
definition

Inbetriebnahme des OpenMANIPULATOR-X und Handlungsplanung mit Partial Order Planning Forward

Fabian Claus

20130004



Bachelorarbeit

Fachbereich Informatik
und Medien
Technische Hochschule Brandenburg

Betreuer: Prof. Dr. Jochen Heinsohn
2. Betreuer: Dipl. Inform. Ingo Boersch

Brandenburg, den 13.01.2022
Bearbeitungszeit: 16.12.2021 - 10.02.2022

Brandenburg, den 13.01.2022

Ich, FABIAN CLAUS, Student im Studiengang Informatik der Technischen Hochschule Brandenburg, versichere an Eides statt, dass die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig verfasst und nicht mit anderen als den angegebenen Hilfsmitteln erstellt wurde.

Sie wurde in dieser oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungskommission vorgelegt.

FABIAN CLAUS

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 OpenMANIPULATOR-X	2
2.2 ROS2	2
2.2.1 Interfaces	3
2.2.2 Node-Kommunikation	5
2.3 Planung	6
2.3.1 Stanford Research Institute Problem Solver	7
2.3.2 Planning Domain Definition Language	8
2.3.3 PDDL-Plugin für VS Code	10
2.3.4 Partial Order Planning	11
2.3.5 Forward Chaining Partial Order Planning	13
2.3.6 Partial Order Planning Forward	14
2.3.7 Behavior Tree	16
2.4 Planung in ROS2	18
3 Implementierung	21
3.1 Konzept	21
3.1.1 Inbetriebnahme	21
3.1.2 Struktur der Nodes	21
3.1.3 Planungsmodell	22
3.1.4 Erstellung von Übungsbeispielen	22
3.2 Inbetriebnahme Greifarm	22
3.2.1 Zusammenbau	22
3.2.2 Virtuelle Maschine	22
3.3 Steuerung OpenMANIPULATOR-X	23
3.3.1 Anschluss über U2D2	23
3.3.2 OpenMANIPULATOR-X-Controller	23
3.3.3 Joint- und Task-Space	25
3.3.4 Topics	25
3.3.5 Kinematik	25
3.3.6 Teleop	26
3.4 PlanSys2	27
3.4.1 PDDL-Domäne	27

3.4.2	Action Nodes	29
3.4.3	Control Gripper Aktion	29
3.4.4	Move Gripper Aktion	29
3.4.5	Package	31
3.5	Praktische Anwendung	31
3.5.1	PlanSys2 Terminal	31
3.5.2	Sussman Anomalie	32
3.5.3	Mehr Blöcke, mehr Positionen	32
3.5.4	Abstürze und Fehlersuche	34
4	Ergebnis	36
4.1	Zusammenfassung	36
4.2	Ausblick	36
4.2.1	MoveIt	36
4.2.2	Vorschläge für Übungen in der Lehre	36
Literaturverzeichnis		39
A	Quellcode	40
A.1	Planungsdomäne	40
A.2	Move Gripper Action Node	43
A.3	Control Gripper Action Node	49

Abbildungsverzeichnis

1	OpenMANIPULATOR-X	3
2	Schematische Darstellung des OpenMANIPULATOR-X mit Maßen	3
3	Nachrichtenfluss eines Topic	6
4	Nachrichtenfluss eines Service	6
5	Nachrichtenfluss einer Action	6
6	Konsolenausgabe nach Ausführung des Planers über das PDDL-Plugin . .	11
7	Visualisierung eines Plans durch das PDDL-Plugin	12
8	Relaxed Planning Graph für das Ziel { <i>at(Home), has(Product)</i> }	15
9	BT zur Ausführung einer spezifischen Aktion	19
10	Bausatz für den OpenMANIPULATOR-X	23
11	U2D2 Power Hub Board mit montiertem U2D2 (rechts im Bild)	24
12	Geräte-Menü der VM mit angeschlossenem U2D2	24
13	Fernsteuerung des OpenMANIPULATOR-X über die Tastatur	26
14	Init (links) und Home (rechts) Pose der Tastatur Teleop	27
15	Parallel ausgeführte MOVE-GRIPPER Aktionen bei fehlerhafter Domäne .	28
16	Übersicht der Sussman Anomalie	32
17	Visualisierte Lösung der Sussman Anomalie durch POPF	32
18	Durch POPF generierter Plan für die Sussman Anomalie	33
19	PlanSys2 Terminal mit Abfrage der Typen des geladenen Models	35
20	Ausgabe eines Plans in ROS2 Planning System (PlanSys2) Terminal	35

Tabellenverzeichnis

1	Integrierte Datentypen für Interfaces und deren C++ Equivalent	4
2	Array Typen und deren C++ Equivalent	5
3	Übersicht der BT Knoten	18

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

BT Behavior Tree

EHC Enforced Hill-Climbing

IDL Interface Definition Language

PlanSys2 ROS2 Planning System

PDDL Planning Domain Definition Language

POP Partial Order Planning

POPF Partial Order Planning Forward

RCL ROS Client Library

ROS2 Robot Operating System 2

RPG Relaxed Planning Graph

STRIPS Stanford Research Institute Problem Solver

VM Virtuelle Maschine

1 Einleitung

Roboter sind ein wichtiger Bestandteil der Forschung und der Lehre. Auch im Fachbereich Informatik und Medien der Technischen Hochschule Brandenburg (THB) sind Roboter Teil und Kern mehrerer Module. Aktuell werden das an der THB entwickelte AKSEN-Board¹ in Kombination mit LEGO sowie Pioneer 2/3 Roboter² genutzt. Zukünftig sollen auch der ROS2 basierte Roboter TurtleBot3 Waffle Pi³ mit dem Greifarm OpenMANIPULATOR-X genutzt werden.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll der Greifarm OpenMANIPULATOR-X der Firma ROBOTIS in Betrieb genommen werden. Es soll ein Überblick über die grundsätzlichen Vorgänge und Prozesse, bei dessen Nutzung gegeben sowie die Möglichkeiten der Steuerung erprobt werden. Weiterhin soll die Steuerung mittels Handlungsplanung ermöglicht werden. Hierzu ist der Stand der Forschung auf dem Gebiet der automatischen Handlungsplanung darzustellen. Ein gewähltes Planungsverfahren ist zu implementieren und an einem praktischen Beispiel zu demonstrieren. Für den gewählten Planer wurden verschiedene Szenarien getestet, die die Möglichkeiten und Grenzen zeigen. Es soll ein ROS2-Package erstellt werden, mithilfe dessen der Einstieg in die Nutzung des OpenMANIPULATOR-X vereinfacht werden soll. Abschließend sollen Möglichkeiten der Einbindung in den Lehrbetrieb gezeigt werden.

¹<http://ots.th-brandenburg.de/aksen-controller-fur-reaktive-roboter.html>

²<http://ots.th-brandenburg.de/pioneer2-und-pioneer3roboter.html>

³<https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/overview/>

2 Grundlagen

In Abschnitt 2.1 wird zunächst der Greifarm OpenMANIPULATOR-X vorgestellt. Dies umfasst den grundsätzlichen Aufbau und Eigenschaften, die die Bearbeitung der Problemstellung beeinflussen. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 eine Übersicht über die wichtigsten Komponenten des Betriebssystems gegeben, mit dem dieser Greifarm läuft. Weiterhin werden in Abschnitt 2.3 die theoretischen Grundlagen der Planung dargestellt, die zur Steuerung des Greifarms genutzt werden sollen. Abschließend wird in Abschnitt 2.4 das System erklärt, das Planung und Roboter kombiniert.

2.1 OpenMANIPULATOR-X

Der OpenMANIPULATOR-X (s. Abbildungen 1 und 2) ist ein von der Firma ROBOTIS⁴ nach den Prinzipien "OpenSoftware" und "OpenHardware" hergestellter Greifarm [15]. "OpenSoftware" steht hierbei dafür, dass es ein OpenSource-Projekt ist und auf dem OpenSource-Projekt Robot Operating System 2 (ROS2) basiert. "OpenHardware" steht dafür, dass die meisten Komponenten als STL-Dateien⁵ zur Verfügung stehen und als Ersatzteile oder zum Anpassen des Greifarms mittels eines 3D-Druckers selbst hergestellt werden können.

Der OpenMANIPULATOR-X ist eine 5DOF (5 Degrees of Freedom) Plattform, die mittels 5 Servomotoren⁶ gesteuert wird. Dies ist aufgeteilt in 4DOF für den Arm sowie 1DOF für den Greifer.

Die Bewegung des OpenMANIPULATOR-X erfolgt mit einer Wiederholbarkeit von < 0.2 mm. Der Greifer hat eine Spanne von 20 75 mm. Es kann eine Last bis 500g getragen werden.

2.2 ROS2

Robot Operating System 2 (ROS2) ist eine Sammlung von Bibliotheken und Werkzeugen für Robotik-Applikationen, die alle OpenSource sind. Die erste ROS2-Release-Version erschien im Dezember 2017 unter dem Namen "Ardent Apalon".

Es werden mehrere ROS Client Libraries (RCLs) zur Verfügung gestellt, die den Zugriff auf die ROS2-API ermöglichen. Die RCLs für die Sprachen C++ und Python (rclcpp und rclpy) werden dabei direkt vom ROS2-Team verwaltet. Von der Community wurden weitere RCLs, unter anderem für die Sprachen C#, Swift und Rust, entwickelt.

Um die Entwicklung der RCLs zu vereinfachen und die Logik sprachunabhängig zu machen werden Funktionalitäten als C-Interfaces zugänglich gemacht, für die in den RCLs Wrapper geschrieben werden.

Die grundlegende Komponente einer ROS2 Anwendung ist die Node. Typischerweise besteht eine Anwendung aus mehreren Nodes. Entsprechend dem Prinzip *Separation of*

⁴<http://en.robotis.com>

⁵Dateiformat, das 3D-Objekte beschreibt, häufig im 3D-Druck genutzt

⁶Modellbezeichnung: DYNAMIXEL XM430-W350-T

2 Grundlagen

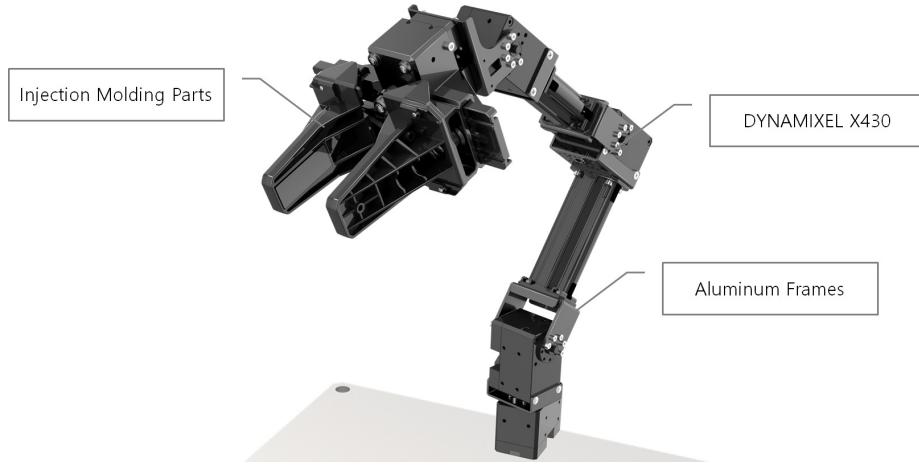


Abbildung 1: OpenMANIPULATOR-X [18]

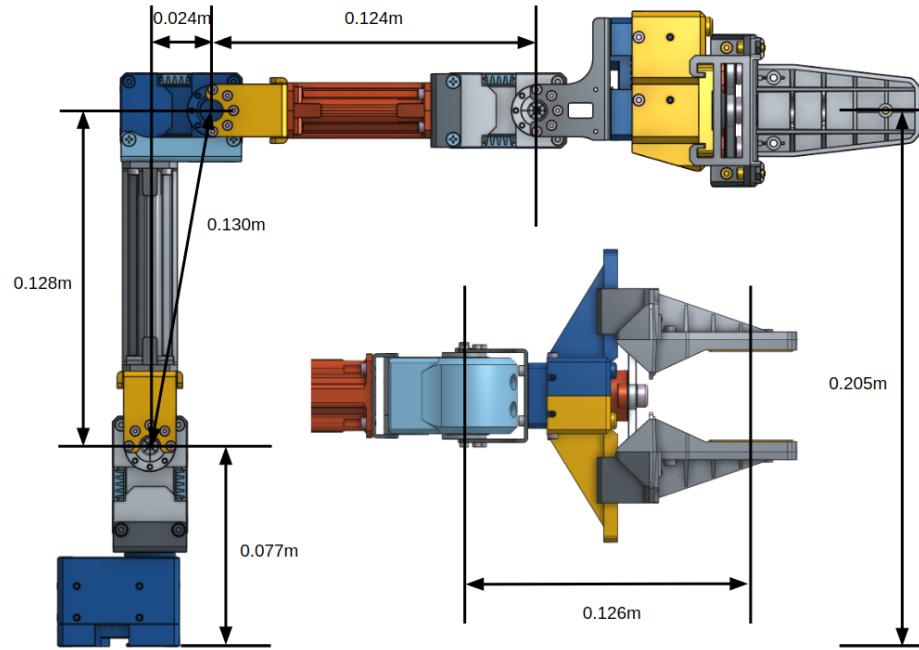


Abbildung 2: Schematische Darstellung des OpenMANIPULATOR-X mit Maßen [17]

Concerns (Trennung der Zuständigkeiten) sollen Nodes so implementiert werden, dass sie jeweils nur eine spezifische Aufgabe haben.

2.2.1 Interfaces

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Arten von Interfaces beschrieben, die für die in Abschnitt 2.2.2 erklärten Methoden zur Kommunikation zwischen mehreren Nodes genutzt werden.

2 Grundlagen

ROS2-Interfaces definieren, welche Daten gesendet werden und welchen Datentyp diese haben. Sie werden in der Interface Definition Language (IDL) geschrieben, die es ermöglicht, automatisch Quellcode in verschiedenen Sprachen für diese zu generieren.

Message Eine Message ist die einfachste Art der ROS2-Interfaces, die gleichzeitig auch ein Baustein für die anderen Interfaces sein wird.

Message-Definitionen haben die Dateiendung `.msg` und werden per Konvention in einem Ordner `msg/` gespeichert. Jede `.msg` Datei besteht aus mindestens einem Feld und optionalen Konstanten.

Jedes Feld besteht aus einem Datentyp und einem durch ein Leerzeichen getrennten Namen: `typ name`, z.B. `bool isDone`. Als Datentyp können dabei die integrierten Datentypen (s. Tabelle 1) oder der Name anderer Messages genutzt werden. Zusätzlich kann jeder integrierte Datentyp als Array definiert werden (s. Tabelle 2).

Feldnamen müssen kleingeschrieben sein. Es können alphanumerische Zeichen sowie der Unterstrich zur Trennung von Wörtern genutzt werden. Das erste Zeichen muss ein Buchstabe sein und der Name darf nicht mit einem Unterstrich enden. Zusätzlich darf es keine aufeinander folgende Unterstriche geben.

Konstanten behalten dieses Format der Felder bei. Der Name der Konstante wird komplett in Großbuchstaben geschrieben. Zusätzlich bekommen Konstanten einen Wert zugewiesen, der nicht innerhalb des Programms geändert werden kann. Die Zuweisung des Wertes erfolgt mit dem `"=` Zeichen: `string EXAMPLE="test"`.

Tabelle 1: Integrierte Datentypen für Interfaces und deren C++ Equivalent

Datentyp	C++
bool	bool
byte	uint8_t
char	char
float32	float
float64	double
int8	int8_t
uint8	uint8_t
int16	int16_t
uint16	uint16_t
int32	int32_t
uint32	uint32_t
int64	int64_t
uint64	uint64_t
string	std::string
wstring	std::u16string

Service Service-Definitionen beschreiben eine Anfrage und eine Antwort. Die Definition

2 Grundlagen

Tabelle 2: Array Typen und deren C++ Equivalent

Datentyp	C++
static array	std::array<T, N>
unbounded dynamic array	std::vector
bounded dynamic array	custom_class<T, N>
bounded string	std::string

hat die Dateiendung .srv und wird im Ordner srv/ gespeichert. Anfrage und Antwort werden innerhalb der Datei durch " --- " getrennt. Für beide Teile gilt, dass sie gültig sind, wenn sie einer gültigen Message-Definition entsprechen. Ein Beispiel einer einfachen Service-Definition ist in Listing 1 gegeben.

```
int32 request_int_name
string request_string_name
---
float32 response_float_name
```

Listing 1: Beispiel einer Service-Definition

Action Action-Definitionen bestehen aus den drei Teilen Anfrage, Antwort und Feedback, in dieser Reihenfolge. Wie auch für Service-Definitionen gilt, dass die Teile durch " --- " getrennt sind und jeder einzelne Teil gültig ist, wenn er einer gültigen Message-Definition entspricht.

2.2.2 Node-Kommunikation

Damit verschiedene Nodes untereinander kommunizieren können, gibt es verschiedene Methoden, die sich darin unterscheiden, in welche Richtungen Nachrichten gesendet werden und ob es eine direkte Reaktion gibt. Für alle Methoden gilt, dass sie von einer Node unter einem bestimmten Namen sowie einem Typ zur Verfügung gestellt werden und von anderen Nodes durch eben diese genutzt werden können.

Topic Topics entsprechen in etwa einem Newsletter System: eine Node veröffentlicht Daten (Publisher), die von allen anderen Nodes (Subscriber) empfangen werden, die sich für diese registriert haben (s. Abbildung 3). Das Format der Daten entspricht einer gewählten Message-Definition.

Service und Client Services werden für Prozesse genutzt, in denen eine Anfrage gesendet und eine Antwort erwartet wird. Ein Client sendet die Anfrage an den Service, der eine Antwort zurückgibt (s. Abbildung 4). Als Typ wird eine Servicedefinition genutzt.

Action-Server und Client Actions sind für länger andauernde Prozesse gedacht. Eine Node erstellt einen Action-Server über den eine Action zur Verfügung gestellt wird.

2 Grundlagen

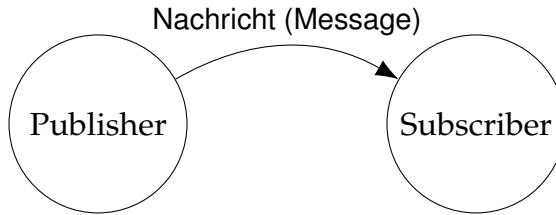


Abbildung 3: Nachrichtenfluss eines Topic

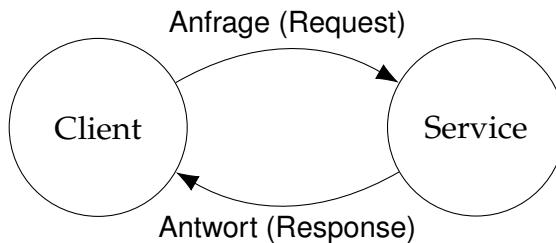


Abbildung 4: Nachrichtenfluss eines Service

Andere Nodes können über einen Action-Client eine Anfrage senden. Der Server bearbeitet die Anfrage und sendet bei Beendigung eine Antwort mit einem Ergebnis an den Client. Während der Dauer der Action kann der Server den Client optional mit Feedback-Nachrichten über den aktuellen Status informieren. Dieser Nachrichtenfluss wird in Abbildung 5 gezeigt.

Als Typ wird eine Action-Definition genutzt.

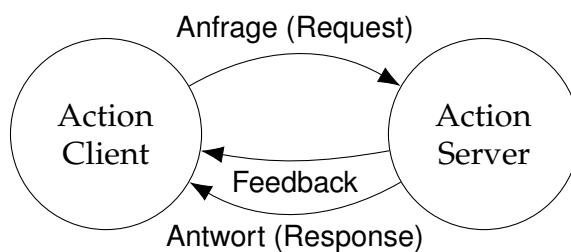


Abbildung 5: Nachrichtenfluss einer Action

2.3 Planung

Planung (auch Handlungsplanung) ist ein Bereich der Künstlichen Intelligenz, der sich mit der Lösung von Planungs- und Schedulingproblemen befasst [20].

2 Grundlagen

2.3.1 Stanford Research Institute Problem Solver

Der *Stanford Research Institute Problem Solver (STRIPS)* ist ein automatischer Planer, der von Richard Fikes und Nils Nilsson 1971 entwickelt wurde [8]. Mit dem gleichen Namen wird auch die Sprache bezeichnet, die als Eingabe für diesen Planer genutzt wird. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Sprache eingegangen, die die Grundlage vieler weiterer Sprachen zur Darstellung von Planungsdomänen und -problemen ist. Anschließend wird der von STRIPS genutzte Algorithmus beschrieben.

Ein STRIPS-Modell besteht aus 3 Teilen:

- Startzustand
- Ziele
- Aktionen

Aktionen bestehen wiederum aus:

- Vorbedingungen
- Effekten

Ein STRIPS-Modell kann mathematisch als 4-Tupel (F, O, I, G) beschrieben werden [2]:

1. F : eine endliche Menge von Fakten
2. O : eine endliche Menge von Aktionen (auch Operatoren) mit der Form $Pre \Rightarrow Post$
3. I : der Startzustand, $I \subseteq F$
4. G : eine endliche Menge von Zielen

Es gilt die *Closed World Assumption (CWA)*: alles was nicht explizit als wahr beschrieben ist, gilt als falsch.

F ist die Menge aller Fakten, die relevant sind. Jeder Zustand ist eine Teilmenge $S \subseteq F$. O ist die Menge der Aktionen die einen Zustand in einen anderen ändern können. Aktionen sind 4-Tupel (o^+, o^-, o_+, o_-) , bei dem jedes Element eine Menge von Fakten ist. Die ersten zwei Mengen beschreiben die Vorbedingungen (Pre). Das sind Fakten, die wahr sein müssen (o^+) sowie Fakten, die falsch sein müssen (o^-).

Definition 1 Eine Aktion A ist auf einen Zustand $\subseteq F$ anwendbar, wenn alle Fakten in o^+ in S gelten und keiner der Fakten in o^- in S gilt:

$$o^+(A) \subseteq S, \quad o^-(A) \cap S = \emptyset$$

Die letzten beiden Mengen beschreiben den Effekt, den die Aktion nach ihrer Ausführung auf einen Zustand hat ($Post$), also Fakten, die wahr werden (o_+) und Fakten, die falsch werden (o_-).

I beschreibt, welche Fakten anfangs wahr oder falsch sind. Eine Fakt $f \in F$ ist anfangs wahr, wenn $f \in I$ und sonst falsch.

G ist die Menge der Fakten, die erreicht werden soll, bestehend aus den Zielen, die wahr sein sollen (G_+) und denen, die falsch sein sollen (G_-).

2 Grundlagen

Definition 2 Ein Zustand $S \subseteq F$ ist ein Zielzustand, wenn:

$$G_+ \subseteq S, \quad G_- \cap S = \emptyset$$

Definition 3 Ein Plan besteht aus einer Menge von Aktionen, die vom Startzustand zu einem Zielzustand führen.

Dieser Plan ist ein *Total-Order*-Plan: alle Aktionen haben eine feste Reihenfolge innerhalb des Plans. Um einen Plan zu finden, wird ein Suchbaum erstellt. Die Suche findet im Zustandsraum statt. Jeder Knoten ist ein Zustand. Jede Kante ist die Aktion, um den Zustand bzw. Knoten, von der die Kante ausgeht, zu dem Zustand zu überführen, zu dem die Kante führt.

STRIPS beginnt damit, das Ziel G_0 für den Startzustand I_0 zu beweisen. Gelingt dies, ist das Ziel bereits erreicht und kein Plan notwendig. Ist das Ziel nicht beweisbar, wird der Unterschied zwischen I_0 und G_0 ermittelt und von diesem aus weiter gesucht. Es wird eine Aktion gesucht, die diesen Unterschied weiter verringern kann. Vorbedingungen dieser Aktion werden als Unterziel genutzt. Kann ein (Unter-)Ziel für den Zustand I_0 bewiesen werden, werden die Effekte der Aktion auf I_0 angewandt und es entsteht ein Zustand I_1 . Dieses Verfahren wiederholt sich bis ein Zustand entsteht, in dem das Ziel G_0 bewiesen werden kann.

2.3.2 Planning Domain Definition Language

Die *Planning Domain Definition Language (PDDL)* ist eine Sprache zur Modellierung von Planungsaufgaben. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht auf alle Aspekte von PDDL eingegangen. Der Fokus liegt auf einigen grundlegenden Teilen sowie auf den genutzten Erweiterungen.

Die Beschreibung des Problems setzt sich aus folgenden grundlegenden Komponenten zusammen:

- Objekt
- Prädikat
- Startzustand
- Aktion
- Ziel

Objekte sind Dinge in der Welt, die für die Planung relevant sind. Dies können bspw. Orte oder Personen sein und werden in PDDL entsprechend Listing 2 beschrieben.

```
(:objects kitchen supermarket  
fabian)
```

Listing 2: Objektbeschreibung in PDDL

Prädikate sind Eigenschaften, die Objekte haben können. Eine Person kann sich an einem Ort befinden oder eine bestimmte Größe haben (s. Listing 3).

2 Grundlagen

```
(:predicates (person_at ?person ?location)
             (tall ?person))
```

Listing 3: Prädikatbeschreibung in PDDL

Der Startzustand ist die Beschreibung der Welt zu Beginn der Planungsaufgabe. Er besteht aus einer Menge von Instanzen von Prädikaten, also Prädikate, die an Objekte gebunden sind (s. Listing 4).

```
(:init (person_at fabian kitchen))
```

Listing 4: Startzustand in PDDL

Aktionen sind die vorhandenen Möglichkeiten, den Zustand der Welt zu verändern. Diese entsprechen den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Aktionen mit einer Menge von Vorbedingungen und einer Menge von Effekten (s. Listing 5).

```
(:action move
  :parameters (?p ?loc_from ?loc_to)
  :precondition (and (person_at ?p ?loc_from))
  :effect (and (person_at ?p ?loc_to)
                (not (person_at ?p ?loc_from))))
```

Listing 5: Aktion, um eine Person von einem Ort zum anderen zu bewegen in PDDL

Ein Ziel ist eine Menge von Instanzen, die am Ende der Planung Teil des Zustands der Welt sein soll (s. Listing 6).

```
(:goal (and (person_at fabian supermarket)))
```

Listing 6: Ziel in PDDL

Diese Komponenten werden aufgeteilt:

- Domäne
- Problem

Die Domäne enthält die allgemeinen Rahmenbedingungen für das Problem: Prädikate und Aktionen. Die Datei beginnt mit (`define (domain name_der_domäne)`).

Das Problem enthält die Informationen zu einem spezifischen Problem: Objekte, den Startzustand und das Ziel. Die Datei beginnt mit

```
(define (problem name_des_problems) (:domain name_der_domäne)).
```

Um sicherzustellen, dass nur bestimmte Objekte für bestimmte Parameter in Frage kommen (es kann mit der *move*-Aktion nur eine Person bewegt werden und der Start und das Ziel sind Orte) wurden ursprünglich weitere Prädikate genutzt, um Objekte zu typisieren. Für das aktuelle Beispiel wären das die Prädikate *location(x)* und *person(x)*. Die Aktion *move* wird dann um entsprechende Vorbedingungen erweitert (s. Listing 7).

```
(:action move
```

2 Grundlagen

```
5 :parameters (?p ?loc_from ?loc_to)
:precondition (and (person ?p)
    (location ?loc_from)
    (location ?loc_to)
    (person_at ?p ?loc_from))
:effect (and (person_at ?p ?loc_to)
    (not (person_at ?p ?loc_from))))
```

Listing 7: Move Aktion mit Prädikaten zur Typisierung

Um dies zu vereinfachen, wurde mit PDDL 2.1 unter anderem direkte Typisierung eingeführt. In der Domäne werden die möglichen Typen deklariert, Objekte werden mit einem Typ initialisiert und Aktionen können Parameter auf einen Typ beschränken (s. Listing 8)

```
(:types person
    location)
(:objects kitchen supermarket - location
    fabian - person)
5 (:action move
    :parameters (?p - person ?loc_from - location ?loc_to - location)
    :precondition (and (person_at ?p ?loc_from)))
    :effect (and (person_at ?p ?loc_to)
        (not (person_at ?p ?loc_from))))
```

Listing 8: Typ Unterstützung in PDDL 2.1

Eine weitere Neuerung in PDDL2.1 ist die *durative action* zur Modellierung von Aktionen mit einer Dauer für das temporale Planen.

Es wird jeder Aktion eine Dauer zugeordnet (:duration (= ?duration 0.25)), die auch für Metriken genutzt werden kann. Zusätzlich bekommen Bedingungen und Effekte einen temporalen Zusatz: at start und at end können sowohl für Bedingungen als auch Effekte benutzt werden, um festzulegen zu welchem Zeitpunkt der Aktion diese Bedingung zutrifft oder der Effekt eintritt. Für Bedingungen gibt es außerdem over all, damit eine Bedingung über die komplette Dauer der Aktion zutreffen muss, damit sie gültig ist.

Da Bedingungen dadurch nicht mehr strikt vor Ausführung der Aktion gelten müssen, wird das Schlüsselwort :precondition zu :condition geändert.

2.3.3 PDDL-Plugin für VS Code

Im Marketplace von Visual Studio Code ist ein PDDL-Plugin von Jan Dolejsi verfügbar. Dieses vereinfacht die Entwicklung und das Testen von Domänen und Problemen, die in dem in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen PDDL-Format vorliegen. Es beinhaltet Syntax-Highlighting und Snippets, sowie die Möglichkeit direkt Pläne zu suchen und zu visualisieren. Um Pläne mit Partial Order Planning Forward (POPF) zu suchen, muss der Planer in der Overview-Page des Plugins hinzugefügt werden. Der Pfad zum POPF-Planer ist: /opt/ros/foxy/lib/popf/popf.

2 Grundlagen

Über das Kontext-Menü einer Domänen- oder Problemdatei lässt sich der Planer starten und es erfolgt eine Ausgabe in der Konsole (s. Abbildung 6) sowie eine Visualisierung wenn ein Plan gefunden wurde (s. Abbildung 7). Der zeitliche Ablauf wird in der Abbildung von links nach rechts dargestellt. Alle Aktionen werden farblich markiert, wobei eine Aktion auch bei mehrfacher Ausführung die gleiche Farbe erhält. In 7a wird eine einfache Übersicht des Plans gezeigt: welche Aktionen wurden wann ausgeführt und mit welchen Parametern. In 7b wird dargestellt, welche Objekte zu welchem Zeitpunkt als Teil welcher Aktion genutzt wurden.

```
/opt/ros/foxy/lib/popf/popf /tmp/domain-2153-51GdAg05j4bm-.pddl /tmp/problem-2153-BsnbQP9gMIfm-.pddl
Constructing lookup tables: [10%] [20%] [30%] [40%] [50%] [60%] [70%] [80%] [90%] [100%]
Post filtering unreachable actions: [10%] [20%] [30%] [40%] [50%] [60%] [70%] [80%] [90%] [100%]
13% of the ground temporal actions in this problem are compression-safe
b (8.000 | 1.000)b (7.000 | 2.251)b (6.000 | 3.501)
Resorting to best-first search
b (8.000 | 1.000)b (7.000 | 1.251)b (6.000 | 2.501)b (5.000 | 3.501)b (4.000 | 3.751)b (3.000 | 3.751)b (2.000 | 4.751)b (1.000 | 5.001)g;;;;
; Time 0.12
0.000: (move-gripper gripper s1l3 s1l2) [1.000]
1.001: (unstack gripper yellow blue s1l2 s1l1) [0.250]
1.251: (move-gripper gripper s1l2 s3l1) [1.000]
2.251: (place gripper yellow s3l1 s3) [0.250]
2.501: (move-gripper gripper s3l1 s1l1) [1.000]
3.501: (grab gripper blue s1l1 s1) [0.250]
3.751: (move-gripper gripper s1l1 s2l2) [1.000]
4.751: (stack gripper blue white s2l2 s2l1) [0.250]
Planner found 1 plan(s) in 0.238secs.
```

Abbildung 6: Konsolenausgabe nach Ausführung des Planers über das PDDL-Plugin

2.3.4 Partial Order Planning

Partial Order Planning (POP) ist eine Form des Planens, in dem die Aktionen eines Plans nur soweit geordnet sind, wie es notwendig ist [6]. Dies steht im Gegensatz zu *Total-Order-Planern* wie STRIPS.

Es wird nach dem *Principle Of Least Commitment* verfahren. Das bedeutet, dass Entscheidungen soweit wie möglich aufgeschoben und erst getroffen werden, wenn es absolut nötig ist. Dies umfasst nicht nur die Reihenfolge von Aktionen, sondern auch die Bindung von Variablen.

Ein *Partial-Order-Plan* kann als 4-Tupel [9] beschrieben werden.

- eine Menge von Aktionen
- eine Menge von Einschränkungen der Reihenfolge
- eine Menge von kausalen Zusammenhängen
- eine Menge offener Vorbedingungen (Vorbedingungen einer Aktion, die nicht durch eine andere Aktion erfüllt werden)

Die Menge der Aktionen enthält Instanzen von Aktionen der Domäne. Eine Aktion der Domäne kann daher mehrfach vorkommen.

Definition 4 Eine Einschränkung der Reihenfolge $A < B$ beschreibt, dass Aktion A vor Aktion B ausgeführt werden muss. Zyklische Einschränkungen sind nicht erlaubt.

Definition 5 Ein kausaler Zusammenhang $A \xrightarrow{\alpha} B$ beschreibt, dass die Aktion A die Vorbedingung α der Aktion B erfüllt.

2 Grundlagen

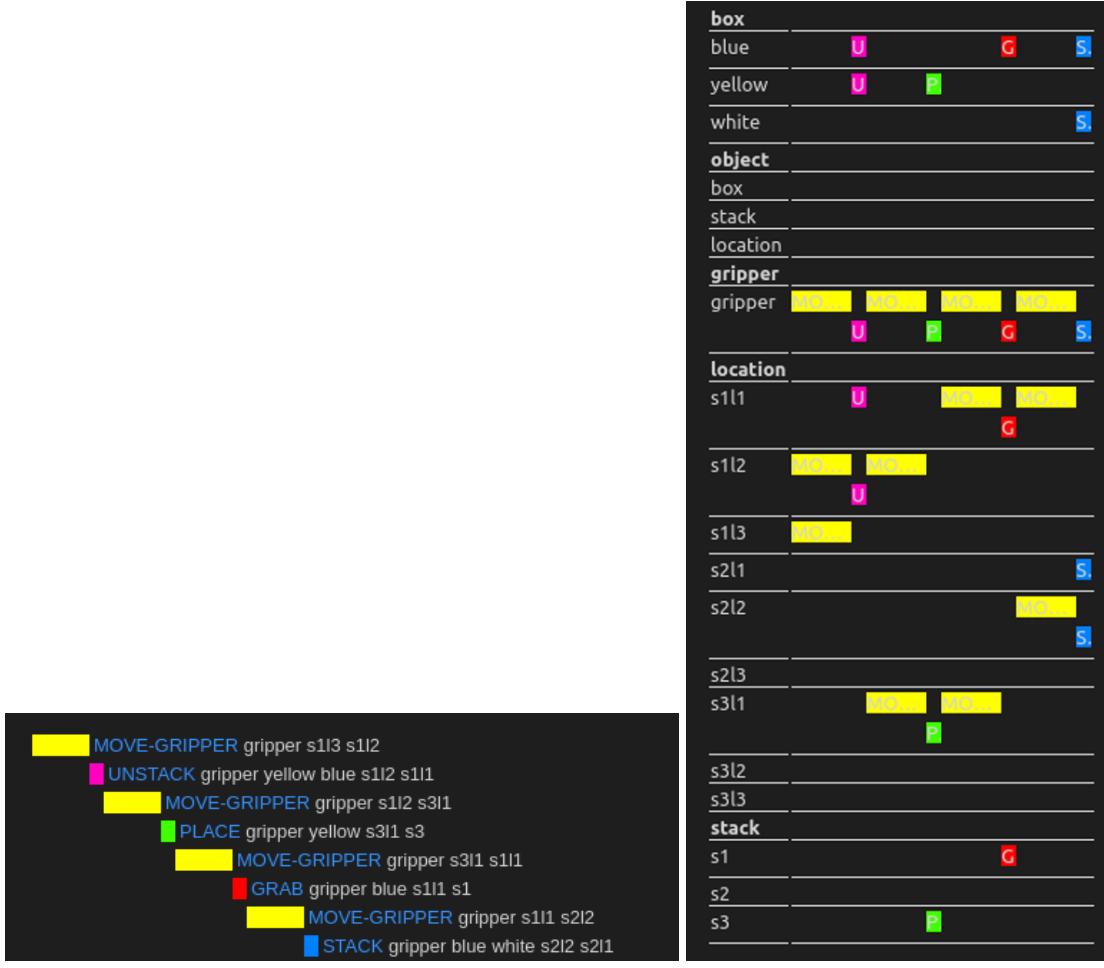


Abbildung 7: Visualisierung eines Plans durch das PDDL-Plugin

Die Suche erfolgt im Plan Space. Jeder Knoten im Graph entspricht einem Teilplan und jede Kante einer Änderung des einen zum anderen Plan. Dies kann durch das Hinzufügen eines weiteren Schrittes oder einer Einschränkung sowie der Bindung einer Variable geschehen. Die Wurzel des Graphen besteht aus einem Plan mit zwei Schritten, die den Startzustand und das Ziel darstellen. Der Startzustand wird durch eine Aktion repräsentiert, die keine Vorbedingungen und alle Fakten als Effekt hat. Das Ziel erhält alle Zielfakten als Vorbedingung und hat keinen Effekt. Zusätzlich enthält der Plan die Einschränkung, dass die Aktion für den Start vor der Aktion für das Ziel ausgeführt werden muss ($Start < Ziel$).

Ein Plan ist eine Lösung, wenn [9]:

- keine Aktion des Plans eine offene Vorbedingung hat
 - und wenn keine Threats existieren

2 Grundlagen

Ist der aktuelle Plan keine Lösung, werden folgende Schritte vorgenommen [9]:

- eine offene Vorbedingung p einer Aktion B wählen
- eine existierende Aktion A , die die Vorbedingung p erfüllt wählen oder eine neue Aktion A erzeugen
- den kausalen Zusammenhang $A \xrightarrow{p} B$ und die Reihenfolge $A < B$ hinzufügen
- wenn A eine neue Aktion ist, die Reihenfolge $Start < A$ hinzufügen
- Probleme zwischen dem neuen kausalen Zusammenhang und den existierenden Aktionen lösen sowie zwischen den existierenden kausalen Zusammenhängen und A , wenn A eine neue Aktion ist.
- entsteht durch das Hinzufügen der Reihenfolgen ein Zyklus, kann der Plan keine Lösung mehr werden

Definition 6 Ein Problem ist eine Beziehung zwischen einer Aktion C und einem kausalen Zusammenhang $A \xrightarrow{\alpha} B$, bei der die Aktion C einen Effekt $\neg\alpha$ hat.

Sollte in einem Problemfall C nach A aber vor B ausgeführt werden, ist die Vorbedingung p für B nicht mehr gegeben. Probleme können durch *Promotion* oder *Demotion* gelöst werden [6]. Bei *Promotion* wird der problematische Schritt C nach dem kausalen Zusammenhang ausgeführt: die Reihenfolge $B < C$ wird hinzugefügt. Bei *Demotion* wird der problematische Schritt C vor dem kausalen Zusammenhang ausgeführt: die Reihenfolge $C < A$ wird hinzugefügt.

2.3.5 Forward Chaining Partial Order Planning

Die Prinzipien des POP sollen nun mit Vorwärtsverkettung kombiniert werden. Für Vorwärtsverkettung mit einem Total-Order Plan können Zustände als Tupel (F, V, Q, P, C) beschrieben werden [4]:

- F : eine Menge von Fakten, die im Zustand gelten
- V : eine Menge, die die Werte numerischer Variablen enthält
- Q : eine Menge von Aktionen, die begonnen haben, aber noch nicht beendet sind
- P : der Plan, um den Zustand zu erreichen
- C : eine Menge aller zeitlichen Einschränkungen der Schritte in P

Um eine Aktion zum Plan hinzuzufügen, müssen deren Start- und Endpunkte hinzugefügt werden. Dies muss nicht in aufeinander folgenden Schritten geschehen. Wird eine Aktion hinzugefügt, werden F und V entsprechend der Effekte angepasst. Die Voraussetzung, um eine Aktion hinzufügen zu können ist, dass Q keine Aktion enthält, zu der die Effekte der neuen Aktion einen Konflikt darstellen würden.

Vorwärtsverkettung im Zustandsraum hat, durch den *Total-Order-Plan*, den Vorteil, dass nicht explizit nach Problemen gesucht werden muss. Neue Aktionen werden immer am Ende hinzugefügt, wodurch sie kein Problem für die Vorbedingungen und Effekte früherer Aktionen darstellen können. Gleichzeitig kann keine folgende Aktion ein

2 Grundlagen

Problem für diese darstellen. Dies kommt mit dem Nachteil der frühen Bindung und einer festgelegten Reihenfolge zwischen Aktionen, zwischen denen kein Zusammenhang besteht.

Es soll ein Kompromiss zwischen den Vor- und Nachteilen von *Total-* und *Partial-Order*-Planung gefunden werden. Dem Tupel werden weitere Elemente hinzugefügt:

- $F^+(F^-)$, wobei $F^+(f)(F^-(f))$ den Index eines Schrittes a angeben, indem der Fakt f als letztes hinzugefügt (oder gelöscht) wurde
- FP , wobei $FP(f)$ eine Menge von Paaren $\langle i, d \rangle \in (\mathbb{N}_0 \times \{0, \epsilon\})$:
 - $\langle i, 0 \rangle \in FP(f)$ beschreibt, dass Schritt i am Ende eines offenen Intervalls liegt, in dem f wahr sein muss.
In PDDL gibt es diese für Aktionen mit der *over all*-Bedingung f , wobei i der Endpunkt dieser Aktion ist.
 - $\langle i, \epsilon \rangle \in FP(f)$ beschreibt, dass Schritt i der Start eines Intervalls ist, indem f wahr sein muss.
Dies entspricht *at start*- oder *at end*-Bedingungen in PDDL, die relevant für den Schritt i sind.

2.3.6 Partial Order Planning Forward

POPF ist ein am King's College London entwickelter Planer, der die in Abschnitt 2.3.4 genannten Methoden implementiert [4]. Als Heuristik wird ein temporaler Relaxed Planning Graph (RPG) genutzt. Ein RPG ist ein Planungsgraph, in dem versucht wird, ein vereinfachtes Problem zu lösen. Die Vereinfachung besteht darin, alle negativen Effekte von Aktionen zu ignorieren.

Der Graph besteht aus einer Sequenz von sich abwechselnden Fakten- und Aktionschichten: $F_0, A_0, \dots, F_{t-1}, A_{t-1}, F_t, A_t$. Die Wurzel des Graphen ist eine Faktenschicht, die den aktuellen Zustand abbildet. Eine Aktionsschicht enthält alle Aktionen, die in der vorhergehenden Faktenschicht anwendbar sind. Eine Faktenschicht enthält alle Fakten, die durch alle Aktionen der vorhergehenden Aktionsschicht hinzugefügt werden. Da nur positive Effekte betrachtet werden, enthält eine Faktenschicht auch alle Fakten der vorherigen Faktenschicht und eine Aktionsschicht ebenfalls alle Aktionen der vorherigen Aktionsschicht.

Ein Beispiel eines RPG ist in Abbildung 8 dargestellt. Im Startzustand gelten die Fakten *at(Home)* und *has(Money)*, dargestellt in F_0 . Die einzige Aktion, deren Vorbedingungen erfüllt ist, ist *move(Home, Shop)* und wird der Aktionsschicht A_0 hinzugefügt. Pfeile, die zu Aktionen gehen, zeigen die Fakten, die als Vorbedingung gelten. Pfeile, die zu Fakten gehen, zeigen die Aktionen, durch deren Effekt sie hinzugefügt wurden. In F_1 wird als Effekt der Aktion *move(Home, Shop)* der Fakt *at(Shop)* hinzugefügt. Da negative Effekte ignoriert werden, gilt *at(Home)* weiterhin. Da in F_1 nun *at(Shop)* und *has(Money)* gelten, kann in A_1 die Aktion *buy(Product, Money)* angewendet werden. Dies resultiert in dem Fakt *has(Product)* in F_2 .

Angenommen, das Ziel ist *has(Product)*, so ist dieses Ziel in F_2 erfüllt. Mit $t = 2$ als

2 Grundlagen

Wert der Heuristik, wird gezeigt, dass mindestens zwei Aktionen nötig sind um vom Startzustand zum Ziel zu gelangen. Da $at(Home)$ vom Startzustand aus durchgängig gilt, erhält jedoch auch das Ziel $\{at(Home), has(Product)\}$ den Heuristikwert 2.

Die Erstellung des Graphen wird gestoppt, wenn eine Faktenschicht alle Ziele erfüllt

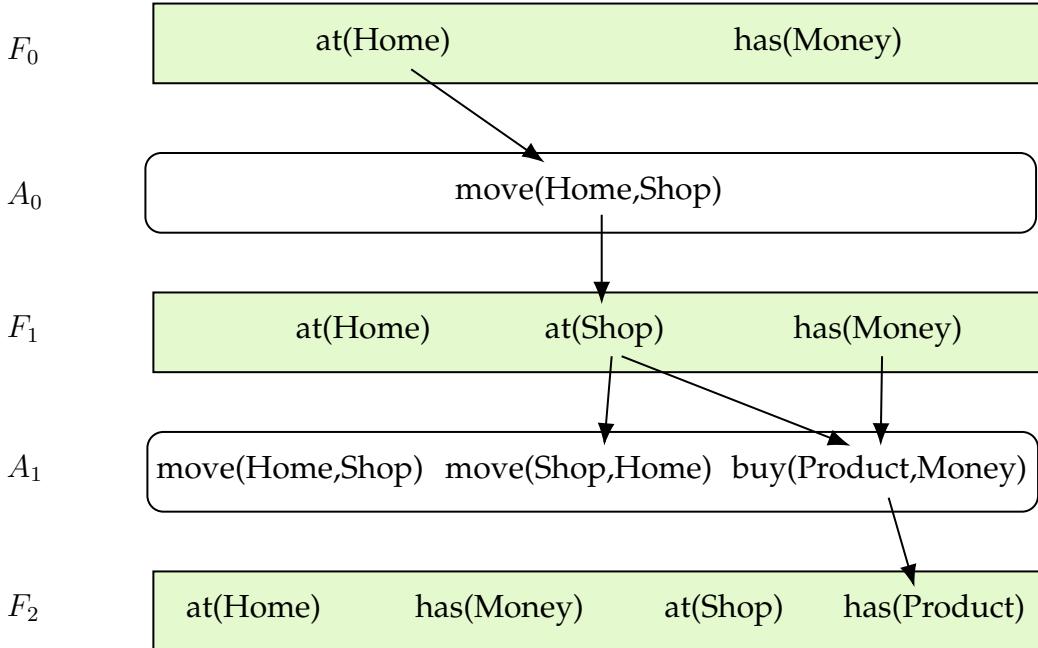


Abbildung 8: Relaxed Planning Graph für das Ziel $\{at(Home), has(Product)\}$

oder wenn eine Faktenschicht der vorherigen entspricht. Werden zwischen zwei Faktenschichten keine neuen Fakten hinzugefügt, können auch in zukünftigen Faktenschichten keine neuen Fakten mehr hinzugefügt werden. Endet ein Graph auf diese Weise, ist das vereinfachte Problem nicht lösbar und der Zustand erhält einen Heuristikwert von *unendlich*. Andernfalls wird ein vereinfachter Plan aus dem Graphen extrahiert. Die Länge des optimalen vereinfachten Plans ist eine zulässige Heuristik. Der optimale Plan lässt sich jedoch nicht effizient extrahieren [10]. Daher wird ein suboptimaler Plan extrahiert, wodurch die Heuristik nicht mehr zulässig ist.

Um einen RPG für temporales Planen zu erweitern, werden Aktionen in Startaktionen A_{\leftarrow} und Endaktionen A_{\rightarrow} aufgeteilt, die jeweils nur *at start-* und *at end-Effekte* enthalten. Der Index t einer Schicht entspricht nun einem Zeitstempel.

Als Suchverfahren wird zunächst *Enforced Hill-Climbing (EHC)* versucht. Der in Listing 9 als Pseudocode beschriebene Algorithmus beginnt im, mit dem Startzustand I initialisierten, Zustand S .

2 Grundlagen

```

den aktuellen Plan als leeren Plan initialisieren < >
S = I
while h(S) != 0 do
    breadth first Suche nach einem Zustand S' mit h(S') < h(S)
    5   if kein solcher Zustand gefunden then
        Fehlschlag zurückgeben, stoppen
        die Aktionen um zu S' zu kommen zum Ende des aktuellen Plans hinzufügen
        S = S'

```

Listing 9: Enforced Hill-Climbing Algorithmus, nach [10]

Von diesem aus wird eine *breadth-first* Suche gestartet. Diese findet den nächstbesten Nachfolger, also den nächsten Zustand S' , dessen Heuristik besser als die des aktuellen Zustands ist. Gelingt dies, wird der Weg von S nach S' zum Plan hinzugefügt. Die Suche wird gestoppt, wenn ein Zustand mit der Heuristik 0 gefunden wird. Ist die Heuristik des aktuellen Zustands ungleich null und wird kein Zustand mit einer besseren Heuristik gefunden, schlägt der Algorithmus fehl. Zustände werden in einer *Queue* gespeichert und für eine Iteration der Suche wird der erste Zustand S' von dieser entfernt und die Heuristik berechnet. Die Suche ist erfolgreich, wenn die Heuristik für diesen Zustand S' besser als die von S ist. Andernfalls werden die Nachfolger von S' zum Ende der *Queue* hinzugefügt. Wiederholte Zustände werden durch ein *HashTable* der bereits besuchten Zustände vermieden. Die Suche schlägt fehl, wenn keine weiteren Zustände erreicht werden können.

Wird in einer Iteration kein besserer Zustand gefunden, stoppt EHC, ohne eine Lösung zu finden. Dies geschieht, da EHC Entscheidungen, eine Aktion in den Plan aufzunehmen, nie rückgängig macht. Der Algorithmus ist daher nur vollständig für Planungsaufgaben, die keine "dead ends" enthalten. Ein *dead end* für eine Planungsaufgabe (O, I, G) ist definiert als ein Zustand S , der erreichbar ist und von diesem aus kein Plan das Ziel erreichen kann:

$$\exists P : S = \text{Result}(I, P), \quad \neg \exists P' : G \subseteq \text{Result}(S, P')$$

Um die Vollständigkeit der Planung zu gewährleisten wird, im Fall eines Fehlschlags von EHC, eine neue *best-first* Suche ausgehend vom Startzustand I gestartet.

2.3.7 Behavior Tree

Behavior Trees (BTs) sind ein modulares System, das in der Videospieleindustrie entwickelt wurde [5]. Sie ermöglichen aus simplen Aktionen komplexe Verhaltensmuster zu modellieren, ohne das Aktionen Kenntnis über andere Aktionen haben müssen [1]. Entsprechend [13] ist ein BT ein gerichteter azyklischer Graph $G(V, E)$ mit $|V|$ Knoten und $|E|$ Kanten. Ein Elternknoten von einem Paar verbundener Knoten ist der, von dem die Kante ausgeht. Der Knoten mit der eingehenden Kante ist ein Kindknoten. Knoten ohne Kinder heißen Blätter. Ein Knoten ohne Eltern heißt Wurzel. In einem BT gibt es genau eine Wurzel mit genau einem Kind.

2 Grundlagen

Nach [5] beginnt die Ausführung eines BT bei der Wurzel, die in einem bestimmten Intervall ein Signal erzeugt, dass die Ausführung eines Knoten erlaubt ("tick"). Dieses Signal wird an das Kind der Wurzel gesendet. Ein Knoten wird ausgeführt, wenn es dieses Signal erhält und auch nur dann. Wird ein Knoten ausgeführt, gibt er einen Status zurück. Der Status ist einer von drei möglichen [11]:

- Running: die Ausführung läuft noch
- Success: die Ausführung war erfolgreich
- Failure: die Ausführung ist fehlgeschlagen

Wie in [13] beschrieben, werden verschiedene Arten von Knoten auf verschiedene Typen beschränkt. Blätter sind Ausführungsknoten und haben einen der folgenden Typen:

- Aktion
- Bedingung

Knoten mit Kindern, mit Ausnahme der Wurzel, sind Kontrollflussknoten und haben einen der folgenden Typen:

- Selektor
- Sequenz
- Parallel
- Dekorator

Ein Selektor-Knoten führt seine Kinder der Reihe nach aus, bis das erste einen Status *Running* oder *Success* zurückgibt. Nachfolgende Kinder werden dann nicht mehr ausgeführt und der Selektor gibt den entsprechenden Status zurück. Wurden alle Kinder ausgeführt und keins hat einen Status *Running* oder *Success* zurückgegeben, gibt der Selektor den Status *Failure* zurück.

Ein Sequenz-Knoten führt seine Kinder der Reihe nach aus, bis das erste einen Status *Running* oder *Failure* zurückgibt. Nachfolgende Kinder werden dann nicht mehr ausgeführt und die Sequenz gibt den entsprechenden Status zurück. Wurden alle Kinder ausgeführt und keins hat einen Status *Running* oder *Failure* zurückgegeben, gibt die Sequenz den Status *Success* zurück.

Ein Parallel-Knoten führt alle Kinder aus, ohne auf den Status des vorherigen zu warten. Überschreitet die Anzahl der Kinder, die *Success* zurückgeben einen benutzerdefinierten Wert *S*, gibt der Knoten *Success* zurück. Haben $N - M + 1$ Kinder *Failure* zurückgegeben, wobei *N* die Anzahl der Kinder ist, wird *Failure* zurückgegeben, da der Wert *S* nicht mehr erreicht werden kann [5]. Alternativ kann ein zweiter benutzerdefinierter Wert *F* eingeführt werden. Überschreitet die Anzahl der Kinder, die *Failure* zurückgeben diesen Wert *F*, wird direkt *Failure* zurückgegeben [13]. *S* und *F* müssen $\leq M$ sein. Wird keiner dieser beiden Werte überschritten, wird *Running* zurückgegeben.

Ein Dekorator-Knoten hat genau ein Kind. Er kann durch eine Bedingung entscheiden, ob das Kind ausgeführt wird und kann einen modifizierten Status zurückgeben. Beispiele für Dekoratoren sind [5]:

- Invertierung/Negation: der *Success* und *Failure* Status des Kinds wird invertiert

2 Grundlagen

Knoten	Symbol	Rückgabewert		
		Success	Failure	Running
Selektor	?	Wenn 1 Kind "Success" zurückgibt	Wenn alle Kinder "Failure" zurückgeben	Wenn 1 Kind "Running" zurückgibt
Sequenz	→	Wenn alle Kinder "Success" zurückgeben	Wenn 1 Kind "Failure" zurückgibt	Wenn 1 Kind "Running" zurückgibt
Parallel	⇒	Wenn $\geq M$ Kinder "Success" zurückgeben	Wenn $> N - M$ Kinder "Failure" zurückgeben	Wenn keine der Bedingungen für "Success" oder "Failure" erfüllt sind
Dekorator	◊	benutzerdefiniert	benutzerdefiniert	benutzerdefiniert
Bedingung	(Text)	Wenn wahr	Wenn falsch	Nie
Aktion	[Text]	Bei vollständiger Ausführung nicht möglich ist	Wenn vollständige Ausführung nicht möglich ist	Während der Ausführung

Tabelle 3: Übersicht der BT Knoten, nach [5]

- Zeitbeschränkung: gibt das Kind den Status *Running* für länger als eine benutzerdefinierter Zeitspanne T zurück, wird *Failure* zurückgegeben und das Kind nicht mehr ausgeführt

2.4 Planung in ROS2

Für die Planung in ROS2 wird PlanSys2 genutzt. In diesem Abschnitt wird das in [12] beschriebene System zusammenfassend beschrieben. Es wird dabei jedoch nur auf die für diese Arbeit relevanten Teile eingegangen.

PlanSys2 ist ein modulares OpenSource-Planungsframework. Ursprünglich als Nachfolger für ROSPlan [3] geplant, bietet es viel umfangreichere Funktionen. Hierfür werden unter anderem neue Funktionen von ROS2 wie LifeCycle-Knoten oder Multicast-Kommunikation genutzt.

Eins der Designprinzipien bei der Entwicklung von PlanSys2 ist Modularität und Erweiterbarkeit. Alle Komponenten haben klar definierte Schnittstellen, wodurch sie einfach erweitert oder ausgetauscht werden können.

Die Hauptkomponente ist der "*Planner*" Knoten, der den tatsächlichen Planer aufruft. Verschiedene Planer können über Plugins aufgerufen werden, die beschreiben, wie der Planer aufzurufen ist und wie der generierte Plan zu verstehen ist. Standardmäßig sind POPF sowie TFD (*Temporal Fast Downward*) [7] verfügbar und konfiguriert.

Der "*Domain Expert*" Knoten liest die Domäne im PDDL-Format ein. Er kann mehrere verschiedene Domänen zu einer kombinieren. Dies ermöglicht es, mehrere modulare Packages zu nutzen, die jeweils nur den für sie relevanten Teil einer Domäne beinhalten sowie deren Aktionen implementieren. Der Knoten dient zur Validierung (z.B. ob ein Prädikat, das hinzugefügt werden soll, mit den gegebenen Objekten gültig ist) und dem Planer die Domäne zur Verfügung zu stellen.

Der "*Problem Expert*" Knoten enthält alle Informationen zum gegebenen Problem: Objekte, Prädikate, Funktionen und Ziele. Diese werden immer über den "*Domain Expert*" validiert. Wenn ein Plan angefordert wird, werden die gespeicherten Informationen zu

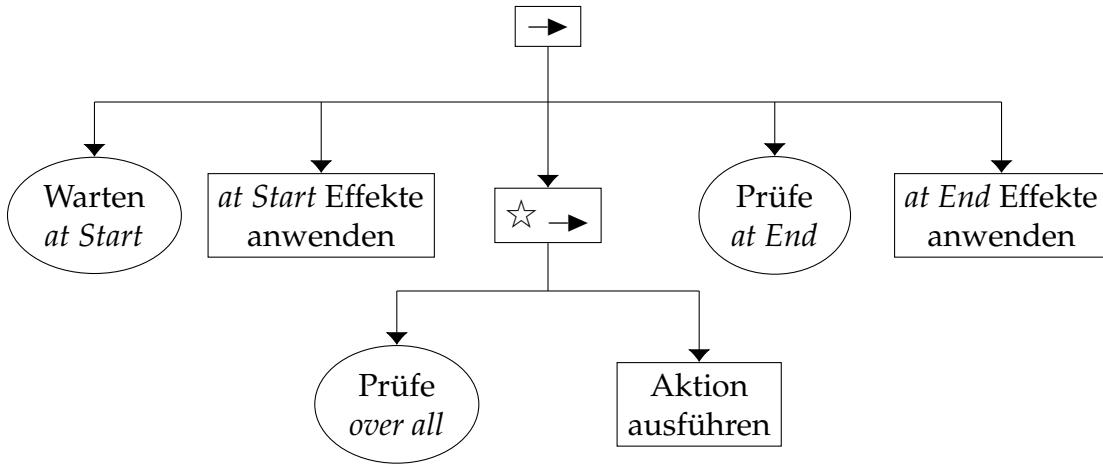


Abbildung 9: BT zur Ausführung einer spezifischen Aktion, nach [12]

einem Problem im PDDL Format konvertiert und dem "Planner" Knoten zur Verfügung gestellt.

Der "Executor" Knoten ist dafür zuständig einen generierten Plan auszuführen. Der Plan wird in einen BT konvertiert, der diesen ausführt.

Ein weiteres Konzept ist die Unterstützung für mehrere Roboter sowie eine Spezialisierung bei der Ausführung von Aktionen. Alle Knoten im gleichen Netzwerk können miteinander kommunizieren. Es kann mehrere Knoten geben, die die gleiche Domänenaktion ausführen, sich aber auf bestimmte Parameter spezialisieren. Mehrere Roboter können einen Knoten für die gleiche Aktion (*move roboter start ziel*) ausführen, wobei sich jede darauf spezialisiert, die Aktion auszuführen, deren erster Parameter mit dem entsprechenden Roboter übereinstimmt. Die gleiche Aktion kann je nach vorhandenen Parametern von verschiedenen Knoten ausgeführt werden.

BTs eignen sich für die Ausführung eines Plans, da sich mit ihnen sehr gut sequentielle und parallele Vorgänge beschreiben lassen. Zunächst wird von einem Plan ein Ausführungsgraph erstellt, der die Abhängigkeiten zwischen Aktionen zeigt. Von diesen lässt sich ableiten, welche Aktionen parallel ausgeführt werden können und welche sequentiell ausgeführt werden müssen. Semantisch entspricht jedes Blatt im Graphen einer Aktion. In der Praxis ist jedes Blatt ein eigenständiger BT, der nicht nur die selbst Aktion ausführt, sondern auch die Bedingungen überprüft und die Effekte ausführt (s. Abbildung 9).

PlanSys2 hat drei große Limitationen. PDDL-Unterstützung beschränkt sich aktuell auf PDDL 2.1 mit dem Ziel zukünftig, die aktuellste Version zu unterstützen. Wird eine Aktion und damit ein Plan abgebrochen, gibt es keine Garantie, dass der Zustand der Welt konsistent bleibt. Die Fähigkeit von Planern, die zunächst einen allgemeinen Plan liefern und diesen während der Ausführung verbessern, wird nicht genutzt. Eine geplante Funktion ist jedoch, Übergänge von der Ausführung eines Plans zu einem

2 Grundlagen

anderen zu ermöglichen.

3 Implementierung

In diesem Abschnitt wird die Umsetzung beschrieben. In Abschnitt 3.1 wird das Konzept vorgestellt. Hier wird dargestellt, welche Schritte und Systeme insgesamt nötig sind, um das eingangs aufgestellte Ziel zu erreichen. Anschließend werden diese einzeln im Detail erklärt. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung der Ergebnisse. Zusätzlich werden auch Details sowie mögliche Fehler- und Problemquellen genannt, auf die zu achten sind.

3.1 Konzept

In diesem Abschnitt wird der Ansatz beschrieben, mit dem in dieser Arbeit vorgegangen werden soll.

3.1.1 Inbetriebnahme

Im ersten Schritt muss der OpenMANIPULATOR-X in Betrieb genommen werden. Dies beinhaltet den Zusammenbau und Konfiguration sowie die Installation nötiger Software. Ein besonderes Augenmerk wird dabei darauf gelegt, Details festzuhalten, die in den gegebenen Anleitungen nicht explizit angegeben werden oder leicht zu übersehen sind.

3.1.2 Struktur der Nodes

Um eine einfache sowie übersichtliche Steuerung des Greifarms zu ermöglichen, wird die Funktionalität in mehrere ROS2-Nodes aufgeteilt. Generell werden folgende Funktionalitäten benötigt: der Planer, die Speicherung des aktuellen Zustands der Welt, die Ausführung des Plans sowie die Möglichkeit, Eingaben zu verarbeiten und an die entsprechenden Nodes weiterzuleiten.

Diese Aufteilung entspricht auch einer guten Aufteilung und Trennung der Verantwortungen, um daraus ROS2-Nodes zu machen. Hier haben die Nodes folgende Verantwortlichkeiten:

- Die Planungs-Node muss mit einer gegebenen Domäne und einem Problem einen Plan bestehend aus einer Reihe von Aktionen zurückgeben.
- Die Welt-Node hält den aktuellen Zustand der Welt bzw. des Problems und muss diesen konsistent halten.
- Die Ausführungs-Node muss entsprechend eines Plans die gegebenen Aktionen ausführen.
- Die Eingabe-Node ermöglicht die Erstellung eines Problems mit einem Welt-Zustand und einem Ziel.

3 Implementierung

3.1.3 Planungsmodell

Für die Erstellung von Plänen wird eine Domäne im PDDL-Format erstellt. In der Domäne werden die Aspekte des Stapelns von Blöcken mit denen des Greifers kombiniert. Zusätzlich werden *durative actions* genutzt, um die Dauer der einzelnen Aktionen zu modellieren.

3.1.4 Erstellung von Übungsbeispielen

Abschließend soll eine Übersicht erstellt werden, welche Möglichkeiten es gibt, den OpenMANIPULATOR-X in die Lehre einzubinden. Dies umfasst spezifische Beispiele sowie allgemeine Ansatzpunkte, um die Benutzung des OpenMANIPULATOR-X sowie dessen grundlegenden Konzepte zu vermitteln.

3.2 Inbetriebnahme Greifarm

Der OpenMANIPULATOR-X wird als Bausatz geliefert. Für die Inbetriebnahme ist daher der Zusammenbau und die Installation der entsprechenden Software nötig.

3.2.1 Zusammenbau

Der Bausatz des OpenMANIPULATOR-X besteht aus ca. 60 Teilen (ohne Schrauben, s. Abbildung 10). Einige der mit den Servomotoren mitgelieferten Teile werden dabei nicht benötigt, da der Bausatz des OpenMANIPULATOR-X diese auch enthält oder ersetzt (z.B. längere Kabel). Von allen Schrauben wurde außerdem Ersatz mitgeliefert.

Der Zusammenbau erfolgte nach der auf der Webseite verfügbaren Bauanleitung⁷. Zu beachten ist, dass hier vorausgesetzt wird, dass den Servos bereits die IDs 11 (Basis des Greifarms) bis 15 (Greifer) zugewiesen wurden. Dies kann über die Software DYNAMIXEL Wizard⁸ erfolgen. Die Servomotoren werden einzeln über das U2D2 (s. Abschnitt 3.3.1) an den PC angeschlossen, die ID setzen und den Servo entsprechend markieren oder die ID merken. Weiterhin müssen bei den Abdeckungen der Servomotoren 12 und 14 die vorgestanzten Abdeckungen herausgebrochen werden. Dies ist in der Anleitung leicht zu übersehen. Weiterhin wird angenommen, dass das Horn der Servos bereits angebracht ist. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Einkerbung an Horn und Servo übereinstimmen.

Für den kompletten Zusammenbau sind ca. 3-4h zu veranschlagen.

3.2.2 Virtuelle Maschine

Zur Nutzung des Greifarms wurde eine Virtuelle Maschine (VM) mit VirtualBox⁹ von Oracle aufgesetzt. Als Betriebssystem der VM wurde das für ROS2 Foxy empfohlene [16]

⁷https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/openmanipulator_x/assembly/

⁸https://emanual.robotis.com/docs/en/software/dynamixel/dynamixel_wizard2/

⁹<https://www.virtualbox.org>

3 Implementierung



Abbildung 10: Bausatz für den OpenMANIPULATOR-X

Ubuntu 20.04¹⁰ gewählt. Danach wurde entsprechend der Anleitung für den OpenMANIPULATOR-X [14] zuerst ROS 2 Foxy über das Installations-Skript von ROBOTIS und im Anschluss die für den Greifarm benötigten Packages installiert.

3.3 Steuerung OpenMANIPULATOR-X

In diesem Abschnitt wird die Hardware und Software vorgestellt, die zur Steuerung des OpenMANIPULATOR-X nötig ist. Weiterhin werden die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Steuerung erklärt.

3.3.1 Anschluss über U2D2

Der OpenMANIPULATOR-X wird über das U2D2 und das U2D2 Power Hub Board (s. Abbildung 11) per USB an den PC angeschlossen.

Das U2D2 konvertiert die Signale der DYNAMIXEL und ermöglicht die Kontrolle über den PC. Zur Nutzung des U2D2 in der VM muss das Gerät *FTDI USB <-> Serial Converter* über das Geräte-Menü der VM an diese gebunden werden (s. Abbildung 12).

3.3.2 OpenMANIPULATOR-X-Controller

Der OpenMANIPULATOR-X-Controller ist ein Package, das automatisch beim Installieren der für den OpenMANIPULATOR-X benötigten Software installiert wird. Er kann über die entsprechende Launch-Datei mit dem Befehl

¹⁰<https://releases.ubuntu.com/20.04/>

3 Implementierung

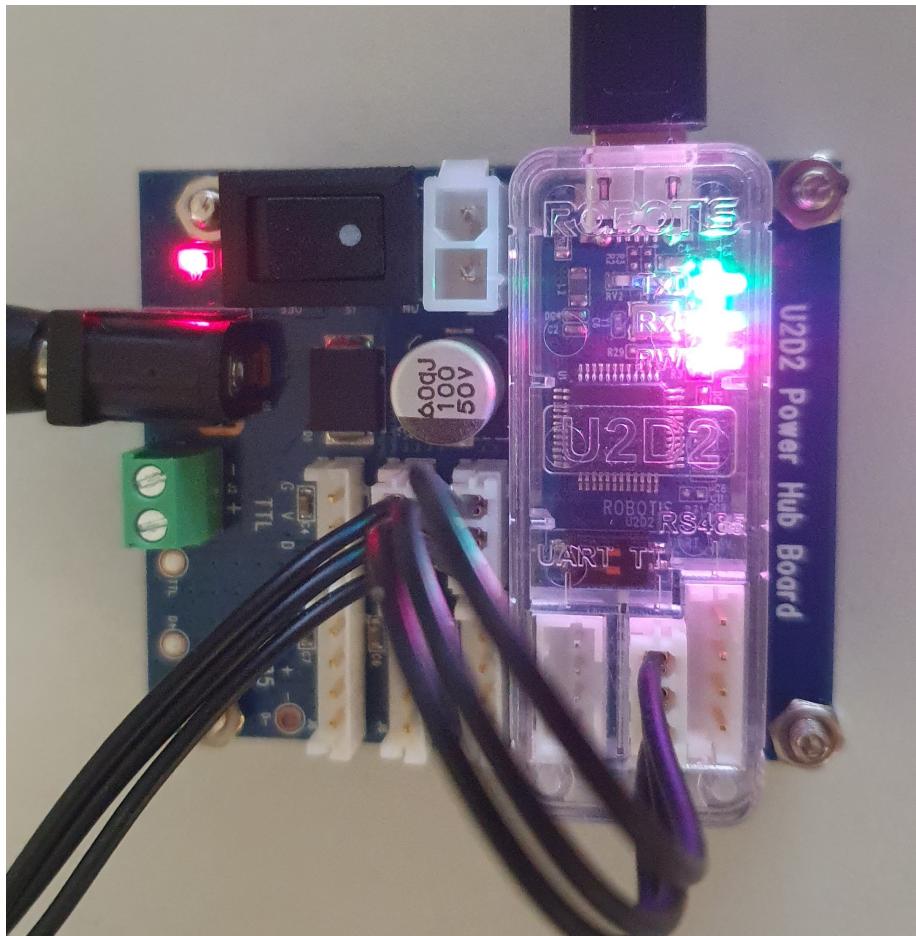


Abbildung 11: U2D2 Power Hub Board mit montiertem U2D2 (rechts im Bild)

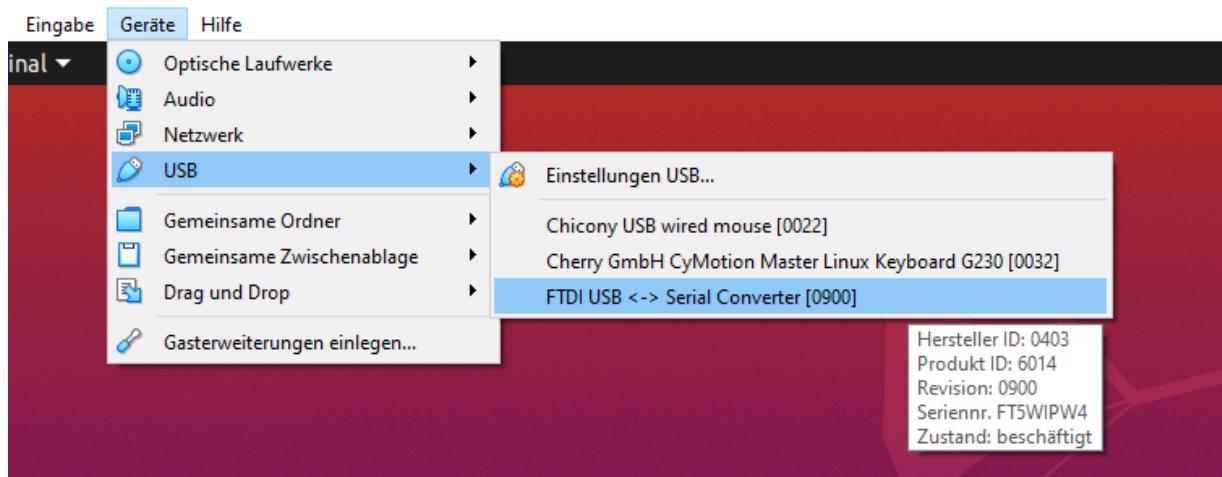


Abbildung 12: Geräte-Menü der VM mit angeschlossenem U2D2

3 Implementierung

```
ros2 launch open_manipulator_x_controller  
open_manipulator_x_controller.launch.py
```

gestartet werden.

Für eine Nutzung des OpenMANIPULATOR-X ist dieses Package zwangsläufig nötig, da es alle Steuerungsmöglichkeiten sowie Informationen über den OpenMANIPULATOR-X zur Verfügung stellt.

3.3.3 Joint- und Task-Space

Der OpenMANIPULATOR-X kann in den zwei verschiedenen Arbeitsräumen *Joint-Space* und *Task-Space* betrachtet werden. Im *Joint Space* werden die Gelenke und ihre aktuellen Winkel betrachtet. Der *Task Space* entspricht einer Betrachtung in einem kartesischen Koordinatensystem, mit dem Motor mit der ID 11 als Ursprung. Zusätzlich zur Position gibt es eine Orientierung für jede Achse (Roll-Nick-Gier, engl. *roll-pitch-yaw*).

3.3.4 Topics

Der OpenMANIPULATOR-X-Controller veröffentlicht drei Topics, die Informationen über den aktuellen Status geben:

- /states
- /joint_states
- /kinematics_pose

/states stellt allgemeine Informationen über die Motoren und die Bewegung des OpenMANIPULATOR-X zur Verfügung.

Ob die Motoren aktiviert sind, wird über das Feld *open_manipulator_actuator_state* mit den möglichen Werten *ACTUATOR_ENABLE* und *ACTUATOR_DISABLE* angegeben. Der Bewegungsstatus, mit den möglichen Werten *IS_MOVING* und *STOPPED*, ist im Feld *open_manipulator_moving_state* angegeben.

/joint_states stellt Informationen über alle Gelenke zur Verfügung. Dies umfasst den Namen, den aktuell verbrauchten Strom, die Position (den Winkel des Motors) sowie die Geschwindigkeit.

/kinematics_pose stellt Informationen über die Pose im *Task-Space* zur Verfügung. Eine Pose besteht dabei aus einer Position und einer Orientierung und bezieht sich auf den Greifer. Die Position enthält die Koordinaten der Mitte des Greifers. Die Orientierung gibt die Rotation als Quaternion an.

3.3.5 Kinematik

Der OpenMANIPULATOR-X lässt sich über zwei Formen der Kinematik steuern. Zum einen über die direkte Kinematik (auch Vorwärtskinematik, engl. *forward kinematics*, FK), was einer Steuerung im *Joint-Space* entspricht und zum anderen über die inverse Kinematik (engl. *inverse kinematics*, IK), was einer Steuerung im *Task Space* entspricht.

3 Implementierung

Die komplette kinematische Steuerung erfolgt über Services, die sich dementsprechend darin unterscheiden, ob Winkel für die Gelenke oder Posen für den Greifer angegeben werden. Bei der Steuerung über Posen besteht wiederum die Möglichkeit, Position und Orientierung oder nur eines der beiden zu steuern und den aktuellen Wert des anderen beizubehalten.

Die komplette Liste der Services ist in der Anleitung des OpenMANIPULATOR-X¹¹ zu finden.

3.3.6 Teleop

Mit einem laufenden OpenMANIPULATOR-X-Controller kann der OpenMANIPULATOR-X auch ohne extra Programmierung direkt ferngesteuert werden. Mögliche Geräte zur Steuerung sind die Tastatur sowie Playstation- und XBOX-Controller. Für ROS2 Foxy wird aktuell allerdings nur die Steuerung über die Tastatur unterstützt.

Der OpenMANIPULATOR-X kann dabei sowohl im *Task-Space* als auch im *Joint-Space* kontrolliert werden (s. Abbildung 13). Zusätzlich gibt es zwei vordefinierte Posen (Init und Home) in die der OpenMANIPULATOR-X bewegt werden kann (s. Abbildung 14).

```
Control Your OpenManipulator!

-----
Task Space Control:
    (Forward, X+)
        W           Q (Upward, Z+)
(Left, Y+) A   D (Right, Y-)   Z (Downward, Z-)
    X
    (Backward, X-)

Joint Space Control:
- Joint1 : Increase (Y), Decrease (H)
- Joint2 : Increase (U), Decrease (J)
- Joint3 : Increase (I), Decrease (K)
- Joint4 : Increase (O), Decrease (L)
- Gripper: Increase (F), Decrease (G) | Fully Open (V), Fully Close (B)

INIT : (1)
HOME : (2)

CTRL-C to quit

Joint Angle(Rad): [0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000]
Kinematics Pose(Pose X, Y, Z | Orientation W, X, Y, Z): 0.000, 0.000, 0.000 | 0.000, 0.000, 0.000, 0.000
```

Abbildung 13: Fernsteuerung des OpenMANIPULATOR-X über die Tastatur

¹¹https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/openmanipulator_x/ros_controller_msg/#message-list

3 Implementierung



Abbildung 14: Init (links) und Home (rechts) Pose der Tastatur Teleop

3.4 PlanSys2

Für die Implementierung der in Abschnitt 3.1.2 genannten Funktionalitäten wird das Framework PlanSys2 genutzt. Es übernimmt dabei alle Funktionalitäten: die Verwaltung der Daten zur Domäne und dem aktuellen Problem erfolgt über die *domain-expert*- und *problem-expert*-Nodes. Die *planer* Node ist für die komplette Planung zuständig und die *executioner*-Node für die Ausführung des Plans.

Es müssen hier lediglich die Domäne erstellt sowie die tatsächliche Funktionalität der einzelnen Aktionen implementiert werden. Das Wort "Action" im Namen der Nodes und den folgenden Abschnitten bezieht sich auf die Aktionen der Domäne, nicht auf ROS2-Actions.

3.4.1 PDDL-Domäne

Beim Erstellen der Domäne ist zu beachten, dass POPF nicht alle Funktionen unterstützt, die mit PDDL beschrieben werden können. Dies beinhaltet unter anderem existentielle sowie negative Vorbedingungen. Die vollständige Liste ist im "AI Planning & PDDL Wiki"¹² zu finden.

Für den *Blockworld*-Teil der Domäne gibt es zunächst den Typ `box` und Prädikate, die das Stapeln von Blöcken darstellen. Dies umfasst das Verhältnis von Blöcken aufeinander (`(box_on ?b_above ?b_below - box)`) sowie, ob ein Block der oberste eines Stacks ist und damit bewegt werden kann (`(clear ?b - box)`). Als Aktionen werden das Nehmen sowie Ablegen eines Blocks benötigt. Da in den Bedingungen und Effekten einer Aktion nur mit Parametern gearbeitet werden kann, die auch Parameter der Aktion selbst sind, wird hier weiter aufgeteilt in "Nehmen"/"Ablegen" eines Blocks von/auf

¹²<https://planning.wiki/ref/planners/popf>

3 Implementierung

einen anderen Block sowie von/auf einen leeren Stapel. Für das Bewegen von Blöcken ergeben sich die 4 Aktionen GRAB, PLACE, STACK, UNSTACK.

Während für das reine Stapeln der Blöcke die exakte Position dieser nicht wichtig ist, wird diese jedoch für den Greifer benötigt, der vor diesen Aktionen an die richtige Stelle bewegt werden muss. Hier werden die weiteren Typen location und stack sowie die Prädikate (box_at ?b - box ?l - location),

(gripper_at ?g - gripper ?l - location),
(location_above ?l_above ?l_below - location)

und (is_base_loc ?l - location ?s - stack) eingeführt.

Das Prädikat clear ist notwendig, da POPF weder existentielle noch negative Vorbedingungen unterstützt. Es wird genutzt, um zu überprüfen, ob ein Block der oberste eines Stapels ist, was es ermöglicht diesen zu nehmen oder einen anderen auf diesem abzulegen. Durch existentielle und negative Vorbedingungen könnte dies für die Aktion den Block B zu greifen, durch eine Bedingung der Form "es existiert kein Block C für den gilt:(box_on C B)" ersetzt werden.

Da alle Aktionen eine Dauer haben und PlanSys2 auch nur diese unterstützt, werden alle Aktionen als durative-action modelliert. Im aktuellen Szenario wird over all dafür genutzt, allen Block-Aktionen die Bedingung zu geben, dass sich der Greifer über die komplette Zeit an der gleichen Stelle wie der entsprechende Block befinden muss.

Nur in der MOVE-GRIPPER Aktion wird at start für einen Effekt genutzt:

(at start (not (gripper_at ?g ?l_from))).

Sobald die Aktion beginnt, befindet sich der Greifer nicht mehr an der Ausgangsposition und erst am Ende der Aktion wird die neue Position als Fakt gesetzt:

(at end(gripper_at ?g ?l_to)). Würden beide Effekte erst am Ende der Aktion eintreten, würde der Planer mehrere MOVE-GRIPPER Aktionen parallel ausführen (s. Abbildung 15). Dies ist zum einen physisch nicht möglich, hinterlässt die Welt aber auch in einem ungültigen Zustand, da der Greifer sich dann an mehreren Positionen gleichzeitig befinden würde.

```
0.000: (move-gripper gripper s1l2 s1l3) [1.000]
0.001: (move-gripper gripper s1l2 s2l1) [1.000]
0.002: (move-gripper gripper s1l2 s3l1) [1.000]
1.001: (grab gripper white s2l1 s2) [0.250]
1.002: (grab gripper grey s3l1 s3) [0.250]
1.003: (unstack gripper black yellow s1l3 s1l2) [0.250]
1.254: (place gripper black s3l1 s3) [0.250]
Planner found 1 plan(s) in 0.086secs.
```

Abbildung 15: Parallel ausgeführte MOVE-GRIPPER Aktionen bei fehlerhafter Domäne

3 Implementierung

3.4.2 Action Nodes

Obwohl in der Domäne mehr als zwei Aktionen beschrieben sind, beschränken sich die ausgeführten Aktionen auf ein Bewegen des OpenMANIPULATOR-X sowie die Steuerung des Greifers. Für diese wird jeweils eine Node erstellt.

Damit diese Nodes von PlanSys2 genutzt werden können, müssen sie von der Basisklasse `plansys2::ActionExecutorClient` erben. Da diese von PlanSys2 nur in C++ zur Verfügung gestellt wird, müssen auch die Aktionen in C++ implementiert werden.

In jeder Aktion muss die Methode `void do_work()` implementiert werden. Diese wird mit einem bestimmten Zeitintervall aufgerufen während die Aktion aktiv ist. Das Intervall wird im Konstruktor gesetzt (s. Zeile 20 in A.3). Das Mapping einer Node zu einer Aktion erfolgt durch das Setzen des Parameters `action_name` nach dem Erstellen der Node (s. Zeile 73 in A.3).

3.4.3 Control Gripper Aktion

Die Logik Node zur Steuerung des Greifers wird in der Klasse `GripperControlAction` (s. Anhang A.3) implementiert. Alle Zeilenangaben in diesem Abschnitt beziehen sich auf diesen Anhang.

Da es vom OpenMANIPULATOR-X kein Feedback gibt, ob oder wann etwas gegriffen wurde, wird die Aktion mit einer fixen Wartezeit implementiert: wenn die Aktion gestartet wird, wird ein Request zur Steuerung des Greifers erzeugt (s. Zeile 39) und gesendet und nach einer bestimmten Zeit die Aktion beendet. Um unnötige Aufrufe der Methode während des Wartens zu verhindern, wird die Wartezeit über das Zeitintervall zur Ausführung der Node gesetzt. Die Aktion wird hierdurch immer beim 2. Aufruf der Methode `do_work` beendet.

Zum Senden des Requests wird ein ROS2 Client für den Service `goal_tool_control` mit dem Typ `open_manipulator_msgs::srv::SetJointPosition` erstellt. Um sowohl die Aktionen zum Öffnen sowie Schließen des Greifers mit einer Node implementieren zu können, wird ein Parameter eingeführt, der über den Konstruktor gesetzt wird und die Bewegung des Greifers bestimmt. Für jede Aktion wird eine Node mit entsprechenden Parametern erzeugt.

Damit alle Nodes gemeinsam gestartet aber unabhängig voneinander ausgeführt werden können, wird ein `MultiThreadedExecutor` (s. Zeile 66) genutzt. Alle Nodes werden diesem `MultiThreadedExecutor` hinzugefügt (s. Zeilen 85-88). Dadurch können alle Nodes gemeinsam gestartet werden und laufen in einem Prozess, sind durch mehrere Threads aber unabhängig voneinander.

3.4.4 Move Gripper Aktion

Die Logik Node zur Bewegung des OpenMANIPULATOR-X wird in der Klasse `MoveGripperAction` (s. Anhang A.2) implementiert. Alle Zeilenangaben in diesem Abschnitt beziehen sich auf diesen Anhang.

Insgesamt umfasst dies das Senden des Bewegungsrequests an den vom OpenMANIPU-

3 Implementierung

LATOR-X-Controller erstellten Service-Client `goal_task_space_path_position_only` mit dem Typ `open_manipulator_msgs::srv::SetKinematicsPose` (s. Zeile(n) 42-43 für das Erstellen des Service-Clients, 148 für das Senden und 164-204 für das Erstellen der Requests) sowie das Beenden der Aktion wenn der OpenMANIPULATOR-X an der Zielposition angekommen ist. Ob die Bewegung beendet ist, wird über den im Topic `states` gesendeten Bewegungsstatus geprüft. Dieser kann die beiden Werte `IS_MOVING` und `STOPPED` annehmen. Der aktuelle Status wird mit dem letzten empfangenen verglichen: war der letzte Status `IS_MOVING` und der aktuelle `STOPPED`, waren der OpenMANIPULATOR-X in einer Bewegung, die jetzt beendet ist.

Um die Zielkoordinaten der Bewegung zu erhalten, muss der String-Parameter der Aktion in Zahlenwerte konvertiert werden. Zunächst werden aus dem String, der im Format `s<Nummer des Stapels>l<Höhe innerhalb eines Stapels>` vorliegt, die 2 Integerwerte mit Hilfe einer *regular expression* extrahiert. Diese werden im 2. Schritt über Maps zu Y- und Z-Koordinaten konvertiert. Die X-Koordinate ist im Rahmen dieser Arbeit fest auf den Wert 0,25 gesetzt.

Um eine kollisionsfreie Bewegung sicherzustellen, findet diese nicht direkt von der aktuellen zur Zielposition statt. Stattdessen werden mehrere Zwischenpositionen errechnet und entsprechende Bewegungen zuerst ausgeführt. Zunächst wird der OpenMANIPULATOR-X bei gleichbleibenden X- und Y-Koordinaten auf eine Z-Koordinate von 0,25 bewegt. Dies entspricht eine Höhe, in der keine Blöcke liegen können. Die zweite Zwischenposition bleibt auf der gleichen Höhe (Z-Koordinate 0,25) und bewegt sich zur X- und Y-Koordinate der Zielposition. Diese Zwischenposition befindet sich exakt oberhalb der Zielposition, sodass eine vertikale Bewegung zur Zielposition ohne Kollision möglich ist.

Diese Zwischenpositionen werden übersprungen, wenn die aktuelle Position des OpenMANIPULATOR-X bereits dem korrekten Stapel der Zielposition entspricht. Hierbei werden die aktuellen Koordinaten auf zwei Dezimalstellen gerundet.

Für alle benötigten Positionen wird ein Request erzeugt und einer Queue hinzugefügt. Der Auslöser, den nächsten Request zu senden, ist jeweils das Ende der vorherigen Bewegung.

Um Zugriff auf die aktuelle Position des OpenMANIPULATOR-X zu erhalten, wird ein weiterer Subscriber für das Topic `kinematics_pose` benötigt, das eine Message vom Typ `open_manipulator_msgs::msg::KinematicsPose` veröffentlicht.

Um eine Beschädigung der Motoren zu vermeiden, soll die Bewegung bei einer Kollision abgebrochen werden. Hierfür sind zwei Aspekte nötig: die Kollisionserkennung sowie das Abbrechen der Aktion. Die Kollisionserkennung erfolgt in der Methode `joint_state_callback` (s. Zeilen 73-100). Der Abbruch der Aktion erfolgt in der Methode `abort_plan` (s. Zeilen 102-112). Für die Kollisionserkennung wird der Stromverbrauch der einzelnen Motoren genutzt. Dieser steigt, wenn der Motor mehr Leistung bringen muss, wenn versucht wird, sich gegen ein Hindernis zu bewegen.

Dieser ist in der Message des Topics `joint_states` als `effort` enthalten. Für jedes Gelenk mit Ausnahme des Greifers (`effort` ist für diesen immer 0) wird die Anzahl der Werte gespeichert, die konsekutiv über dem Grenzwert `EFFORT_THRESHOLD` liegen. Wird der

3 Implementierung

Grenzwert deutlich überschritten (Wert ist mind. doppelt so hoch wie der Grenzwert), so wird dieser Wert auch doppelt gezählt um die Bewegung schneller abzubrechen. Liegt der Wert unterhalb des Grenzwerts, wird der Zähler wieder auf 0 zurückgesetzt. Erreicht der Zähler eines Gelenks den Grenzwert *EFFORT_COUNT* wird die Bewegung und damit der Plan abgebrochen. Zusätzlich wird die Position gespeichert, an der sich der OpenMANIPULATOR-X zum Zeitpunkt des Überschreitens des Grenzwerts befindet. Um die Ausführung der Aktion abzubrechen, wird die Methode `finish` mit einem ersten Parameter `false` aufgerufen. Eine fehlgeschlagene Aktion resultiert gleichzeitig in einem fehlgeschlagenen Plan. Ein Abbrechen der Aktion verhindert jedoch nicht, dass der OpenMANIPULATOR-X versucht, das aktuelle Bewegungsziel zu erreichen. Es wird ein neues Bewegungsziel erstellt, für das der gespeicherte Wert der Kollisionsposition genutzt wird.

3.4.5 Package

Alle erstellten Komponenten werden in einem eigenen ROS2 Package gebündelt. Dies umfasst die C++ Dateien für die Aktionen sowie die Domänendatei. Es wurde eine Launch Datei erstellt, um das komplette System über einen Befehl starten zu können. In der Launch Datei wird zum einen PlanSys2 und zum anderen die Nodes für alle Aktionen gestartet. Weiterhin wird hier festgelegt, welche Domäne genutzt wird. Das Package enthält außerdem eine Readme-Datei, in der die nötigen Schritte beschrieben sind um das gesamte System, einschließlich OpenMANIPULATOR-X, zu starten. Weiterhin wurden mehrere Problemszenarien erstellt, die sowohl als PDDL-Datei als auch als Befehle für das PlanSys2 Terminal zur Verfügung stehen.

3.5 Praktische Anwendung

Um das System praktisch anwenden zu können, wurden mehrere farbige Würfel aus LEGO gebaut. Auf der Basisplatte des OpenMANIPULATOR-X wurden die Positionen für drei Stapel markiert. Es werden mehrere Szenarien getestet, um die allgemeine Anwendbarkeit zu überprüfen.

3.5.1 PlanSys2 Terminal

Das PlanSys2-Terminal ist eine separate Node, die es ermöglicht, das System durch Eingabe über die Konsole zu steuern. Die wichtigsten Befehle sind hierbei `get`, `set` und `run`. Mit `get` können die Typen, Prädikate und Aktionen der geladenen Domäne sowie des aktuellen Problems angezeigt werden (s. Abbildung 19). Der `set`-Befehl wird genutzt, um das aktuelle Problem zu verändern. Es können Instanzen, Prädikate sowie das Ziel erstellt und geändert werden. Über den Befehl `run` lässt sich der Plan für das aktuelle Ziel ausführen. Es ist auch möglich nur einen Plan zu suchen, ohne ihn direkt auszuführen. Dies ist mit `get plan` möglich (s. Abbildung 20).

Während der Ausführung eines Plans wird im Terminal die aktuelle Aktion sowie dessen Fortschritt (gesteuert über den Feedback Kanal innerhalb der Aktion) angezeigt.

3 Implementierung

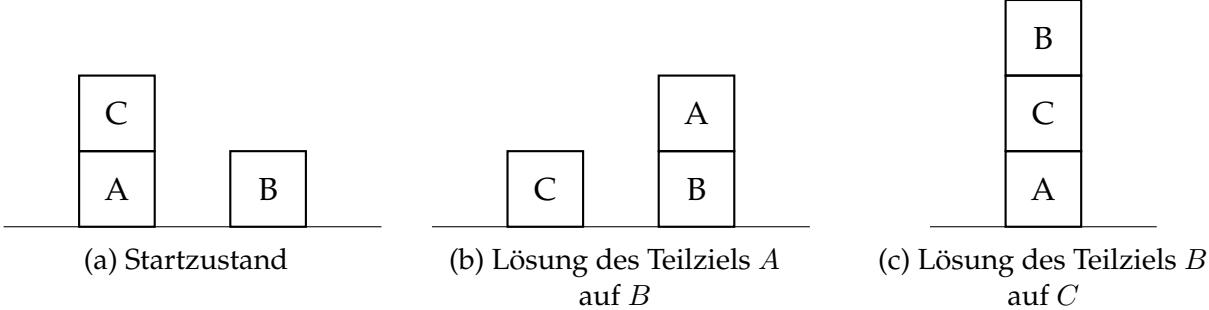


Abbildung 16: Übersicht der Sussman Anomalie

3.5.2 Sussman Anomalie

Die Sussman Anomalie [19] beschreibt eine Schwäche von Planern, bei der bereits ausgeführte Teile bzw. erreichte Unterziele rückgängig gemacht werden müssen, um andere bzw. das Gesamtziel zu erreichen. Dieses Problem kann durch drei Blöcke beschrieben werden, die sich anfangs in den Positionen befinden, die in Abbildung 16a gezeigt werden. Das Ziel ist es, dass *A* auf *B* und *B* auf *C* gestapelt wird, wobei jeweils immer nur ein Block gewegt werden kann. Wird versucht als erstes *A* auf *B* zu erfüllen, wird *C* zur Seite gelegt und *A* auf *B* platziert (s. Abbildung 16b). Dieser Schritt muss nun wieder rückgängig gemacht werden, um *B* auf *C* zu platzieren.

Wird stattdessen versucht als erstes *B* auf *C* zu erfüllen, so kann dies direkt durch bewegen von *B* erreicht werden (s. Abbildung 16c). Um das Ziel *A* auf *B* zu erfüllen, muss dieser Schritt nun wieder rückgängig gemacht werden. Um diese Anomalie zu handhaben, müssen Planer beide Ziele und deren Schritte kombinieren. POPF generiert für dieses Ziel den in Abbildung 18 gezeigten Plan, der in Abbildung 17 visualisiert wird. Der grau hervorgehobene Block ist jeweils der, der in diesem Schritt bewegt wurde.

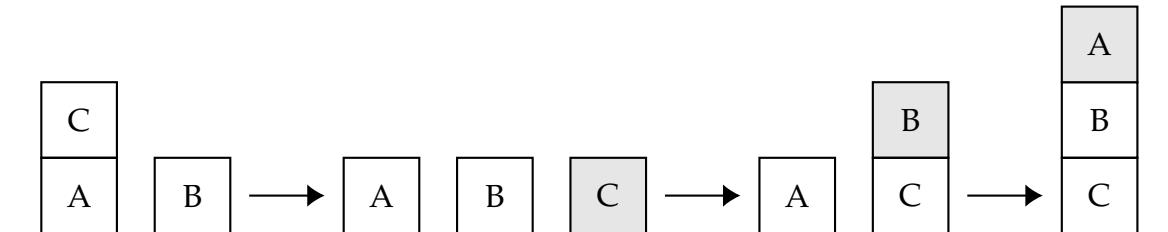


Abbildung 17: Visualisierte Lösung der Sussman Anomalie durch POPF

3.5.3 Mehr Blöcke, mehr Positionen

Die Anzahl der möglichen Blöcke und Positionen soll ausgereizt werden. Bei einem Szenario mit drei Stapeln mit jeweils drei Positionen kann ein Maximum von neun Blöcken platziert werden. Dies verhindert jedoch das Bewegen von Blöcken, da die einzige freie Position, zu der ein aufgenommener Block bewegt werden kann, seine Ursprungspositi-

3 Implementierung

```
0.000: (move-gripper gripper s1l3 s1l2) [1.000]
1.001: (unstack gripper c a s1l2 s1l1) [0.250]
1.251: (move-gripper gripper s1l2 s3l1) [1.000]
2.251: (place gripper c s3l1 s3) [0.250]
2.501: (move-gripper gripper s3l1 s2l1) [1.000]
3.501: (grab gripper b s2l1 s2) [0.250]
3.751: (move-gripper gripper s2l1 s3l2) [1.000]
4.751: (stack gripper b c s3l2 s3l1) [0.250]
5.001: (move-gripper gripper s3l2 s1l1) [1.000]
6.001: (grab gripper a s1l1 s1) [0.250]
6.251: (move-gripper gripper s1l1 s3l3) [1.000]
7.251: (stack gripper a b s3l3 s3l2) [0.250]
Planner found 1 plan(s) in 1.073secs.
```

Abbildung 18: Durch POPF generierter Plan für die Sussman Anomalie

on ist. Damit alle Blöcke bewegt werden können, muss die Anzahl der freien Positionen mindestens der Höhe der Stapel entsprechen. Gibt es bei einer Stapelhöhe von drei und drei Stapeln nur zwei freie Positionen, tritt das gleiche Problem für alle untersten Blöcke der Stapel auf: die einzige gültige Position nach dem Greifen ist ihre Ausgangsposition. Um mehr Blöcke verwenden zu können, müssen also die Anzahl der Stapel und/oder die maximale Höhe der Stapel erweitert werden.

Für beide Varianten gibt es Einschränkungen, die zu beachten sind. Für höhere Stapel ist der Bewegungsraum des OpenMANIPULATOR-X zu beachten. Über dem äußeren Rand der Grundplatte beträgt die maximale Höhe ca 25 cm. Da sich der Greifarm mit einem geöffneten Block frei oberhalb der Stapel bewegen können muss, muss die maximale Höhe eines Stapels unterhalb dieses Werts liegen. Die exakte Maximalhöhe ist von der Größe der Blöcke abhängig.

Für weitere Stapel wird als Voraussetzung angenommen, dass sich alle Stapel nebeneinander befinden sollen. Stapel, die sich hinter einem anderen befinden, können vom OpenMANIPULATOR-X nicht garantiert frei angesteuert werden. Je näher sich die Stapel am OpenMANIPULATOR-X befinden, desto größer ist der Winkel zwischen ihnen. Aufgrund der Größe des Greifers muss der Abstand zwischen mehreren Stapeln umso größer sein, je näher sie sich am OpenMANIPULATOR-X befinden. Stapel sollen sich daher am äußeren Rand der Grundplatte befinden.

Da sowohl ein Erhöhen der Anzahl der Stapel als auch deren Höhe durch die Größe der Blöcke behindert wird, wurden kleinere Blöcke gebaut. Dies ermöglicht bis zu 5 Stapel mit einer maximalen Höhe von 5 Blöcken. Das theoretische Limit an Blöcken wird damit auf 25 bzw. 20 um Bewegungen zu ermöglichen, erhöht.

Bereits Tests mit Zielen, deren Plan aus nur wenigen Schritten besteht, zeigen, dass dies den Suchraum so stark erweitert, dass Pläne nicht oder erst nach langer Zeit gefunden

3 Implementierung

werden. Ein Testfall mit 20 Blöcken und dem Ziel den obersten Block eines Stapels auf den eines anderen zu legen (optimale Planlänge: 4) führte dazu, dass der Planer ca. 13 Minuten lief. Obwohl laut Konsolenausgabe ein Plan gefunden wurde, wird dieser nicht ausgegeben (s. Abbildung ??).

Während bei den wenigen, größeren Blöcken eine Namensgebung entsprechend der Farbe ausreichend war, wurden die kleineren Blöcke durchnummiert. Das PlanSys2 Terminal erlaubt zwar die Erstellung von Objekten und Prädikaten, die diese nutzen mit rein numerischen Namen stürzt jedoch beim Versuch, ein Ziel mit diesen zu erstellen ohne aussagekräftige Fehlermeldung ab. Ein weiteres Problem, das sich bei der Nutzung der kleinen Blöcke zeigt ist, dass diese, aufgrund des geringeren Gewichts, beim Öffnen des Greifers an einer Seite kleben bleiben. Obwohl die Präzision des OpenMANIPULATOR-X selbst hoch genug ist, ist die Position der platzierten Blöcke dadurch nicht mehr genau. Durch die Größe des Greifers sowie der Blöcke lässt sich der jeweils unterste Block eines Stapels nicht mehr korrekt greifen. Dieser Block kann zwar normal und sicher bewegt werden, benötigt jedoch eine angepasste Position.

3.5.4 Abstürze und Fehlersuche

Während der Ausführung eines Plans kam es wiederholt zu Abstürzen der PlanSys2 Node. Diese Abstürze verhinderten eine vollständige Ausführung des Plans und erforderten einen Neustart des PlanSys2-Systems. Der Absturz erfolgte immer mit einem Exit Code 11, der auf ein *segmentation fault* hinweist. Um die Stelle des Absturzes zu finden, wurde PlanSys2 zunächst in der *distributed* anstelle der *monolithic* Version gestartet. Hierdurch werden alle Nodes in eigenen Prozessen gestartet. Dies ermöglichte ein Eingrenzen auf die *Executor Node*.

Für das weitere Debugging wurde der GNU Project Debugger (GDB) sowie xterm (muss separat installiert werden) genutzt. In der Launch-Datei für den Executor wurde der Node prefix=['xterm -e gdb -ex run --args'] hinzugefügt, um beim Start der Node auch eine Debugging-Session zu starten.

Über den backtrace nach einem Absturz wurde die Methode

ActionExecutor::request_for_performers() als Ursache für den Absturz identifiziert. Innerhalb dieser Methode wurde das Problem in der Zeile

action_hub_pub_->publish(msg); gefunden. Zum Zeitpunkt eines Absturzes hatte die Variable action_hub_pub_ den Wert null. Um den Absturz zu verhindern wurde ein null-Check implementiert. Obwohl dieser dafür sorgt, dass einige Messages nicht gesendet werden, führte diese Änderung zu keinen offensichtlichen Nebenwirkung und Pläne werden normal ausgeführt.

3 Implementierung

```
fabian@fabian-VirtualBox:~/colcon_ws2$ ros2 run plansys2_terminal plansys2_terminal
[INFO] [1636970274.917224956] [terminal]: No problem file specified.
ROS2 Planning System console. Type "quit" to finish
> get problem
    Usage:
        get problem [instances|predicates|functions|goal]...
> get model
    Usage:
        get model [types|predicates|functions|actions|predicate|function|action]...
> get model types
Types: 4
    box
    gripper
    location
    stack
> █
```

Abbildung 19: PlanSys2 Terminal mit Abfrage der Typen des geladenen Models

```
> set goal (and(box_on white yellow)(box_on blue white))
> get plan
plan:
0      (move-gripper gripper s2l2 s1l2)      1
1.001  (unstack gripper yellow blue s1l2 s1l1) 0.25
1.251  (move-gripper gripper s1l2 s3l1)      1
2.251  (place gripper yellow s3l1 s3)  0.25
2.501  (move-gripper gripper s3l1 s2l1)      1
3.501  (grab gripper white s2l1 s2)   0.25
3.751  (move-gripper gripper s2l1 s3l2)      1
4.751  (stack gripper white yellow s3l2 s3l1) 0.25
5.001  (move-gripper gripper s3l2 s1l1)      1
6.001  (grab gripper blue s1l1 s1)    0.25
6.251  (move-gripper gripper s1l1 s3l3)      1
7.251  (stack gripper blue white s3l3 s3l2)  0.25
```

Abbildung 20: Ausgabe eines Plans in PlanSys2 Terminal

4 Ergebnis

4.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Prozess untersucht, der vom OpenMANIPULATOR-X in Einzelteilen zu einem benutzbaren Greifarm, der durch Handlungsplanung steuerbar ist, führt. Dabei werden die nötigen Grundkenntnisse zum Betrieb von Robotern mit ROS2 vermittelt und die Funktionsweise des Planers POPF erklärt.

Der Zusammenbau des OpenMANIPULATOR-X erfolgte ohne größere Probleme. Die beschriebenen Details, die leicht zu übersehen sind, lassen sich auch im Nachhinein ohne großen Aufwand beheben oder korrigieren. Durch die verfügbaren Installations-Skripts gab es auch softwareseitig keine Hindernisse für einen schnellen Einstieg. Auch wenn zu Beginn dieser Arbeit noch keine offizielle Unterstützung von ROS2-Foxy vorhanden war, konnte anhand der Anleitung für ältere ROS2-Distributionen alles zum Funktionieren gebracht werden. Durch die Kombination der ROS2-Foxy Tutorials sowie der OpenMANIPULATOR-X API-Dokumentation ließen sich auch ohne Vorkenntnisse schnell Fortschritte machen.

Die Einbindung von PlanSys2 erfolgt ohne weitere Konfiguration. Durch die Beispielprojekte lässt sich schnell und unkompliziert in die Entwicklung des eigenen Projekts starten.

Bei der Entwicklung der Domäne zeigte sich, dass aufgrund der Einschränkungen der nutzbaren Funktionen von PDDL durch POPF, die Komplexität von Problemen schnell ansteigt. Bereits kleine Erhöhungen der Anzahl der Stapel oder Blöcke führte zu Berechnungszeiten, die eine Echtzeitsteuerung des Greifarms nicht ermöglicht.

4.2 Ausblick

4.2.1 MoveIt

Um den in dieser Arbeit verwendeten Ansatz der Bewegungsplanung robuster und dynamischer zu machen, empfiehlt sich die Implementierung der Bibliothek MoveIt¹³. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung wird diese vom OpenMANIPULATOR-X beim Betrieb mit ROS2 Foxy allerdings noch nicht offiziell unterstützt.

MoveIt bietet mittels virtueller Szenen die Möglichkeit, effiziente und kollisionsfreie Wege für die Bewegung des OpenMANIPULATOR-X zu planen und auszuführen. In der virtuellen Szene befindet sich sowohl ein Modell des Roboters als auch aller relevanten Hindernisse. Wird eine Bewegung zu einer Position angefordert, kann der generierte Pfad auf potenzielle Kollisionen mit Objekten der Szene überprüft werden.

4.2.2 Vorschläge für Übungen in der Lehre

Um die Verwendung des OpenMANIPULATOR-X in der Lehre näher zu bringen, gibt es in dem für diese Arbeit entstandenen Package mehrere Stellen, an denen angesetzt

¹³MOVEIT URL

4 Ergebnis

werden kann.

Grundsätzlich lassen sich diese in die zwei Bereiche ROS2 und Greifarm sowie Planung mit Domäne und Problemen in PDDL aufteilen. Für jeden dieser Bereiche besteht die Möglichkeit die Aufgaben in die folgenden Richtungen zu führen:

- Fehlersuche mit sinnvoll platzierten Fehlern
- Erkennen und Korrigieren weggelassener Abschnitte, welche durch das Verstehen des Codes erkannt werden können
- die Anpassung des Codes an ein ähnliches Szenario

Ein Beispiel für die Domäne ist, den Effekt der MOVE-GRIPPER Aktion, der die Startposition löscht, erst am Ende der Aktion auszuführen, was dazu führt, dass zum Start des Plans alle nötigen Bewegungen gleichzeitig ausgeführt werden.

Eine Aufgabe für das Schreiben/Anpassen eines Problems in PDDL, welche sich anbietet, ist eine vorgegebene Problemdatei, welche nur die grundlegende Struktur über Stapel und Positionen enthält, so zu erweitern, dass eine von mehreren möglichen, vorgegebenen Varianten von gestapelten Blöcken beschrieben wird. Die Aufgabe kann dadurch erleichtert werden, dass das gegebene Problem bereits eine bestimmte Stapelung von Blöcken darstellt und nur angepasst werden muss.

Für alle Aufgaben, die PDDL betreffen, bietet es sich an, VS-Code mit dem PDDL-Plugin zu nutzen, um schnelle Iterationen und eine Visualisierung der Pläne zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] J. A. Bagnell, F. Cavalcanti, L. Cui, T. Galluzzo, M. Hebert, M. Kazemi, M. Klingensmith, J. Libby, T. Y. Liu, N. Pollard, M. Pivtoraiko, J.-S. Valois und R. Zhu. An integrated system for autonomous robotics manipulation. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Seiten 2955–2962, 2012. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385888.
- [2] T. Bylander. The Computational Complexity of Propositional STRIPS Planning. *Artificial Intelligence*, 69:165–204, 1994.
- [3] M. Cashmore, M. Fox, D. Long, D. Magazzeni, B. Ridder, A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtós und M. Carreras. ROSPlan: Planning in the Robot Operating System. In *ICAPS*, 2015.
- [4] A. Coles, A. Coles, M. Fox und D. Long. Forward-Chaining Partial-Order Planning. In Seiten 42–49, Jan. 2010.
- [5] M. Colledanchise und P. Ögren. Behavior Trees in Robotics and AI: An Introduction. *CoRR*, abs/1709.00084, 2017. arXiv: 1709.00084. URL: <http://arxiv.org/abs/1709.00084>.
- [6] C. R. Dyer. Partial Order Planning. <http://pages.cs.wisc.edu/~dyer/cs540/notes/pop.html>, 2003.
- [7] P. Eyerich, R. Mattmüller und G. Röger. *Using the Context-Enhanced Additive Heuristic for Temporal and Numeric Planning*. In *Towards Service Robots for Everyday Environments: Recent Advances in Designing Service Robots for Complex Tasks in Everyday Environments*. E. Prassler, M. Zöllner, R. Bischoff, W. Burgard, R. Haschke, M. Hägele, G. Lawitzky, B. Nebel, P. Plöger und U. Reiser, Herausgeber. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, Seiten 49–64. ISBN: 978-3-642-25116-0. DOI: 10.1007/978-3-642-25116-0_6. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-25116-0_6.
- [8] R. E. Fikes und N. J. Nilsson. Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, 2(3):189–208, 1971. ISSN: 0004-3702. DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(71\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0004-3702(71)90010-5). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370271900105>.
- [9] A. Grastien. Planning (04) Partial-order planning. <http://www.grastien.net/ban/teaching/06-planning4.pdf>, 2006.
- [10] J. Hoffmann und B. Nebel. The FF Planning System: Fast Plan Generation Through Heuristic Search. *CoRR*, abs/1106.0675, 2011. arXiv: 1106.0675. URL: <http://arxiv.org/abs/1106.0675>.

-
- [11] A. Klöckner. Behavior Trees for UAV Mission Management. In M. Horbach, Herausgeber, *INFORMATIK 2013: Informatik angepasst an Mensch, Organisation und Umwelt*, Band P-220 der Reihe *GI-Edition-Lecture Notes in Informatics (LNI) - Proceedings*, Seiten 57–68, Koblenz, Germany. Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), Kölken Druck + Verlag GmbH, Bonn, 16-20 September 2013. URL: <http://www.gi.de/service/publikationen/lni/>. ISBN 978-3-88579-614-5.
 - [12] F. Martín, J. Ginés, V. Matellán und F. J. Rodriguez. PlanSys2: A Planning System Framework for ROS2. *CoRR*, abs/2107.00376, 2021. arXiv: 2107 . 00376. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.00376>.
 - [13] A. Marzinotto, M. Colledanchise, C. Smith und P. Ögren. Towards a unified behavior trees framework for robot control. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 5420–5427, 2014. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907656.
 - [14] Robotis. OpenMANIPULATOR-X. URL: https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/openmanipulator_x/quick_start_guide/#install-ros-on-pc (besucht am 03.11.2021).
 - [15] Robotis. OpenMANIPULATOR-X Overview. URL: https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/openmanipulator_x/overview/ (besucht am 01.01.2022).
 - [16] ROS. Installing ROS 2 on Ubuntu Linux. URL: <https://docs.ros.org/en/foxy/Installation/Ubuntu-Install-Binary.html> (besucht am 03.11.2021).
 - [17] M. Rose. OpenManipulator Chain Spec Side. https://github.com/ROBOTIS-GIT/emanual/blob/master/assets/images/platform/openmanipulator_x/OpenManipulator_Chain_spec_side.png. Lizenziert unter MIT-License <https://opensource.org/licenses/MIT>.
 - [18] M. Rose. OpenManipulator Introduction. https://github.com/ROBOTIS-GIT/emanual/blob/master/assets/images/platform/openmanipulator_x/OpenManipulator_Introduction.jpg. Lizenziert unter MIT-License <https://opensource.org/licenses/MIT>.
 - [19] G. J. Sussman. *A Computational Model of Skill Acquisition*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1973. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/6894>.
 - [20] What is AI Planning? URL: <https://planning.wiki/guide/whatis/aip> (besucht am 13.11.2021).

A Quellcode

A.1 Planungsdomäne

```
(define (domain blockworld)
(:requirements :strips :typing :adl :fluents :durative-actions)

;; Types ;;;;;;;;;;;;;;;
5 (:types
  box
  gripper
  location
  stack
10 );; end Types ;;;;;;;;;;;;;;

;; Predicates ;;;;;;;;;;;;;;
(:predicates

15  (gripper_at ?g - gripper ?l - location)
  (box_at ?b - box ?l - location)
  (box_on ?b_above ?b_below - box)
  (gripper_open ?g - gripper)
  (is_holding ?g - gripper ?b - box)
20  (clear ?b - box)
  (stack_empty ?s - stack)
  (location_above ?l_above ?l_below - location)
  (is_base_loc ?l - location ?s - stack)

25 );; end Predicates ;;;;;;;;;;;;;;
;; Functions ;;;;;;;;;;;;;;
(:functions

30 );; end Functions ;;;;;;;;;;;;;;

35 (:durative-action GRAB
  :parameters (
    ?g - gripper
    ?b - box
    ?l - location
    ?s - stack
  )
  :duration (= ?duration 0.25)
40  :condition (
    and
      (over_all(gripper_at ?g ?l))
      (at_start(box_at ?b ?l))
      (at_start(gripper_open ?g))
45      (at_start(clear ?b))
      (at_start(is_base_loc ?l ?s))
  )
)
```

```

:effect (
  and
    (at end(not (box_at ?b ?1)))
    (at end(not (gripper_open ?g)))
    (at end(is_holding ?g ?b))
    (at end(stack_empty ?s))
    (at end(not(clear ?b)))
)
)

(:durative-action PLACE
  :parameters (
    ?g - gripper
    ?b - box
    ?l - location
    ?s - stack
  )
  :duration (= ?duration 0.25)
  :condition (
    and
      (at start(is_holding ?g ?b))
      (over all(gripper_at ?g ?l))
      (at start(is_base_loc ?l ?s))
      (at start(stack_empty ?s))
  )
  :effect (
    and
      (at end(box_at ?b ?1))
      (at end(not (is_holding ?g ?b)))
      (at end(gripper_open ?g))
      (at end(clear ?b))
      (at end(not(stack_empty ?s)))
  )
)

(:durative-action STACK
  :parameters (
    ?g - gripper
    ?b ?b2 - box
    ?l ?l2 - location
  )
  :duration (= ?duration 0.25)
  :condition (
    and
      (at start(clear ?b2))
      (at start(is_holding ?g ?b))
      (over all(gripper_at ?g ?l))
      (at start(location_above ?l ?l2))
      (at start(box_at ?b2 ?l2))
  )
  :effect (

```

```

        and
100      (at end(not(clear ?b2)))
        (at end(box_on ?b ?b2))
        (at end(clear ?b))
        (at end(box_at ?b ?1))
        (at end(not(is_holding ?g ?b)))
        (at end(gripper_open ?g))

105    )
)
)

(:durative-action UNSTACK
110  :parameters (
    ?g - gripper
    ?b ?b2 - box
    ?1 ?l2 - location
)
:duration (= ?duration 0.25)
:condition (
    and
        (at start(clear ?b))
        (at start(gripper_open ?g))
120      (at start(box_on ?b ?b2))
        (over all(gripper_at ?g ?1))
        (at start(box_at ?b ?1))
        (at start(box_at ?b2 ?l2))
)
:effect (
    and
        (at end(not(clear ?b)))
        (at end(not(box_on ?b ?b2)))
        (at end(clear ?b2))
130      (at end(is_holding ?g ?b))
        (at end(not(box_at ?b ?1)))
        (at end(not(gripper_open ?g)))
)
)
)

135 (:durative-action MOVE-GRIPPER
:parameters (
    ?g - gripper
    ?l_from ?l_to - location
)
:duration (= ?duration 1)
:condition (
    and
        (at start(gripper_at ?g ?l_from))
)
:effect (
    and
        (at start(not (gripper_at ?g ?l_from)))
        (at end(gripper_at ?g ?l_to))
)
)
)
```

```

150     )
)
); end Domain ;;;;;;;;;;;;;;;;
```

A.2 Move Gripper Action Node

```

#include <memory>
#include <algorithm>
#include <queue>
#include <regex>
5
#include "plansys2_executor/ActionExecutorClient.hpp"
#include "rclcpp/rclcpp.hpp"

10 #include "open_manipulator_msgs/msg/open_manipulator_state.hpp"
#include "open_manipulator_msgs/msg/kinematics_pose.hpp"
#include "open_manipulator_msgs/srv/set_kinematics_pose.hpp"
#include "sensor_msgs/msg/joint_state.hpp"

15 using namespace std::chrono_literals;
using std::placeholders::_1;

class MoveGripperAction : public plansys2::ActionExecutorClient {
public:
20     MoveGripperAction()
        : plansys2::ActionExecutorClient("move_gripper", 100ms) {
    initialize_parameters();
    std::string size;
    this->get_parameter("size", size);
25    if(size == "big"){
        heightMap = &heightMapBig;
        stackPosMap = &stackPosMapBig;
    }
    else{
30        heightMap = &heightMapSmall;
        stackPosMap = &stackPosMapSmall;
    }
    isStarted = false;
    isCurrentMovementFinished = false;
35
        manipulator_state_subscription_ = this->create_subscription<
open_manipulator_msgs::msg::OpenManipulatorState>(
            "states", 10, std::bind(&MoveGripperAction::
manipulator_state_callback, this, _1));
        joint_state_subscription_ = this->create_subscription<sensor_msgs::
msg::JointState>(
            "joint_states", 10, std::bind(&MoveGripperAction::
joint_state_callback, this, _1));
```

```

40     kinematics_pose_subscription_ = this->create_subscription<
open_manipulator_msgs::msg::KinematicsPose>(
        "kinematics_pose", 10, std::bind(&MoveGripperAction::
kinematics_pose_callback, this, _1));
    kinematicsPoseClient = this->create_client<open_manipulator_msgs::
srv::SetKinematicsPose>(
        "goal_task_space_path_position_only");
    while (!kinematicsPoseClient->wait_for_service(1s)) {
        if (!rclcpp::ok()) {
            RCLCPP_ERROR(rclcpp::get_logger("rclcpp"), "Interrupted
while waiting for the service. Exiting.");
            break;
        }
        RCLCPP_INFO(rclcpp::get_logger("rclcpp"), "KinematicsPose
service not available, waiting again...");
    }
}

private:
    void initialize_parameters()
{
    //this->declare_parameter<int>("stack_count", 3);
    //this->declare_parameter<int>("stack_size", 3);
    //this->declare_parameter<float>("block_size", 4.5);
    this->declare_parameter<std::string>("size", "big");
}
    void manipulator_state_callback(const open_manipulator_msgs::msg::
OpenManipulatorState::SharedPtr msg) {
        last_moving_state = current_moving_state;
        current_moving_state = msg->open_manipulator_moving_state;
        if (last_moving_state == STATE_MOVING && current_moving_state ==
STATE_STOPPED) {
            isCurrentMovementFinished = true;
            queueTasksDone++;
        }
    }
    void kinematics_pose_callback(const open_manipulator_msgs::msg::
KinematicsPose::SharedPtr msg) {
        kinematicsPose = msg;
    }

    void joint_state_callback(const sensor_msgs::msg::JointState::SharedPtr
msg) {
        //we only care about the effort while this node is active
        if (!isStarted) return;
        for (int i = 0; i < 4; ++i) {
            std::cout << msg->effort[i] << std::endl;
        }
        std::cout << "-----" << std::endl;
        //check all joints except gripper (gripper is always returned as
effort 0 because of its control mode)

```

```

        for (int i = 0; i < 4; i++) {
            //increase the counter if the effort is greater than the
            threshold value
            if(std::abs(msg->effort[i]) > EFFORT_THRESHOLD){
                //save the position when the collision is initially detected
                //to use as target position when aborting
                if(jointEffortCounter[i] == 0){
                    collisionPosition = kinematicsPose->pose.position;
                }
                int increment = msg->effort[i] >= 2 * EFFORT_THRESHOLD ? 2 :
                1;
                jointEffortCounter[i] += increment;
                //abort plan when threshold is reached multiple consecutive
                90 times
                if(jointEffortCounter[i] >= EFFORT_COUNT){
                    abort_plan(i);
                }
                95 //reset counter when effort is below threshold
                else{
                    jointEffortCounter[i] = 0;
                }
            }
        }
    }

    void abort_plan(int servoIndex){
        std::cout << "collision detected for servo " << servoIndex << ","
        aborting plan" <<std::endl;
        auto request = create_request(collisionPosition.x, collisionPosition
        .y, collisionPosition.z);
        auto result = kinematicsPoseClient->async_send_request(request);
        105 //reset effort values
        for (int i = 0; i < 4; i++) {
            jointEffortCounter[i] = 0;
        }
        110 isStarted = false;
        finish(false, 0, "Collision");
    }

    void do_work() {
        115 if (!isStarted) {
            //get arguments and initialise values
            //do only once per execution
            isStarted = true;
            isCurrentMovementFinished = true; //we want to immediately start
            120 the next movement
            auto args = get_arguments();
            int level = -1;
            int stack = -1;
            std::smatch match;

```

```

125         if(regex_match(args[2], match, re_pattern) && match.size() == 3)
126     {
127         std::cout << match.size() << " " << match[0] << " " << match
128         [1] << " " << match[2] << std::endl;
129         stack = std::stoi(match[1].str());
130         level = std::stoi(match[2].str());
131     }
132     else
133     {
134         std::cout << "Error parsing location" << std::endl;
135     }
136     if(heightMap->size() < level || stackPosMap->size() < stack){
137         std::cout << "Missing coordinate data for stack:" << stack
138         << ", Level:" << level << std::endl;
139     }
140     create_movement(stack, level);
141     queueLength = requestQueue.size();
142     queueTasksDone = 0;
143     send_feedback(float(queueTasksDone) / queueLength, "Move started
144     ");
145     }
146     if(isCurrentMovementFinished){
147         //last movement finished, advance the queue
148         if (!requestQueue.empty()) {
149             auto nextRequest = requestQueue.front();
150             requestQueue.pop();
151             isCurrentMovementFinished = false;
152             auto result = kinematicsPoseClient->async_send_request(
153             nextRequest);
154             send_feedback(float(queueTasksDone) / queueLength, "Move
155             continue");
156             //std::cout << "\r\n[K" << std::flush;
157             std::cout << "Moving ... [" << roundTo2DecimalPlaces(float(
158             queueTasksDone) / queueLength) << "] " << std::endl;
159         }
160         else if(isStarted){
161             //we did start and no more movement enqueued
162             finish(true, 1.0, "Move completed");
163
164             isStarted = false;
165         }
166     }
167     //send_feedback(float(queueTasksDone) / queueLength, "Move started")
168 ;
169 }

void create_movement(int stack, int level){
    //clear the queue by swapping with an empty one
    std::queue<std::shared_ptr<open_manipulator_msgs::srv::SetKinematicsPose::Request>> emptyQueue;

```

```

        std :: swap(requestQueue, emptyQueue);
        if(stack == -1 || level == -1 || kinematicsPose == nullptr){
            std :: cout << "Error detected when creating movement stack: " <<
stack << " level: " << level << " Pose null: " << (kinematicsPose ==
nullptr) << std :: endl;
            return;
        }
        //a position above the current that is clear from collisions
        auto currentPosition = kinematicsPose->pose.position;
        std :: cout << "Calculating Positions..." << std :: endl;
        std :: cout << "Current (" << currentPosition.x << ", " <<
currentPosition.y << ", " << currentPosition.z << ")" << std :: endl;
        std :: cout << "Target (" << STACK_POS << ", " << (*stackPosMap)[stack
] << ", " << (*heightMap)[level] << ")" << std :: endl;
        if(roundTo2DecimalPlaces(currentPosition.x) != STACK_POS ||
roundTo2DecimalPlaces(currentPosition.y) != (*stackPosMap)[stack]){
            std :: cout << "We are at the wrong stack, adding positions for
collision free movement" << std :: endl;
            auto currentClearRequest = create_request(currentPosition.x,
currentPosition.y, CLEAR_HEIGHT);

180
            //a position above the target position that is clear from
collisions
            auto targetClearRequest = create_request(STACK_POS,(* stackPosMap
)[stack], CLEAR_HEIGHT);
            std :: cout << "Adding Position: (" << currentPosition.x << ", "
<< currentPosition.y << ", " << CLEAR_HEIGHT << ")" << std :: endl;
            requestQueue.push(currentClearRequest);
            std :: cout << "Adding Position: (" << STACK_POS << ", " << (*
stackPosMap)[stack] << ", " << CLEAR_HEIGHT << ")" << std :: endl;
            requestQueue.push(targetClearRequest);
        }

190
        //the position we want to end up at
        auto targetPointRequest = create_request(STACK_POS, (*stackPosMap)[
stack], (*heightMap)[level]);
        std :: cout << "Adding Position: (" << STACK_POS << ", " << (*
stackPosMap)[stack] << ", " << (*heightMap)[level] << ")" << std :: endl;
        requestQueue.push(targetPointRequest);
    }

195
    std :: shared_ptr<open_manipulator_msgs :: srv :: SetKinematicsPose :: Request>
create_request(float x, float y, float z) {
        auto request = std :: make_shared<open_manipulator_msgs :: srv ::

SetKinematicsPose :: Request>();
        request->end_effector_name = "gripper";
        request->kinematics_pose.pose.position.x = x;
        request->kinematics_pose.pose.position.y = y;
        request->kinematics_pose.pose.position.z = z;
        request->path_time = 2.5;

```

```

        return request;
    }

205   float roundTo2DecimalPlaces(float input){
        return roundf(input * 100) / 100;
    }

210   rclcpp::Subscription<open_manipulator_msgs::msg::OpenManipulatorState>::SharedPtr
manipulator_state_subscription_;
rclcpp::Subscription<sensor_msgs::msg::JointState>::SharedPtr
joint_state_subscription_;
rclcpp::Subscription<open_manipulator_msgs::msg::KinematicsPose>::SharedPtr
kinematics_pose_subscription_;
rclcpp::Client<open_manipulator_msgs::srv::SetKinematicsPose>::SharedPtr
kinematicsPoseClient;
std::shared_ptr<open_manipulator_msgs::msg::KinematicsPose>
kinematicsPose;
std::queue<std::shared_ptr<open_manipulator_msgs::srv::SetKinematicsPose>::Request>>
requestQueue;
bool isStarted;
bool isCurrentMovementFinished;
int queueLength;
int queueTasksDone;
//int level = -1;
std::string current_moving_state;
std::string last_moving_state;
const std::string STATE_MOVING = "IS_MOVING";
const std::string STATE_STOPPED = "STOPPED";
225  const float STACK_POS = 0.25;
const float CLEAR_HEIGHT = 0.25;
const int EFFORT_COUNT = 10;
const float EFFORT_THRESHOLD = 400;
std::vector<int> jointEffortCounter {0, 0, 0, 0};
geometry_msgs::msg::Point collisionPosition;
std::regex re_pattern {"^s(\d+)l(\d+)" , std::regex::ECMAScript};
std::map<int, float>* heightMap;
std::map<int, float>* stackPosMap;
//maps for big blocks with 3stacks up to 3 blocks
235  std::map<int, float> heightMapBig = {
        {1, 0.04},
        {2, 0.085},
        {3, 0.13},
    };
std::map<int, float> stackPosMapBig = {
        {1, -0.1},
        {2, 0.0},
        {3, 0.1},
    };
//maps for small blocks with 5 stacks, up to 5 blocks
240  std::map<int, float> heightMapSmall = {
        {1, 0.035},

```

```

250     {2, 0.055},
251     {3, 0.075},
252     {4, 0.115},
253     {5, 0.15},
254 };
255 std::map<int, float> stackPosMapSmall = {
256     {1, -0.14},
257     {2, -0.07},
258     {3, 0.0},
259     {4, 0.07},
260     {5, 0.14},
261 };
262 };
263
264 int main(int argc, char **argv) {
265     rclcpp::init(argc, argv);
266     auto node = std::make_shared<MoveGripperAction>();

267     node->set_parameter(rclcpp::Parameter("action_name", "move-gripper"));
268     node->trigger_transition(lifecycle_msgs::msg::Transition::TRANSITION_CONFIGURE);

269     rclcpp::spin(node->get_node_base_interface());
270
271     rclcpp::shutdown();
272
273     return 0;
274 }
```

A.3 Control Gripper Action Node

```

//  

// Created by fabian on 29.10.21.  

//  

5 #include <memory>  

#include <algorithm>

#include "plansys2_executor/ActionExecutorClient.hpp"

10 #include "rclcpp/rclcpp.hpp"
#include "rclcpp_action/rclcpp_action.hpp"
#include "open_manipulator_msgs/srv/set_joint_position.hpp"

using namespace std::chrono_literals;

15 class GripperControlAction : public plansys2::ActionExecutorClient
{
public:
```

```

GripperControlAction(std::string name, bool isOpener)
20    : plansys2::ActionExecutorClient(name, 500ms)
{
    nodeName = name;
    toolTargetValue = isOpener ? OPENING_VALUE : CLOSING_VALUE;
    isStarted = false;
    toolClient = this->create_client<open_manipulator_msgs::srv::
25 SetJointPosition>("goal_tool_control");
    while (!toolClient->wait_for_service(1s)) {
        if (!rclcpp::ok()) {
            RCLCPP_ERROR(rclcpp::get_logger("rclcpp"), "Interrupted
while waiting for the service. Exiting.");
        }
        RCLCPP_INFO(rclcpp::get_logger("rclcpp"), "service not available
30 , waiting again...");
    }
}
private:
void do_work()
35 {
    if (!isStarted) {
        //create and send request for first call
        isStarted = true;
        auto request = std::make_shared<open_manipulator_msgs::srv::
SetJointPosition::Request>();
40        request->path_time = 0.5;
        request->joint_position.joint_name.push_back("gripper");
        request->joint_position.position.push_back(toolTargetValue);
        auto result = toolClient->async_send_request(request);
        send_feedback(isStarted, + "running");
        std::cout << nodeName << "... [started]" << std::endl;
45    } else {
        //finish the execution on 2nd call
        finish(true, 1.0, "grab completed");
    }
    isStarted = false;
    std::cout << nodeName << "... [finished]" << std::endl;
}
}

55 std::string nodeName;
float toolTargetValue;
const float OPENING_VALUE = 0.01;
const float CLOSING_VALUE = -0.01;
bool isStarted;
60 rclcpp::Client<open_manipulator_msgs::srv::SetJointPosition>::SharedPtr
toolClient;
};

int main(int argc, char ** argv)
{

```

```

65 rclcpp::init(argc, argv);
rclcpp::executors::MultiThreadedExecutor exe(rclcpp::executor::ExecutorArgs(), 8);

auto grabNode = std::make_shared<GripperControlAction>("grab", false);
auto unstackNode = std::make_shared<GripperControlAction>("unstack",
false);
70 auto placeNode = std::make_shared<GripperControlAction>("place", true);
auto stackNode = std::make_shared<GripperControlAction>("stack", true);

grabNode->set_parameter(rclcpp::Parameter("action_name", "grab"));
grabNode->trigger_transition(lifecycle_msgs::msg::Transition::
TRANSITION_CONFIGURE);

75 unstackNode->set_parameter(rclcpp::Parameter("action_name", "unstack"));
unstackNode->trigger_transition(lifecycle_msgs::msg::Transition::
TRANSITION_CONFIGURE);

placeNode->set_parameter(rclcpp::Parameter("action_name", "place"));
80 placeNode->trigger_transition(lifecycle_msgs::msg::Transition::
TRANSITION_CONFIGURE);

stackNode->set_parameter(rclcpp::Parameter("action_name", "stack"));
stackNode->trigger_transition(lifecycle_msgs::msg::Transition::
TRANSITION_CONFIGURE);

85 exe.add_node(grabNode->get_node_base_interface());
exe.add_node(unstackNode->get_node_base_interface());
exe.add_node(placeNode->get_node_base_interface());
exe.add_node(stackNode->get_node_base_interface());

90 exe.spin();

rclcpp::shutdown();

95 return 0;
}

```