktivität
- mit einer Einkerbung das Empfangen durch eine Aktivität

Der Punkt ohne Umrandung zeigt den Startpunkt der Aktivität, der Punkt mit Umrandung das Ende. Die Umrandete Ziffer stellt einen Konnektor dar.

Durch die Aktivität "PTU Steuern" wird die Funktion "controlPanTiltUnit" aufgerufen.



Abbildung 28: Ablaufplan der Funktion "controlPanTiltUnit (links) und "getAngle" (rechts)

Abbildung 28 zeigt das Ablaufdiagramm der Funktion "controlPanTiltUnit" und der untergelagerten Funktion "getAngle". In den Ablaufdiagrammen sind die entsprechenden Vorgänge beschrieben.



Abbildung 29: Ablaufplan der entwickelten Steuerung "updateDesiredState"

Abbildung 29 zeigt das Ablaufdiagramm der konzipierten Steuerung aus Kapitel 4 mit den entsprechenden Vorgängen und Bedingungen.

5 Erprobung

Nach der Integration der Steuerung in die vorhandene Software, wird diese mit Hilfe der Simulation getestet. Die Simulation besteht aus der Software der Bodenstation "Maestro" mit der die Mission geplant und abgeflogen wird (siehe Abbildung 30). Einem Programm zum Erzeugen der Sensordaten, basierend auf der Bewegung des virtuellen Helikopters und einem Programm zur Visualisierung der Bilder aus der Sicht der PTU für die optische Kontrolle (siehe Abbildung 31).

Der Test mit der Simulation soll zeigen, wie sich die Steuerung unter idealen Bedingungen verhält und das keine unkontrollierten Bewegungen auftreten, durch die die reale PTU beschädigt wird.

Ist das Ergebnis der Simulation zufriedenstellend erfolgt der eigentliche Test mit der realen PTU.

5.1 Simulation

Bei der Planung der Mission wurde darauf geachtet, dass die anzufliegenden Punkte unterschiedliche Höhen aufweisen und kurven Radien bilden, um ein breites Spektrum an Bedingungen abzudecken.



Abbildung 30: modellierte Mission für den virtuellen Test

Abbildung 30 zeigt die geplante Mission. Das Kreuz zeigt die ungefähre Position des Targets, die rot markierten Zonen stellen Bereiche dar in die das Luftfahrzeug nicht eindringen darf.



Abbildung 31: Ausschnitt aus der visualisierungs Software

Abbildung 31 zeigt ein Bild aus der Sicht der PTU auf das Target. Die Koordinaten des Targets sind im System gespeichert. Die Steuerung soll die PTU so kommandieren, dass die Spitze dieses Targets, wie in der Abbildung zu sehen. während des gesamten Fluges im Bildmittelpunkt der Kamera ist.

5.1.1 Simulationsergebnisse

Wie eingangs angesprochen handelt es sich bei der virtuellen PTU um ein idealisiertes Model. Äußere Einflüsse auf die PTU, sowie Eigenschaften, wie die Übertragungsverzögerung, werden nicht simuliert.



Abbildung 32: Soll und Ist Bahnverlauf Pan-Achse in der Simulation (links) Sollwertabweichung von der Soll Bahn (rechts)



Abbildung 33: Soll und Ist Bahnverlauf Tilt-Achse in der Simulation (links) Sollwertabweichung von der Idealbahn (rechts)

Abbildung 32 und 33 zeigen die Messwerte für die Soll- und Ist-Position der Pan- und Tilt-Achse, sowie die Sollwertabweichung. Die rote Bahn zeigt die Soll-Position der PTU und damit den idealen Bahnverlauf. Dieser wurde über die Soll-Wertberechnung der Software erstellt. Die Ist-Position zeigt die Position der jeweiligen Achse zum entsprechenden Zeitpunkt.

Die Sollwertabweichung ergibt sich aus der Differenz zwischen Soll- und Ist-Position.

5.1.2 Auswertung

Zu beachten ist, dass neben der Steuerung auch die Simulation durch den Computer berechnet wird und es so zu unregelmäßigen Berechnungsintervallen kommt. Dieser Jitter beträgt im Mittel 0,05 S bei einem angestrebten Berechnungsintervall von 0,1 S.

Die Diagramme aus Abbildung 32 und 33 zeigen, dass die Pan- und Tilt-Achse dem idealen Bahnverlauf mit einer Abweichung von ± 0.6 ° folgen und keine unkontrollierten Bewegungen auftreten. Um sicher zu stellen, dass es sich hierbei nicht um eine Ausnahme handelt, wurde der Test mehrfach durchgeführt. Diese Tests erbrachten die gleichen Resultate.

5.2 Realer Test

Nachdem die Steuerung mit der Simulation erprobt und festgestellt wurde, dass diese wie gewünscht funktioniert und keine unkontrollierten Verhaltensweisen auftreten, wird die Steuerung im nächsten Schritt mit der realen PTU getestet.

Hierfür wird der in Abbildung 3 gezeigte Messaufbau, bestehend aus der PTU, IMU und dem Computer der für die Berechnung zuständig ist, verwendet.

Konfiguriert ist die PTU entsprechend Tabelle 10

| | Pan-Achse | Tilt-Achse |
|------------------------------------|-----------|------------|
| Beschleunigung [°/s ²] | 60 | 60 |
| Base Speed [°/s] | 10 | 10 |
| maximal Drehrate [°/s] | 60 | 50 |
| Minimal Drehrate [°/s] | 0 | 0 |
| Drehrate [°/s] | 60 | 50 |
| Maximaler Winkel [°] | 120 | 30 |
| Minimaler Winkel [°] | -120 | -90 |

Tabelle 10: Einstellungen der jeweiligen Achse

An der PTU ist eine der beiden Kameras und der Laser Abstandsmesser befestigt. Mit Hilfe von zwei GPS Antennen die an die IMU angeschlossen sind, wird mit einer Frequenz von 100 Hz die für die Ausrichtung der PTU benötigte die Position des Versuchsaufbaus bestimmt.



Abbildung 34: Testgelände für den Test an der realen PTU

Abbildung 34 zeigt das Gelände des DLR Braunschweig, auf dem der Testversuch durchgeführt wurde. Die Position des zu trackenden Targets (roter Kreis) ist ein passend platziertes "April-Tag" und wird mit Hilfe des GPS eingemessen. Das gelb eingezeichnete Koordinatensystem ist das Bezugssystem.

Die Bilder der Kamera werden zusätzlich zu den Status-Daten der PTU aufgezeichnet und für die Auswertung herangezogen. Das platzierte "April-Tag" dient u.a. dazu, diese besser auswerten zu können.

Der Versuchsablauf wird in mehrere Schritte unterteilt

- Rein lineare Bewegung
- Rein rotatorische Bewegung
- Kombinierte Bewegung

Die ersten beiden Schritte dienen dazu, das Verhalten der PTU bei den jeweiligen Bewegungen zu kontrollieren und die Systemkonfiguration zu überprüfen, um anhand der Ergebnisse Korrekturen durchzuführen. Nachdem das System entsprechend angepasst ist, wird eine kombinierte Bewegungssequenz durchlaufen. Dies soll den realen Einsatz simulieren.

Während des gesamten Versuches kam es zu einem anhaltenden Driften der Position in Z-Richtung. Dadurch war die Tilt-Achse beeinträchtigt und die Messwerte zeigen teilweise eine große Ungenauigkeit. Da Pan und Tilt gleich aufgebaut sind (siehe Untersuchung) wird im Weiteren nur die Pan Achse betrachtet und auf die Tilt Achse zurück geschlossen.

5.2.1 Vorversuch

Für die lineare Überprüfung wird der Messaufbau gradlinig und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten entlang der X-Achse des Bezugssystems am Target vorbei bewegt. Für die rotatorische Überprüfung wird der Messaufbau mit unterschiedlichen Drehraten um die Z-Achse des Bezugssystems gedreht. Im Anschluss werden die Messwerte ausgewertet und nötige Verbesserungen an der Systemkonfiguration und der Steuerung durchgeführt.





Abbildung 35: Soll und Ist Bahnverlauf für die Pan- und Tiltachse mit Detailansicht für die lineare Bewegung



Abbildung 36: Soll und Ist Bahnverlauf für die Pan- und Tiltachse mit Detailansicht für die Drehbewegung

Die Diagramme in Abbildung 35 und 36 zeigen den Verlauf der Achsposition über die Zeit. Zu beachten ist, dass das Aufzeichnen der Ist-Position eine höhere zeitliche Auflösung hat als die Kommandoschleife. Daraus resultiert die sägezahnähnliche Form.

Im Idealfall erreicht die PTU die Soll-Position, wenn die neue Position berechnet wird, wie in dem Ausschnitt der Pan-Achse bei linearer Bewegung in Abbildung 35 zu sehen ist.

Im Gegensatz zur rein linearen Bewegung, erreicht die PTU bei der reinen Drehbewegung die Soll-Position nicht immer zum entsprechenden Zeitpunkt. Aus den Messwerten geht hervor, dass die Winkeländerungen pro Zeitschritt bei der linearen und rotatorischen Bewegung an den entsprechenden Stellen gleich groß sind.

Die Prädiktion bei den Bewegungsarten unterscheidet sich dahingehend, dass bei der zukünftigen Position die Beschleunigungswerte in X-, Y- und Z-Richtung zur Verfügung stehen und einbezogen werden. Bei der Prädiktion der Lage stehen nur die Drehraten, jedoch nicht die Winkelbeschleunigung zur Verfügung.



Abbildung 37: Abweichender Bahnverlauf bei Berechnung mit und ohne Beschleunigung

Das Diagramm in Abbildung 37 zeigt den theoretischen Bahnverlauf einer Bewegung mit und ohne Berücksichtigung der Beschleunigung. Bei einer Anfangsgeschwindigkeit $\omega_0 = 1^{\circ}/s$ und einer Beschleunigung $\alpha = 1^{\circ}/s^2$ beträgt die Winkeldifferenz am Ende des Zeitraum von zwei Sekunden bereits 2° und verdeutlicht den Einfluss der fehlenden Winkelbeschleunigung. Die mögliche Ursache für das Nachlaufen der PTU bei der reinen Drehbewegung, kann der fehlende Wert für die Winkelbeschleunigung sein. Die Prädizierung ist maßgeblich für ω_{Soll} und $\Delta \varphi$ und basiert auf den entsprechenden Werten.

Zusätzlich hat sich während des Vorversuches ergeben, dass die Auflösung der Achsen von 0,006° auf 0,1° herabgesetzt werden muss, da aus der sehr hohen Auflösung des kommandierten Winkels und der Sensorik eine permanente, ruckelnde Bewegung der PTU resultiert.

Der Wert von 0,1° wurde durch praktische Versuche ermittelt, indem der Messaufbau nicht bewegt und die PTU durch die Steuerung auf das Target gerichtet wurde.

Hierbei wurde darauf geachtet, wie häufig und stark sich die PTU bewegt. Diese Achsauflösung stellt den Kompromiss zwischen Genauigkeit und Positionsstabilität dar.

Zusammengefasst geht aus dem Vorversuch hervor, dass die Systemkonfiguration, bis auf den Drift der Höhe, wie gewünscht arbeitet und die Steuerung mit der realen PTU funktioniert. Die Soll-Position wird bei geringen Geschwindigkeiten und Drehraten weitestgehend eingehalten und ist für den kombinierten Test bereit.

5.2.2 Hauptversuch

Im Hauptversuch wird festgestellt, wie sich die Steuerung bei einer kombinierten Bewegung aus Rotation und Translation verhält. Die Kombination aus den Bewegungen stellt die Größte Herausforderung an die Steuerung dar, da sowohl die Änderung der Position als auch der Lage kompensiert werden muss.

Untersucht wird, ob die Steuerung die Anforderungen unter diesen Bedingungen einhalten und eine Nachführung im Bereich der zulässigen Sollwertabweichung gewährleisten kann.

Zusätzlich zu den Statusdaten der PTU werden alle Sensordaten, die während dieses Versuches durch die IMU ausgegeben werden, aufgezeichnet. Somit sollen gleiche Versuchsbedingungen für spätere Test gewährleisten werden, um Änderungen und alternative Konzepte vergleichen zu können.



5.2.2.1 Versuchsergebnisse konzipierte Steuerung

Abbildung 38: Soll und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse bei der kombinierten Bewegung



Abbildung 39: Detailansicht der Messwerte für den Bahnverlauf der kombinierten Bewegung



Abbildung 40: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll)

5.2.2.2 Auswertung

Die Messwerte des Hauptversuches zeigen, dass die PTU zu Beginn des Versuches unerwartet um die Soll-Position herum schwingt. Nachdem sich das Schwingen stabilisiert hat, folgt die PTU weitestgehend der Soll-Position, siehe Detailansicht 1 Abbildung 39.

Im Vergleich zu der vorherigen Steuerung (Abbildung 6) weist die PTU zudem einen weniger stockenden Bahnverlauf auf. Bei abrupten Bewegungsänderungen ist ein erneutes Schwingen um die Soll-Position zu erkennen, siehe Detailansicht 2 Abbildung 39. Anschließend folgt die PTU weitestgehend der Soll-Position.

Aus der Analyse der Messwerte geht hervor, dass das Überschwingen aus einer zu späten Verzögerung resultiert. Aufgrund der daraus resultierenden Winkeldifferenz und erneuten, verspäteten Verzögerung resultiert ein entsprechendes Überschwingen in die Gegenrichtung. Da die interne Regelung der PTU durch die Resultate aus der Systemanalyse als Fehlerquelle ausgeschlossen werden kann, werden die kommandierten Werte der Steuerung genauer betrachtet.

Die Gegenüberstellung der kommandierten Position und der Ist-Position zeigt die Ursache für das Überschwingen.



Abbildung 41: Vergleich der kommandierten Position zur Ist-Position

Rechnerisch ergibt sich für die benötigte Verzögerung bei maximaler Geschwindigkeit vom Winkel an Punkt 1 zu dem Winkel an Punkt 2

$$\frac{2*-\Delta\varphi}{\Delta t^2} = \frac{2*-32,26^{\circ}}{0,595^2s^2} = -182,25^{\circ}/s^2$$

und liegt damit deutlich über der der PTU. Der Grund hierfür ist, dass das Geschwindigkeitsprofil der PTU nur bei der Berechnung der Drehrate berücksichtig wird, bei der Positionsberechnung hingegen nicht.

Eine Reduzierung der zusätzlich addierten Winkeldifferenz $\Delta \phi$ auf die Soll-Position ϕ_{Soll} kann dem überschwingen entgegenwirken. Dies wird in Kapitel 5.2.2.3 genauer untersucht.

Für den gesamten Versuch ergibt sich eine Sollwertabweichung *Tabelle 11: Abweichung vom Sollwert*

| | exklusive Überschwingen | inklusive Überschwingen |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Maximale Abweichung | ± 1,3° | -15° bis +5° |
| Mittelwert | 0,3530° | 0,5173° |
| Standartabweichung | 0,3765° | 1,2229° |

Hierbei ist zu beachten, dass die Sollwertabweichung bei einer kontinuierlichen Bewegung maximal ± 1 ° beträgt. Sobald eine Drehrichtungsänderung stattfindet, ergibt sich die maximale Sollwertabweichung von $\pm 1,3$ °. Eine mögliche Ursache hierfür wurde in der Auswertung des Vorversuches erläutert.



Abbildung 42: Aufnahmen von der Kamera an der PTU

Die Aufnahmen in Abbildung 42 sind von der Kamera, die an der PTU befestigt ist, bei unterschiedlichen Sollwertabweichung. Trotz der Abweichung ist das Target ist im Bild zu erkennen. Relevant hierbei sind die Abstände in Längs- und Querrichtung, sowie der Öffnungswinkel der Kamera.

Grundsätzlich ist das Target mit Hilfe der Steuerung trackbar, allerdings stellt die Sollwertabweichung eine Limitierung der Relativposition von Target und Position des Trägerfahrzeuges dar.

Aus der Analyse der Messergebnisse geht hervor, dass die Anforderungen an die Steuerung teilweise erfüllt sind.

5.2.2.3 Versuchsergebnis alternative Konzepte

Da das Überschwingen nicht praxistauglich ist, werden zusätzliche Konzepte mit Hilfe der aufgezeichneten Sensordaten getestet. Ausgangsbasis von zwei der drei Konzepte ist die im vorherigen Kapitel untersuchte Steuerung. Diese wurden dahingehen abgeändert, dass bei Konzept 2 die Winkeldifferenz $\Delta \varphi$ zum Ausgleich der Bewegungstrajektorie nicht zu der kommandierten Position hinzu addiert wird und bei Konzept 3 nur bis zu einer Winkeldifferenz $\Delta \varphi \leq 2^{\circ}$.

Die daraus resultierenden Messwerte geben Aufschluss über das Systemverhalten mit den entsprechenden Änderungen und nötige Änderung für eine Steuerung, die alle Anforderungen erfüllt.

Konzept 4 ist eine Regelung mit proportionalem Verstärker. Die Winkeldifferenz aus Soll- und Ist-Position wird mit dem Faktor 1,75 multipliziert und als Soll-Geschwindigkeit kommandiert. Durch die Systemanalyse hat sich herausgestellt, dass bei einer Verstärkung von 2 das System beginnt, leicht um die Soll-Position zu schwingen. Eine Verstärkung von 1 ist jedoch zu schwach. Somit wird dieser Wert als Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Stabilität gewählt, um die grundlegend unterschiedlichen Konzepte miteinander zu vergleichen. Konzept 2: Konzipierte Steuerung ohne zusätzliches $\Delta \varphi$

Der Sollwert beschreibt den idealen Bahnverlauf, der Istwert die Position der PTU.



Abbildung 43: Soll (Ideal) und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse ohne Beschleunigungsausgleich



Abweichung kombinierte Bewegung ohne Beschleunigungsausgleich

Abbildung 44: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll) ohne Beschleunigungsausgleich

Konzept 3: Begrenzung des zusätzlichen Winkels auf 2°

Der Sollwert beschreibt den idealen Bahnverlauf, der Istwert die Position der PTU.



Abbildung 45: Soll (Ideal) und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse mit Zusatzwinkelbegrenzung



Abbildung 46: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll) mit Zusatzwinkelbegrenzung

Konzept 4: Reine P-Regelung

Der Sollwert beschreibt den idealen Bahnverlauf, der Istwert die Position der PTU.



Abbildung 47: Soll (Ideal) und Ist Bahnverlauf der Pan-Achse mit P-Regeler



Abbildung 48: Sollwertabweichung der Pan-Achse von der Idealbahn (Soll) mit P-Regler

| | Konzept 1 | Konzept 2 | Konzept 3 | Konzept 4 |
|---------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Maximale Abweichung | $+5^{\circ}$ bis -15° | +4,0° bis -1,8° | +4,1° bis -1,6° | +11,0° bis -3,8° |
| Mittelwert | 0,5173° | 0,5657° | 0,3963° | 1,3605° |
| Standartabweichung | 1,2229° | 0,6346° | 0,5634° | 1,7275° |

Tabelle 12: Vergleich der Sollwertabweichung zwischen den unterschiedlichen Konzepten

5.2.3 Zusammenfassung

Konzept 4 weist im Vergleich zu Konzept 2 und 3 das stärkste Überschreiten der Soll-Position zu Beginn des Versuches auf. Darüber hinaus wiederholt sich das Überschreiten der Soll-Position bei jeder Drehrichtungsänderung. An den mit 1 und 2 bezeichneten Stellen in der Abbildung XXX tritt zudem ein unerwartetes Verhalten auf. Der Verlauf folgt nach kurzer Zeit nicht mehr dem der Soll-Position. In Kombination mit der konstant hohen Sollwertabweichung ist dieses Konzept ungeeignet.

Die Messwerte der Konzepte 2 und 3 bestätigen die Annahme aus 5.2.2.2. Die Änderung bei der Addition der Winkeldifferenz auf die Soll-Position hat direkte Auswirkung auf das Überschwingen zu Beginn des Versuches. Bei Konzept 3 ist es deutlich reduziert, bei Konzept 2 wie erwartet nicht vorhanden, da hier die interne Regelung die Drehrate automatisch anpasst. Gleichzeitig ist die Sollwertabweichung über den gesamten Verlauf größer als bei Konzept 1. Die Ursache hierfür ist die in 4.3 angesprochene, interne Berechnung der Bahntrajektorie und damit einhergehend die Limitierung der erreichbaren Drehrate.



Abbildung 49: Vergleich der Drehraten zwischen den unterschiedlichen Konzepten

Abbildung 49 zeigt den Vergleich der Ist-Drehraten der Konzepte 1, 2 und 3 aus den Statusdaten der PTU. Der Vergleich der Ist-Drehraten bestätigt die vorherige Annahme.

Aus dem Vergleich der alternativen Konzepte mit dem Ursprünglichen Konzept geht hervor, dass diese bis auf das Überschreiten der Soll-Position zu Beginn des Versuches eine schlechtere Performance aufweisen.

Dennoch wird durch die Versuche die Ursache für das Einschwingen auf die Soll-Position aus Abbildung 38 verdeutlicht und ermöglicht durch die Ergebnisse Rückschlüsse für die Verbesserung von Konzept 1.

Zusammengefasst ergibt sich für die Checkliste in Tabelle 13

| Nr | Anforderung / Ziel | Erfüllt | | |
|------|----------------------|----------|-----------|-------|
| | | Komplett | Teilweise | Nicht |
| Steu | erung | · | | |
| 1 | Differenzwinkel zum | | x | |
| | Target < 1° | | Λ | |
| 2 | Schnelles Anfahren | X | | |
| 3 | Kein Überschwingen | | Х | |
| 4 | Systemgrenzen | | v | |
| | einhalten | | Λ | |
| 5 | Harmonischer | v | v | |
| | Bahnverlauf | Λ | Λ | |
| 6 | Gestaffelte Regelung | Х | | |
| Soft | ware | | | |
| 7 | Kompakt | Х | | |
| 8 | Ressourcensparend | X | | |
| 9 | Übersichtlich | X | | |
| | | | | |
| | Gesamt | | Х | |

Tabelle 13: Checkliste für die Beurteilung der Steuerung

Eine zusätzliche Implementierung einer Kontrollstruktur gegen das Überschwingen kann zu Verbesserung der Gesamtperformance von Konzept 1 Beitrag. Diese Verbesserung kann jedoch aufgrund der Zeitlichen Beschränkung nicht mehr im Rahmen dieser Bachelorarbeit erfolgen.

6 Fazit / Aussichten

Diese wissenschaftliche Arbeit hat versucht, die Frage zu beantworten: "Wie muss die Steuerung aufgebaut sein, um die Kamera nachzuführen und zu stabilisieren?" Zu diesem Zweck wurden ausführliche Analysen unter Untersuchungen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Steuerung prinzipiell geeignet ist, um ein Kamerasystem mit der hier behandelten Schwenk-Neige Einheit nachzuführen und das gewünschte Target trotz Bewegung des Trägerfahrzeugs im Bild zu halten.

Beim Anfahren an die Soll-Position zeigen sich die Schwächen der Steuerung, da die PTU zunächst um die Soll-Position schwingt. Nachdem sich dieser Zustand stabilisiert hat, folgt die PTU der Soll-Position mit einer Abweichung von 0,35 ° im Mittel und einer Standartabweichung von 0,38 °.

Als Alternative dazu kann Konzept 2 genutzt werden. Die Soll-Position wird ohne Einschwingen erreicht und die Abweichung beträgt im Mittel 0,57 ° mit einer Standartabweichung von 0,63 °.

Die Analyse des Systems, die mathematische Ausarbeitung und der entwickelte Algorithmus stellen eine Ausgangsbasis für zukünftige Entwicklungen dar.

Kritisch anzumerken ist, dass während der Ausarbeitung des Konzeptes ein wesentlicher Punkt nicht beachtet wird und dadurch Zeit in die Untersuchung investiert werden muss. Zusätzlich können nicht alle an die Steuerung gestellten Anforderungen eingehalten werden.

Zukünftige Arbeiten an der Steuerung können an dieser Stelle ansetzen und entsprechende Erweiterungen einbringen, die mit den bisherigen Ergebnissen verglichen werden können.

7 Literaturverzeichnis

- DIN EN 60529; VDE 0470-1:2014-09 Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code) (IEC 60529:1989 + A1:1999 + A2:2013), VDE-Verlag, Berlin
- 2. Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegrty (2006): Unterstanding GPS, Principles and Applications, zweite Auflage, Norwood
- Heide Balzert (2005): UML2 Kompakt mit Checklisten, 2. Auflage, München, Elsevier GmbH
- Prof. Dr.-Ing. Holger Lutz, Prof.-Dr.-Ing. Wolfgang Wendt (2014): Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink; 10., erg. Aufl.; Ulm; Europa-Lehrmittel
- Jack B. Kuipers (1999): Quaternions and rotation Sequences: a Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality, Princeton University Press, New Jersey
- 6. MIL-STD-1275D (2006): CHARACTERISTICS OF 28 VOLT DC ELECTRICAL SYSTEMS IN MILITARY VEHICLES, DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD, Warren
- 7. MIL-STD-810G (2000): ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONSIDERATIONS AND LABORATORY TESTS, US Army Developmental Test Command, Aberdeen
- 8. Stefan Hrabar (2008): 3D path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft UAVs, Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference, Nice/France

8 Quellen

- [1] http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10002/#/DLR/Start/About stand 01.02.2018
- [2] https://astro.marxram.de/astro-tipps/beobachtung-der-iss/ stand 03.02.2018
- [3] Pan-Tilt Unit Datasheet, FLIR Motion Control Systems
- [4] Krishnavedala Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37182608
- [5] https://www.researchgate.net/Body-fixed-coordinate-system-force-and-moment-vectors_fig1_235762707, stand 10.02.2018
- [6] Pan-Tilt Unit User Manuel, FLIR Motion Control Systems, Version 4.20
- [7] Pan-Tilt Unit Command Reference Manual, FLIR Motion Control Systems, Version 6.00

Eigenständigkeitserklärung

Erklärung über das selbstständige Verfassen von Thomas Schubert, Matr.-Nr.: 1303188.

Ich versichere hiermit, dass ich die vorstehende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit "Positionsregelung einer Schwenk-Neige Einheit zur Nachführung und Stabilisierung einer Kamera", die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, habe ich in jedem einzelnen Fall durch die Angabe der Quelle bzw. der Herkunft, auch der benutzten Sekundärliteratur, als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet und anderen elektronischen Textund Datensammlungen und dergleichen. Die eingereichte Arbeit ist nicht anderweitig als Prüfungsleistung verwendet worden oder in deutscher oder in einer anderen Sprache als Veröffentlichung erschienen. Mir ist bewusst, dass wahrheitswidrige Angaben als Täuschung behandelt werden.

Hannover, den 14.02.2018 Ort, Datum

Unterschrift