DHBW
Duale Hochschule
Baden-Württemberg
Karlsruhe

RaHM-Lab: Positionsregelung Drohne

T3100

für die Prüfung zum
Bachelor of Science

im Studiengang Informatik
an der DHBW Karlsruhe

von

Michael Maag

17.05.2022

Bearbeitungszeitraum	6 Monate
Matrikelnummer	6170558
Gutachter der DHBW Karlsruhe	Prof. Dr. Marcus Strand

Michael Maag
Freidorfstraße 14
97957 Wittighausen

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Ausarbeitung T3100 mit dem Thema “RaHM-Lab: Positionsregelung Drohne“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Wittighausen, 17.05.2022

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog Digital Converter
GPIO	General Purpose Input Output
HAL	Hardware Abstraction Layer
I/O	Input/Output
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
mm	Millimeter
POST	Power-on Self-Test
PWM	Puls Width Modulation
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus

Tabellenverzeichnis

Code-Verzeichnis

1 Einleitung

“Über den Wolken muss die Freiheit wohl grenzenlos sein.“

aus dem Lied *Über den Wolken* von Reinhard Mey, 1973 [3]

Menschen sehnten sich seit jeher, fliegen zu können. BESCHREIBUNG! *irgendwas mit Ikarus*

BESCHREIBUNG! *Erste motorisierte Flüge - 1903 Gebrüder Wright*

Dronen als zukünfiges Verfehkrsmittel für kurzstreckentransporte

Dronen auf dem Mars, Ingenuity Feb 2021

Anmerkung: Für diese Ausarbeitung werden fachliche Begrifflichkeiten vorausgesetzt, sofern diese nicht innerhalb der Ausarbeitung erklärt werden. Sind Begriffe für Lesende unklar, sind diese an geeigneter Stelle nachzuschlagen. Auf eine voranstehende Erklärung aller genutzten und nicht näher erklärten Begriffe wird in dieser Ausarbeitung verzichtet, um den Rahmen dieser Arbeit einhalten zu können.

2 Problemstellung

Fluggeräte jeder Ausführung können durch Umwelteinflüsse von ihrer Position abgetrieben werden (vgl. [4]). Während der Versuchsdurchführung von Studierenden der DHBW Karlsruhe an einem Quadrokopter hat sich gezeigt, dass sich das Halten einer Position für Piloten mit geringer Erfahrung als schwierig erweist. Beschädigungen der in Laborversuchen eingesetzten Hardware ist zu vermeiden. Die Versuchsdurchführung *Höhenregelung*[1] soll für die Studierenden dahingehend vereinfacht werden, alsdass der eingesetzte Quadrokopter die horizontale Bewegung selbstständig regelt.

Zu entwickeln ist eine Positionsregelung auf Basis der verfügbaren Beschleunigungswerte der Drohne. Optional kann die Regelung um ein bildgestütztes System erweitert werden.

Für die Positionsregelung können unterschiedliche Modi entwickelt werden:

- Halten der Position nach einer manuellen Positionsänderung
- Anfliegen von vorgegebenen Positionen. Hierbei ist ein Überschwingen möglichst zu vermeiden.

Durch die Anschaffung eines neuen Quadrokopters erweitert sich die Aufgabenstellung um den Aufbau des Bausatzes und die Inbetriebnahme des Quadrokopters, an dem die Positionsregelung implementiert werden soll. Die Anpassung der Versuchsbeschreibung an die geänderte Hardware ist gewünscht.

Eine tabellarisch angelegtes Lastenheft ist BESCHREIBUNG! *im Kapitel Anhang...* einzusehen.

[1] Bei dem Laborversuch *Höhenregelung* sollen Studierende eine ROS-Node erstellen, welche eine konstante Flughöhe des Quadrokopters ermöglicht. Hierzu wird als Rückführungsgröße des Regelkreises die Abstandsmessung zwischen Quadrokopter und der daruterliegenden Ebene eingesetzt.

3 Methodik

Analyse des Systems „Drohne“ (Geometrie, Regel- und Messgrößen) Analyse möglicher Messgrößen (Beschleunigungssensorik, evtl. Bilddaten) Modellierung des Regelsystems Entwurf eines geeigneten Reglers Implementierung des entworfenen Reglers Testen und optimieren der Regelparameter

3.1 Eingesetzte Software

3.1.1 ROS

Das *Robot Operating System* (*ROS*) ist eine *Open Source* Bibliothek, welche dem Nutzer eine modulare Architektur ermögicht. Hierbei kommunizieren *Nodes* mittels *Messages* miteinander.(vgl. [5])

Die *ROS* Versionen werden jeweils mit Namen versehen, wobei die Anfangsbuchstaben der Versionen der alphabetischen Nummerierung entsprechen. In diesem Projekt wurde die aktuellste *ROS*-Version *noetic* eingesetzt.

Die *ROS-Nodes* wurden mittels *catkin* compiliert.

3.1.2 Ubuntu - Betriebssystem

3.1.3 Visual Studio - IDE

4 Quadrokopter als System

4.1 Geometrien

4.1.1 +-Anordnung

4.1.2 x-Anordnung

4.2 Freiheitsgrade

6 Freiheitsgrade, tatsächlich 4 individuell regelbar.

5 Eingesetzte Hardware

Bei dem für die DHBW Karlsruhe neu angeschafften Quadrokopter handelt es sich um das Modell *Clover 4.20* des Unternehmens *Copter Express* (*COEX*).

Das Modell *Clover 4.20* wurde vom Hersteller zur Ausbildung und Forschung an Quadrokoptern entwickelt. Das Modell besitzt einen Rahmen, welche die Rotoren bei Kollisionen schützten soll.

5.1 COEX Drohne

Bei dem für die DHBW Karlsruhe neu angeschafften Quadrokopter handelt es sich um das Modell *Clover 4.20* des Unternehmens *Copter Express* (*COEX*).

Das Modell *Clover 4.20* wurde vom Hersteller zur Ausbildung und Forschung an Quadrokoptern entwickelt. Das Modell besitzt einen Rahmen, welche die Rotoren bei Kollisionen schützten soll.

Interner Flight Controller, ROS Kommunikation via Pie 4.

Probleme bei Inbetriebnahme - Beispielprogramm des Herstellers bringt nicht das erwartete Ergebnis.

5.1.1 Geometrie

Anordnung der Rotoren

X

5.1.2 Control Stack

BESCHREIBUNG! *Bezeichnung auf deutsch?*

Flight Controller

PX4 Racer

On Board Computer

Raspberry Pie 4

5.1.3 Funkfernsteuerung

s-Bus ??

5.1.4 Sensorik

Gyroskop

Laser-Abstandsmessung

Bodenkamera

GPS

5.1.5 Aufbau des Bausatzes

Aufbau

BESCHREIBUNG! *Bilder vom Aufbau*

Troubleshooting

Platinenfehler

Bus-System des RC Empfängers

5.1.6 Inbetriebnahme

Konfiguration des Flight Controllers

Troubleshooting

BESCHREIBUNG! *Topics anders benannt, als in Dokumentation (überall steht /mavros"davor*

BESCHREIBUNG! *Achtung: der Regler VRA muss so eingestellt sein, dass "manual Flight"verfügbar ist. Andersfalls ist ein Start der Drohne nicht möglich.*

Clover ist faul

Um Ressourcen zu sparen werden einige *ROS-Topics* nicht vom *Raspberry Pie 4* verarbeitet beziehungsweise weitergegeben.

`Lösung`
Unterdrückte *ROS-Topics* müssen BESCHREIBUNG! *ungetested!*

https://clover.coex.tech/en/mavros.html

Freigegebene *ROS-Topics* in `mavros.launch`

```
<rosparam param="plugin_whitelist">
  - altitude
  - command
  - distance_sensor
  - ftp
  - global_position
  - imu
```

```
  - local_position
  - manual_control
  # - mocap_pose_estimate
   - param
   - px4flow
   - rc_io
   - setpoint_attitude
  - setpoint_position
  - setpoint_raw
  - setpoint_velocity
  - sys_status
  - sys_time
  - vision_pose_estimate
  # - vision_speed_estimate
  # - waypoint
</rosparam>
```

Code 1: Freigegebene *ROS-Topics* in `mavros.launch`

md5-Sum des Topics OverrideRCIn

Nach erfolgreicher Kompilierung wird nachfolgender Laufzeitfehler ausgegeben, wenn sich ein `ros::Subscriber` oder ein `ros::Publisher` auf das *ROS-Topic* `/mavros/rc/override` anmeldet:
[ERROR] [1643616625.226584828]: Client [/mavros] wants topic /mavros/rc/override to have datatype/md5sum [mavros_msgs/OverrideRCIn/73b27a463a40a3eda1f9fbb1fc86d6f3], but our version has [mavros_msgs/OverrideRCIn/fd1e1c08fa504ec32737c41f45223398]. Dropping connection.

Lösung
Definition von
`struct MD5Sum<::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>`
aus

```
sudo nano /opt/ros/noetic/include/mavros_msgs/OverrideRCIn.h
```

Code 2: Befehl zum Öffnen des *OverrideRCIn*-Headers

```
template<class ContainerAllocator>
struct MD5Sum<::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>>
{
    static const char* value()
    {
        return "73b27a463a40a3eda1f9fbb1fc86d6f3";
    }

    static const char* value(const ::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>&)
    {
        return value();
    }

    static const uint64_t static_value1 = 0x73b27a463a40a3edULL;
    static const uint64_t static_value2 = 0xa1f9fbb1fc86d6f3ULL;
};
```

Code 3: Definition des Struct `MD5Sum` für das Template *OverrideRCIn*

von dem *Raspberry Pie 4* kopieren und in der Definition des lokalen *ROS OverrideRCIn*-Headers ersetzen.

Topics OverrideRCIn läuft nur mit Topic RCIn

Lösung

5.1.7 Topics setpoint_altitude/thrust läuft nicht

Lösung

5.1.8 Mögliche Lösung der Aufgabenstellung

COEX-Package

Für die Interaktion mit der COEX-Drohne wurden diverse Klassen erstellt, um einzelne Aspekte der Interaktion mit der Drohne umsetzen zu können.

geeignete Topics

Mit dem *ROS-Topic*`blablub` BESCHREIBUNG! kann eine Regelung in der XY-Ebene umgesetzt werden. Die Höhenregelung kann mit set_attitude/thrust eingeführt werden. Somit wäre der Versuch für nachfolgende Studierende sehr viel sicherer und so.

5.2 Parrot Drohne

Um die Problematik der COEX Drohne zu umgehen, steigt diese Arbeit auf die Drohne um, welche die Idee für diese Studienarbeit ergeben hat.

Parrot AR.Drohne 2.0

Laut hersteller folgende Sensorik:

Ultraschall-Sensoren für Bodenabstand

Kamera unten

Kamera vorn

Magnetometer

Beschleunigungssensoren

Sobald IB mit dieser Drohne möglich, wird hier mehr beschrieben.

Falls auch das nicht geht, dann halt Gezabo :D

5.2.1 Geometrie

Anordnung der Rotoren

X

5.2.2 Control Stack

BESCHREIBUNG! *Bezeichnung auf deutsch?*

5.2.3 Sensorik

Gyroskop

Magnetometer

Ultraschall-Abstandsmessung

Bodenkamera

Frontkamera

6 Regelsysteme

Evtl Norm „IEC 60050-351 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik“ zitieren, auf jeden Fall als Grundlage heranziehen. + Vorlesung Regelungstechnik von Studium MB13VT

6.1 Arten von Reglern

6.1.1 P-Regler

6.1.2 I-Regler

6.1.3 D-Regler

6.1.4 PID-Regler

6.1.5 PT-Regler

7 Positionsregelung von Quadrokoptern

7.1 Positionsregelung von Quadrokoptern aus Beschleunigungsdaten

8 Analyse der verfügbaren ROS-Topics

8.1 ROS-Messages

8.2 mavros als Abstraktionsebene

mavros ist eine Bibliothek, welche allgemein für Fluggeräte mit 4 Freiheitsgraden erstellt wurde. Zusätzlich können verschiedene Sensordaten übermittelt werden.

8.3 ROS-Topics

In diesem Kapitel sollen die möglicherweise für diese Studienarbeit tauglichen *ROS-Topics* beschrieben werden.

8.3.1 /mavros to /simple_offboard

/mavros/state

Übergibt den Zustand der *State Machine* des *Flight Controller*.

/mavros/battery

Übergibt die Spannung und den Ladezustand des Akkus. Da der Akku ausschließlich mit dessen Spannungsversorgung an die Drohne angeschlossen wird, sind keine weiteren Daten verfügbar. BESCHREIBUNG! *evtl noch Stromstärke?*

/mavros/global_position/global

Keine Informationen im Ruhezustand

/mavros/local_position/pose

Liest Rangefinder aus (z-Position wird angeasst), ändert aber sonst keine Position. Typ: position: orientation:

/mavros/local_position/velocity_body

/mavros/manual_position/control

8.3.2 /simple_offboard to /mavros

8.3.3 unklar

/mavros/global_position/local

Keine Informationen im Ruhezustand

/mavros/global_position/home

Keine Informationen im Ruhezustand Evtl, weil hier nichts definiert wurde?

/mavros/local_position/odom

8.3.4 externe Steuerung

/mavros/rc/in

Signal der Fernsteuerung.
Typ: mavros::RCIn
channel[0] =
channel[1] =
channel[2] =
channel[3] =

/mavros/rc/override

Überschreibt das Signal der Fernsteuerung. Allerdings nimmt mavros vermutlich weiterhin das original-Signal /mavros/rc/in auf. Somit kommt es zu Störungen der gewünschten Motordrehzahlen. Typ: mavros::OverrideRCIn Channel-Belegung wie *ROS-Topic*/mavros/rc/in.

8.3.5 Informative Topics

/mavros/imu/data

Sendet Lage und Beschleunigungsdaten.
Typ: sensor_msgs::Imu
orientation: Winkel um die Achsen [ř]
angular_velocity: Geschwindigkeit entlang der Achsen $[m/s]$
linear_acceleration: Beschleunigung entlang der Achsen $[m/s^2]$

/rangefinder/data

/mavlink/from

/mavros/rc/out

Gibt die PWM-Modulation der Motoren an - oder die Drehzahl. BESCHREIBUNG! *Nochmal in der Doku nachschauen.* Typ: mavros::RCOut

8.4 Troubleshooting

BESCHREIBUNG! *Topics anders benannt, als in Dokumentation (überall steht /mavros"davor*

BESCHREIBUNG! *Achtung: der Regler VRA muss so eingestellt sein, dass "manual Flight"verfügbar ist. Andersfalls ist ein Start der Drohne nicht möglich.*

8.4.1 Clover ist faul

Um Ressourcen zu sparen werden einige *ROS-Topics* nicht vom *Raspberry Pie 4* verarbeitet beziehungsweise weitergegeben.

Lösung

Unterdrückte *ROS-Topics* müssen BESCHREIBUNG! *ungetested!*

https://clover.coex.tech/en/mavros.html

Freigegebene *ROS-Topics* in `mavros.launch`

```
<rosparam param="plugin_whitelist">
  - altitude
  - command
  - distance_sensor
  - ftp
  - global_position
  - imu
  - local_position
  - manual_control
  # - mocap_pose_estimate
   - param
   - px4flow
   - rc_io
   - setpoint_attitude
  - setpoint_position
  - setpoint_raw
  - setpoint_velocity
  - sys_status
  - sys_time
  - vision_pose_estimate
  # - vision_speed_estimate
  # - waypoint
</rosparam>
```

Code 4: Freigegebene *ROS-Topics* in `mavros.launch`

8.4.2 md5-Sum des Topics OverrideRCIn

Nach erfolgreicher Kompilierung wird nachfolgender Laufzeitfehler ausgegeben, wenn sich ein `ros::Subscriber` oder ein `ros::Publisher` auf das *ROS-Topic* `/mavros/rc/override` anmeldet:
[ERROR] [1643616625.226584828]: Client [/mavros] wants topic /mavros/rc/override to have datatype/md5sum [mavros_msgs/OverrideRCIn/73b27a463a40a3eda1f9fbb1fc86d6f3], but our version has [mavros_msgs/OverrideRCIn/fd1e1c08fa504ec32737c41f45223398]. Dropping connection.

Lösung

Definition von

`struct MD5Sum<::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>>`

aus

```
sudo nano /opt/ros/noetic/include/mavros_msgs/OverrideRCIn.h
```

Code 5: Befehl zum Öffnen des *OverrideRCIn*-Headers

```
template<class ContainerAllocator>
struct MD5Sum<::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>>
{
    static const char* value()
    {
        return "73b27a463a40a3eda1f9fbb1fc86d6f3";
    }

    static const char* value(const ::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>&)
    {
        return value();
    }

    static const uint64_t static_value1 = 0x73b27a463a40a3edULL;
    static const uint64_t static_value2 = 0xa1f9fbb1fc86d6f3ULL;
};
```

Code 6: Definition des Struct `MD5Sum` für das Template *OverrideRCIn*

von dem *Raspberry Pie 4* kopieren und in der Definition des lokalen *ROS OverrideRCIn*-Headers ersetzen.

8.4.3 Topics OverrideRCIn läuft nur mit Topic RCIn

Lösung

8.4.4 Topics setpoint_altitude/thrust läuft nicht

Lösung

9 Software-Architektur

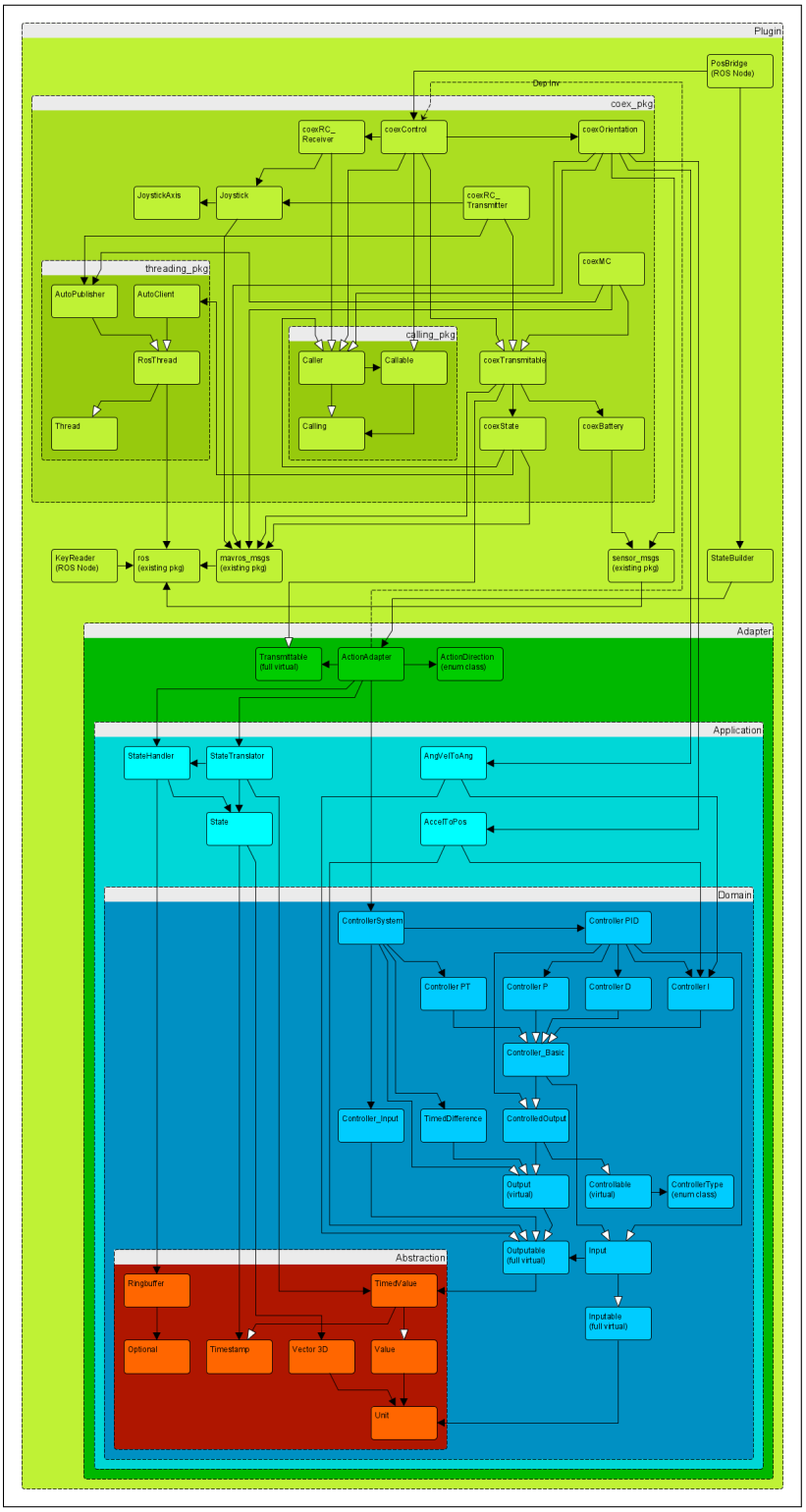

Abbildung 1: Architektur des Positionsregelungssystems

Abbildung 1 zeigt die Architektur der Implementierung. Hierbei wurde die *Clean Archirecture* zu Grunde gelegt.

9.1 Abstraction Layer

Der *Abstraction Layer* stellt als Teil der *Clean Archirecture* die Ebene dar, in der allgemein gültige Typen oder Definitionen abgelegt werden können. Nachfolgend werden die Klassen beschrieben, die in diesem Projekt zu dem *Abstraction Layer* gehören. Sofern nicht anders betitelt, handelt es sich bei den Klassen um Klassen vom Typ *Value-Object*.

Optional

Die Klasse `Optional` soll dem Ringbuffer ermöglichen, das Nichtvorhandensein von Einträgen darstellen zu können. Diese Klasse ist als *template* implementiert und enthält neben dem Speicherplatz für die generische Instanz einen bool'schen Wert als Validierung. Hiermit wird das Arbeit mit *Null-pointern* im Kontext desr Klasse `Ringbuffer` vermieden.

Ringbuffer

Die Klasse `Ringbuffer` soll einen Ringspeicher abbilden. Hier wird nicht -wie ner Name vermuten lässt- ein Ringspeicher im SInne einer ringförmig verketteten Liste implementiert. Diese Klasse Kapselt eine *Standard Template Library* (*STL*) vom Typ `std::vector<T>`, wobei bei Überschreiten der maximalen Anzahl an Elementen das vordere Elemente entfernt wird.

Anmerkung: Die Implementierung der Klasse `std::vector<T>` sieht vor, neue Elemente an das Ende anzuhängen. Bei der Klasse `Ringbuffer` handelt es sich nicht im ein *Value-Object*, da BESCHREIBUNG! *bitte begründen ;)*.

TimedValue

Die Klasse `TimedValue` soll einen mit einem Zeitstemlep versehenen Wert abbilden. Dies wird durch das Erben von den Klassen *Timestamp* und `Value` umgesetzt.

Timestamp

Mit der Klasse `Timestamp` wird ein Zeitstempel eingeführt. Alle *ROS*-Nachrichten beinhalten durch die Kapselung der `std_msgs::Header`-Klasse einen Zeitstempel.

Unit

Mit `Unit` werden Einheiten umgesetzt, um eine korrekte Übergabe von `Value`-Instanzen zur Laufzeit zu gewährleisten.

Value

Die Klasse `Value` bildet einen Wert ab. Sie besteht aus einer `Unit` und einem dazugehöigen Zahlenwert.

Vector3D

Bei der Klasse `Vector3D` handelt es sich um die Abbildung eines Vektors im dreidimensionalen Raum. Zusätzlich wird dem Vektor eine Einheit zugewiesen. Zudem werden in dieser Klasse grundlegende mathematische Operationen für Vektoren implementiert.

9.2 Domain Layer

Controllable

ControlledOutput

Controller_Basic

Controller_D

Controller_I

Controller_Input

Controller_P

Controller_PID

Controller_PT

ControllerSystem

ControllerType

Input

Inputable

Output

Outputable

TimedDifference

9.3 Application Layer

AccelToPos

State

StateHandler

StateTranslator

9.4 Adapter Layer

ActionAdapter

ActionDirection

Transmitable

9.5 Plugin Layer

9.5.1 Plugin Layer - *calling* Package

Calling

Callable

Caller

9.5.2 Plugin Layer - *threading* Package

Das Paket *threading* bietet die Möglichkeit wiederkehrende Aufgaben, abseits von separaten *ROS-Nodes*, beabeiten zu können. Dieser Zusatz erlaubt ein monolithisches Programm zu entwerfen.

Thread

Diese Klasse bietet die Basis für die Thread-Implementierung, indem die Klasse `std::thread` gekapselt wird. Hier wird mit Aufruf der `start()`-Methode eine neue Instanz auf den zugehörigen *Pointer* initialisiert. Zusätzlich implementiert die Klasse `Thread` einen Sperr-Mechanismus, um synchrones Schreiben zu vermeiden. BESCHREIBUNG! *dirty read und so beschreiben?*

rosThread

Die Klasse `rosThread` erweitert die Klasse `Thread` um eine generische Variable `T Payload`, welcher von den erbenden Klassen zum Versand genutzt werden kann. Die Methode `T runOnce(T Payload)` ist als *full virtual* implementiert, somit wird ein Überschreiben durch erbende Klassen erzwungen. Die Klasse `ros::Rate` ermöglicht eine frequentiell pausierte Abarbeitung des der auszuführenden Methode `T runOnce()`.

Anmerkung: Idealerweise sollte eine Instanz der Klasse `ROS::NodeHandler` ebenfalls in dieser Klasse integriert sein. Tests während der Entwicklung zeigten, dass dies nicht umsetzbar ist. Eine Begründung hierfür konnte nicht gefunden werden.

AutoPublisher

Wie der Name der Klasse `AutoPublisher` erahnen lässt, wird hier ein `ros::Publisher` implementiert. Mit dem Aufruf der `runOnce()`-Methode wird wird der in Basisklasse `rosThread` gespeicherte `T Payload` mit der Instanz des `ros::Publisher` versandt.

AutoClient

Die Klasse `AutoClient` kapselt eine Instanz der Klasse `ros::ServiceClient` und bietet somit die Option, Service-Anfragen regelmäßig senden zu können. Für dieses Projekt ist dies notwendig, da die Anfrage für den *FlightMode* „`OFFBOARD`“mit einer Frequenz von mindestend $2Hz$ als *Alive*-Nachricht genutzt wird. Wird die Zeit von $500ms$ ohne Anfrage überschritten, fällt der *Flight Controller* auf den zuvor verwendeten *FlightMode* zurück.

9.5.3 Plugin Layer - *coex* Package

coexBattery

coexControl

coexMC

coexOrientation

coexRC

coexRC_Receiver

coexRC_Transmitter

coexState

coexTransmitable

Joystick

JoystickAxis

10 Implementierung

11 Genutzte ROS-Topics

12 Fazit und Ausblick

Literaturverzeichnis

[1] Pozo D., Romero L., Rosales J., Quadcopter stabilization by using PID controllers, veröffentlicht 2014

[2] Fresk E., Nikolakopoulos G., Full Quaternion Based Attitude Control for a Quadrotor,
veröffentlicht 19.07.2013

[3] Mey R., Reinhard Mey Textsammlung 14.Auflage,
online, https://www.reinhard-mey.de/texte-fuer-alle/
veröffentlicht 13.12.2017, abgefragt 08.02.2022

[4] ellwangen2010, Ballon steuern?,
online, https://www.ballonfahrten.com/ballon-steuern/
veröffentlicht 20.02.2010, abgefragt 07.11.2021

[5] ROS - Robot Operating System,
online, https://www.ros.org
veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 28.11.2021

[6] Saks D., Better even at the lowest levels,
online, https://www.embedded.com/better-even-at-the-lowest-levels/
veröffentlicht 01.11.2008, verändert 05.12.2020, abgefragt 28.07.2021

[7] Application Note Object-Oriented Programming in C,
online, https://www.state-machine.com/doc/AN_OOP_in_C.pdf
veröffentlicht 06.11.2020, abgefragt 28.07.2021

[8] Kirk N., How do strings allocate memory in c++?,
online, https://stackoverflow.com/questions/18312658/how-do-strings-allocate-memory-in-c
veröffentlicht 19.08.2013, abgefragt 17.08.2021

[9] Bansal A., Containers in C++ STL (Standard Template Library),
online, https://www.geeksforgeeks.org/containers-cpp-stl/
veröffentlicht 05.03.2018, verändert 12.07.2020, abgefragt 17.08.2021

[10] Automatic Storage Duration,
online, https://www.oreilly.com/library/view/c-primer-plus/9780132781145/ch09lev2sec2.html
veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 17.08.2021

[11] Noar J., Orda A., Petruschka Y., Dynamic storage allocation with known durati-

ons,
online, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166218X99001754
veröffentlicht 30.03.2000, abgefragt 17.08.2021

Anmerkung: Wird hier ein Veröffentlichungsdatum als “-unbekannt-“ markiert, so konnte diese Angabe weder auf der entsprechenden Webseite, noch in deren Quelltext ausfindig gemacht werden.

Anhang