

Don't code and drive

Abschlussarbeit Projektseminar Echtzeitsysteme

Proseminar eingereicht von

Josef Kinold, Dennis Kraus, Garwin Lechner, Blandine Riviere, Robin Scheich

am 2. April 2018



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Fachgebiet Echtzeitsysteme

Elektrotechnik und
Informationstechnik (FB18)

Zweitmitglied Informatik (FB20)

Prof. Dr. rer. nat. A. Schürr
Merckstraße 25
64283 Darmstadt

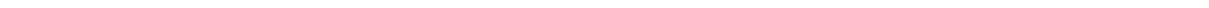
www.es.tu-darmstadt.de

Gutachter: Geza Kulcsar

Betreuer: **Geza Kulcsar**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Trajektorienplanung	2
2.1	Modellbildung	2
2.2	PD Regler	3
2.3	Lokalisierung	5
2.3.1	Odometrie	5
2.3.2	AMCL	6
2.4	SLAM	7
2.5	Implementierung und Umsetzung	7
2.5.1	Navigation Stack	7
2.5.2	Base Controller	12
2.6	Ergebnisse und Probleme	13
3	Personenverfolgung	14
3.1	Modulbeschreibung	14
3.1.1	Detektion	14
3.1.2	Tracking	14
3.1.3	Clustering	14
3.1.4	Controller	14
3.2	Implementierung und Umsetzung	15
3.3	Ergebnisse und Probleme	15
4	Fazit und Ausblick	16
A	Anhang	19
A.1	Launch und Config Dateien des Navigation Stack	19



1 Einleitung

Im Projektseminar Echtzeitsysteme werden die Teilnehmer in Gruppen á 5 Leute aufgeteilt. Jede Gruppe bekommt ein Modellfahrzeug, welches mit Sensorik und Aktorik so ausgestattet ist, dass das Fahrzeug autonom fahren kann.

Das Ziel der Veranstaltung ist es, mithilfe des Autos drei verschiedene Aufgaben zu lösen. Die erste Aufgabe wurde dabei vom Veranstalter vorgegeben, die beiden anderen durften die Teams selbst auswählen.

Die vorgegebene Aufgabe war es, einen Rundkurs ohne Hindernisse entlang einer Wand absolvieren zu können. Wir haben dazu zwei verschiedene Lösungen entwickelt, die beide im Kapitel Trajektorienplanung beschrieben werden (siehe Kapitel 2).

Als zweite Aufgabe haben wir einen Rundkurs mit Hindernissen ausgewählt. Dieser sollte sich nur anhand der Hindernisse vom ersten Rundkurs unterscheiden, deshalb haben wir für beide Aufgaben den Navigation Stack verwendet (siehe Kapitel 2.5.1).

Unser drittes Ziel war es, eine Personenverfolgung zu implementieren (siehe Kapitel 3). Diese soll eine Person mithilfe des Kamerabildes detektieren und sie anschließend verfolgen, sobald sie sich bewegt.

Dieses Dokument beschreibt unsere Lösungen, unsere Probleme während der Umsetzung und unser Fazit. Zudem gibt es einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen für die jeweiligen Aufgabenstellungen.

2 Trajektorienplanung

Das Auto hat vorne sowie hinten jeweils zwei Räder, die durch einen Elektromotor ansteuerbar sind. Die Lenkung der Vorderachse ist durch einen Servomotor realisiert. Das Fahrzeug ist vorne und an den Seiten mit Ultraschallsensoren zur Abstandmessung ausgestattet und besitzt eine nach vorne ausgerichtete Kinect2 Kamera, die sowohl Farb- als auch Tiefenbild liefert. Für die Bestimmung der Orientierung des Fahrzeugs sind verschiedene Sensoren verbaut.

Um einen Rundkurs mit oder ohne Hindernissen zu bewältigen, muss man die gegebenen Werkzeuge nutzen und entsprechend kombinieren um das Ziel zu erreichen. Die beiden Ansätzen über einen PD-Abstandregler (vergleiche Abschnitt 2.2) und über eine Trajektorienplanung (vergleiche Abschnitt 2.5) werden im Folgenden vorgestellt.

2.1 Modellbildung

Um eine Beziehung zwischen physikalischer Größe für Geschwindigkeit und Lenkwinkel und der entsprechenden Stellgröße zu herzustellen, wird jeweils ein Modell benötigt.

Geschwindigkeitsmodell

Die Daten aus Abbildung 2.1 wurden bei einer Messfahrt mit Hilfe eines rosbag aufgezeichnet und im Anschluss mit dem Tool plotjuggler ausgewertet. Dazu wurde das Fahrzeug mit Geschwindigkeitsstellgrößen im Intervall von -500 bis 1000 angesteuert und die jeweilige Geschwindigkeit aus der Odometrie ausgelesen. Auffällig ist der Sprung am Achsenursprung, der dadurch entsteht, dass das Fahrzeug eine bestimmte Stellgröße benötigt, um seine Trägheit zu überwinden. Die gemessenen Daten lassen sich durch zwei Gerade approximieren:

$$f(x) = \begin{cases} 439.8038 \cdot x + 116.136943 & \text{für } x < 0 \\ 0 & \text{für } x = 0 \\ 477.518514 \cdot x - 104.623299 & \text{für } x > 0 \end{cases}$$

Lenkwinkelmodell

Die Bestimmung des Lenkwinkelmodells (Abbildung 2.2) erfolgte nach dem Schema:

- Auto anheben und Stellgröße für den Lenkwinkel auf 0 setzen
- Mit Geschwindigkeit 300 kurz geradeaus fahren und dann Lenkwinkel einstellen
- Geschwindigkeit auf 0 setzen und den Lenkwinkel mit einem Geodreieck messen

Dazu war das Paket `rqt_reconfigure` sehr hilfreich. Die gemessenen Daten wurden im Anschluss durch das Polynom sechsten Grades

$196814 \cdot x^6 - 50518 \cdot x^5 - 47550 \cdot x^4 + 5979.7 \cdot x^3 + 2459.5 \cdot x^2 - 2442.1 \cdot x + 143.78$ approximiert. Auffällig ist die Verschiebung auf der y-Achse, die durch Offset in der Lenkung entsteht. Es sei angemerkt, dass die Messungen mit Fehlern behaftet waren und somit eine ungenaues Lenkwinkelmodell entstanden ist. Genauere Ergebnisse könnte man mit Verwendung der Odometrie bei einer Fahrt im Kreis erzielen.

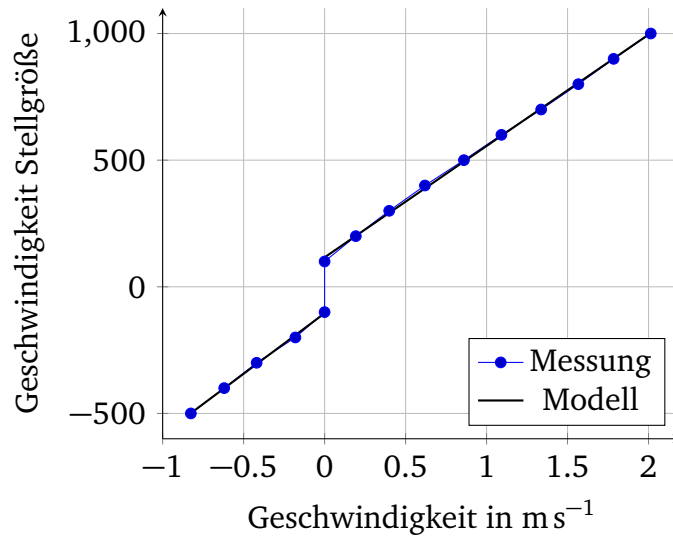


Abbildung 2.1: Messung und Geschwindigkeitsmodell.

2.2 PD Regler

Ein einfacher Ansatz für den Rundkurs ohne Hindernisse ist die Abstandregelung mit Hilfe der Ultraschallsensoren und einem PID Regler. Die zu regelnde Größe ist der Abstand zur Wand, als Stellgröße dient der Lenkwinkel. Dazu kann entweder die Stellgröße für den Lenkwinkel geregelt werden oder der Lenkwinkel selbst und dann auf die Stellgröße mit dem Lenkwinkelmodell umgerechnet werden. Die Reglerauslegung ist sowohl per Simulation in Simulink als auch experimentell durchgeführt worden. Die Simulation beruht auf dem Ackermann-Modell, einem Einspurmodell für Fahrzeuge. Es lautet

$$\dot{\varphi}_K = \frac{v}{l} \cdot \tan \varphi_L$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin \varphi_K + v \cdot \frac{l_H}{l} \cdot \cos \varphi_K \cdot \tan \varphi_L.$$

Durch Linearisierung erhält man

$$\dot{\varphi}_K = \frac{v}{l} \cdot \varphi_L$$

$$\dot{y} = v \cdot \varphi_K + v \cdot \frac{l_H}{l} \cdot \varphi_L.$$

Dabei ist φ_K der Kurswinkel, φ_L der Lenkwinkel, v die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, l der Achsabstand, l_H der Abstand von der Hinterachse zu einem Referenzpunkt und y der Abstand zur Wand. Mit beiden Systemen wurde in Simulink eine PD-Reglerauslegung durchgeführt. Es wurden diskrete Systeme betrachtet (vergleiche Abbildung 2.3), die Geschwindigkeit war $0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Der simulierte Verlauf der Sprungantwort ist in Abbildung 4(a) dargestellt, der Stellgrößenverlauf in Abbildung 4(b).

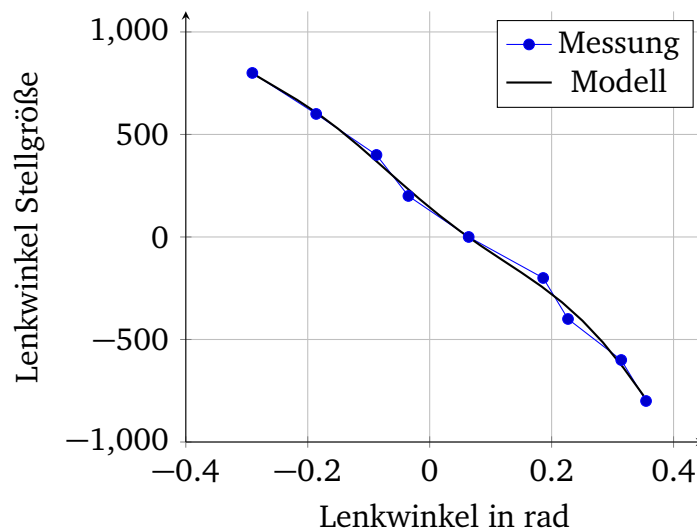


Abbildung 2.2: Messung und Lenkwinkelmodell.

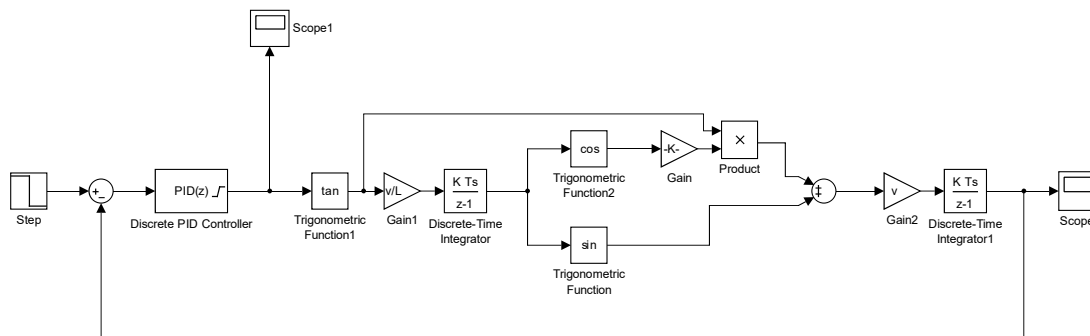


Abbildung 2.3: Diskreter Regelkreis mit nicht linearisierten Ackermann-Modell.

Mit den gefundenen Parametern konnten keine guten Ergebnisse erzielt werden, der Fahrzeug hat den gewünschten Abstand zur Wand nicht eingehalten und ist stark geschwungen. Das ist auf die Annäherung über das Ackermann-Modell und den betrachteten Abstand zu Wand zurückzuführen. Angenommen wird der Abstand senkrecht zur Wand, der in Wirklichkeit vom Fahrzeug gemessene ist bei schrägem Stand jedoch größer. Die Parameter wurden manuell modifiziert und ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt (vergleiche Tabelle 2.1).

	K_p	K_d
Simulink	10	3
Experimentell	0.48	1.5

Tabelle 2.1: Werte für PD Regler aus Simulation und experimenteller Bestimmung.

Da die Ergebnisse nicht zufriedenstellend und die Lösung für den Rundkurs mit Hindernis nicht praktikabel ist, wurde dieser Ansatz verworfen und am Navigation Stack gearbeitet.

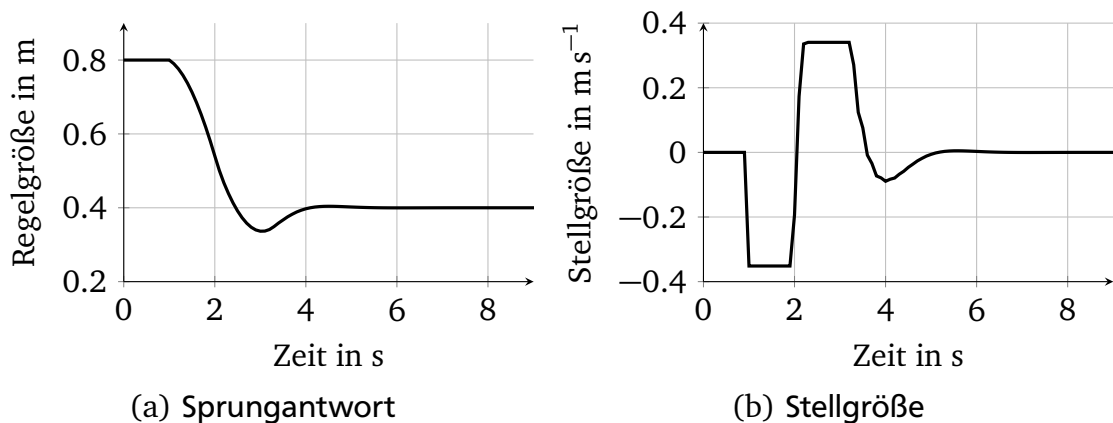


Abbildung 2.4: Simulierte Verläufe des Systems mit $K_p = 10$ und $K_d = 3$.

2.3 Lokalisierung

Die Trajektorienplanung des Roboters erfolgt anhand seiner Umgebungskarte, die mit den Sensordaten regelmäßig aktualisiert wird. Damit eine gute Trajektorie berechnet werden kann, muss das Auto in der Lage sein, sich zuverlässig in der Karte ~~sich~~ zu lokalisieren. Dies erfordert unter anderem eine verlässliche Odometrie, die im Abschnitt 2.3.1 vorgestellt wird. Um die Position des Autos in der Karte genauer zu schätzen, wurde außerdem das AMCL-Paket verwendet, wie im Abschnitt 2.3.2 beschrieben wird.

2.3.1 Odometrie

Auf dem Fahrzeug befinden sich ein Drei-Achs-Geschwindigkeitssensor und ein Drei-Achs-Gyroskop, welche etwa alle **5ms** neue Werte zur Verfügung stellen. Diese werden im vorhandenen **Odometriepaket** genutzt um eine Position und die Ausrichtung des Fahrzeugs anzugeben. Durch das Rauschen der Sensoren unterscheidet sich die tatsächliche Position nach einiger Zeit von der angegebenen Fahrzeugposition. Die **IMU** wird im Odometriepaket zwar zu Beginn kalibriert, dies bedeutet jedoch nur, dass ein festgelegter, im Stand gemittelter Rauschwert berücksichtigt und von den IMU Daten subtrahiert wird.

Die Verwendung eines Extended Kalmanfilters (EKF) erlaubt es ~~uns~~, verschiedene Sensoren als Eingangsgrößen für die Schätzung der Fahrzeugposition und der Ausrichtung zu verwenden. Der EKF berechnet aus dem aktuellen Zustand anhand eines nicht-linearen Zustandsübergangsmodells eine Abschätzung für den nächsten Fahrzeugzustand. Durch die Verwendung mehrerer Sensoren kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Sensoren mithilfe einer Gewichtung der Eingangsgrößen des EKF berücksichtigt werden. Die Zustandsschätzung wird mit der nächsten Messung verglichen und die Gewichtung der Sensoren dynamisch angepasst.

Wir haben uns für das **Robot_localization** Paket entschieden. Dies enthält einen EKF, **der** es ermöglicht die Sensoren modular einzubinden und **Sensorspezifisch** zu entscheiden, welche Daten weiterverarbeitet werden sollen. Das Paket kann vier verschiedene Topic-Typen verarbeiten:

`nav_msgs/Odometry` enthält Positions- und Ausrichtungsdaten

`geometry_msgs/PoseWithCovarianceStamped` enthält Positionsdaten

`geometry_msgs/TwistWithCovarianceStamped` enthält Ausrichtungsdaten

`sensor_msgs/IMU` enthält die Rohdaten aus der Inertialen Messeinheit (IMU)

Um die Schätzung zu vereinfachen, **nehmen wir an**, dass sich **unser** Fahrzeug nur im zweidimensionalen Raum befindet und ~~sich~~ nur in X-Richtung fortbewegen kann. Z-Koordinate, **Roll und Pitch** sind daher konstant Null. Die Beschleunigung in Y-Richtung wird als Eingangsgröße **ignoriert**.

Das **Robot_localization** Paket ermöglicht es ~~uns~~, die Kamera in Verbindung mit AMCL, **den** Hall-Sensor und **die** IMU als Eingangsgrößen für **den** EKF zu verwenden. Aus Zeitgründen haben wir **den** EKF nicht fertig eingestellt, stattdessen verwenden wir für die Lokalisierung die Odometriedaten in Verbindung mit AMCL, wie im ~~folgenden~~ Abschnitt 2.3.2 beschrieben wird. Dies liefert uns eine ausreichend genaue Fahrzeugposition und Ausrichtung.

2.3.2 AMCL

Zur Lokalisierung des Autos wird das von ROS bereitgestellte AMCL-Paket verwendet. Dieses Paket implementiert den probabilistischen *Adaptive Monte Carlo Localization* - Algorithmus und ermöglicht dadurch die 2D-Lokalisierung von Robotern in einer vorgegebenen Karte. Die Daten aus dem Laserscan werden auf die Karte projiziert, woraus die wahrscheinlichsten Position und Ausrichtung des Fahrzeugs bestimmt werden.

Zu diesem Zweck benötigt es mehrere Informationen, nämlich :

- einen Laserscan, der aus den Kameradaten erzeugt wird
- die Transformationen zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen des Roboters
- die initiale Position des Roboters, die in unserem Fall manuell durch Rviz übergeben wird
- die Karte, in der der Roboter sich orten soll

Diese Topics werden gleichermaßen vom Navigation Stack benötigt und werden deswegen im entsprechenden Kapitel (siehe 2.5) näher beschrieben.

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass AMCL eine explizite Transformation vom Laserscan-Frame (hier, `base_laser`) zum Odometrie-Frame (hier, `odom`) erfordert.

Das AMCL-Paket stellt ebenso eine ganze Menge von einstellbaren Optimierungsparametern bereit. Es ist zum Beispiel möglich das Odometriemodell (`omni` bzw. `diff` für Roboter mit omnidirektionalem bzw. Differentialantrieb) auszuwählen, sowie die entsprechenden Parametern einzustellen. Aus zeitlichen Gründen wurde jedoch eine im Navigation Stack bereits vorhandene Launchdatei für differentialgetriebene Fahrzeuge (`amcl_diff.launch`) verwendet.

2.4 SLAM

Die Abkürzung SLAM steht für *Simultaneous Localization And Mapping* und besteht für einen Roboter darin, gleichzeitig eine Karte seiner Umgebung zu erstellen bzw. zu verbessern und sich darin zu lokalisieren. In ROS stehen mehrere Pakete zur Verfügung, die SLAM implementieren, nämlich `gmapping` und `hector_slam`. Letztere hat den Vorteil, dass er keine Odometriedaten benötigt, und nur anhand des Laserscans die Karte bildet.

Um eine zuverlässige Karte aufzubauen sind allerdings folgende Punkte zu beachten. Erstens muss das Auto langsam und möglichst geradeaus (ohne Schwingungen) fahren, um zu vermeiden, Artefakten in die Karte einzubauen. Die Verwendung der vom Fachgebiet bereitgestellten Pakete `pses_dashboard` und `CarControl`-App kann sich beispielsweise zur Steuerung des Autos als nützlich erweisen. Falls `gmapping` benutzt wird, ist die Qualität der Karte und der Lokalisierung ebenso mit der Genauigkeit der Odometriedaten eng verbunden.

Das `hector_slam`-Paket wurde zum Aufbau einer Karte des Stocks des Fachgebiets verwendet. Da die Qualität der Karte jedoch nicht zufriedenstellend war, wurde zur Lokalisierung die von den Tutoren vorgelegte Karte verwendet.

2.5 Implementierung und Umsetzung

Die praktische Umsetzung besteht aus zwei Teilen. Zum einen dem Navigation Stack (siehe 2.5.1), der die aktuelle Position des Fahrzeugs mit den Umgebungsdaten verarbeitet und daraus eine Trajektorie plant. Zum anderen gibt es einen Knoten (siehe 2.5.2), der die geplante Geschwindigkeit und den Lenkwinkel aus dem Navigation Stack zu Stellgrößen umrechnet und am Fahrzeug setzt.

2.5.1 Navigation Stack

Der Navigation Stack ist ein Überbegriff für die Verbindung mehrerer Pakete. Aus den Odometrie- und Sensordaten wird eine Trajektorie zu einem vorher definierten Ziel geplant. Es werden Geschwindigkeits- und Lenkwinkeldaten ausgegeben, die den Roboter zu dem gegebenen Ziel führen.

Costmap

Für die Navigation wird eine Karte genutzt. Es wird unterschieden zwischen globaler und lokaler Costmap¹, zusätzlich liegen Informationen auf unterschiedlichen Schichten, sogenannten Layers.

- **Static Map Layer:** diese Schicht beinhaltet Kartendaten aus bereits gemappten Umgebungen, falls vorhanden. Sie sind Teil der globalen Costmap und bleiben während der gesamten Laufzeit bestehen.
- **Obstacle Map Layer:** diese Schicht enthält die Daten aus dem Laserscan, der mit dem Package `depthimage_to_laserscan` aus dem mit `pses_kinect_utilities` Median-gefilterten Tiefenbilder der Kinect2 Kamera erstellt wird. Hierin werden also lokale

¹ http://wiki.ros.org/costmap_2d

Hindernisse gespeichert und bei Bedarf wieder entfernt. Diese Schicht ist Teil der lokalen Costmap.

- Inflation Layer: diese Schicht definiert einen Bereich um jedes erkannte Hindernis und überlagert diesen mit einer Kostenfunktion (nah am Objekt hohe Bestrafung, weiter entfernt weniger Bestrafung). Die wichtigen Parameter sind `inflation_radius` (1 m) und `cost_scaling_factor` (0.7 / 5). Diese Schicht ist ebenfalls Teil der lokalen Costmap.

Globaler Planer

Anhand der Position des Roboters, der Costmap und des Zieles wird eine einfache Trajektorie geplant. Dabei wird weder die Dynamik des Roboters betrachtet noch der Mindestabstand zu Hindernissen eingehalten. Es wurde mit dem `navfn`² Planer gearbeitet.

Lokaler Planer

Ausgehend von dem globalen Pfad wird ein lokaler Pfad geplant, der auf Hindernisse reagiert und die Ausmaße und Dynamik des Roboters bei der Planung mit in Betracht zieht. Es wurde sich für den `TEB local planner`³ entschieden, da er auch für nicht holonome Fahrzeuge wie gut geeignet ist. Die Qualität der geplanten Trajektorie und des realen Fahrverhaltens wird maßgeblich von der Konfiguration der Parameter des Planers beeinflusst. Parameter mit sehr großem Einfluss sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

TF

Jeder veröffentlichte Topic wird mit einem Frame markiert. Um die Beziehung zwischen den dazugehörigen Koordinatensystemen herzustellen, kann das Package `TF`⁴ genutzt werden. Darin wird jeweils zwischen zwei Systemen eine Beziehung definieren und somit einen TF-Baum erstellen. Eine Transformation wird definiert durch

```
<node pkg="tf" type="static_transform_publisher" name="
  Select_a_name" args="x y z qx qy qz qw PARENT CHILD 20" />.
```

Der Baum setzt sich, wie in Tabelle 2.3 gezeigt, zusammen.

Debugging

Beim Einrichten des Navigation Stack treten hin und wieder Probleme und Fehler auf. Die Korrektheit des TF-Baum lässt sich mit `roslaunch rqt_tf_tree rqt_tf_tree` überprüfen. Die Informationen in einem Topic lassen sich mit `rostopic echo TOPIC` auslesen und Publisher sowie Subscriber mit `rostopic info TOPIC` ausgeben. Die Verbindungen zwischen laufenden Nodes wird mit `roslaunch rqt_graph rqt_graph` dargestellt.

Sobald die grundlegende Struktur funktioniert, hilft das grafische Programm `RViz`⁵ wei-

² <http://wiki.ros.org/navfn>

³ http://wiki.ros.org/teb_local_planner

⁴ http://wiki.ros.org/tf#static_transform_publisher

⁵ <http://wiki.ros.org/rviz>

Parameter	Wert	Auswirkung
dt_ref	0.5-0.75	Besseres folgen der Trajektorie, weniger Überspringen (sehr wichtig)
max_vel_x	0.8	Geschwindigkeitsbegrenzung vorwärts
max_vel_x_backwards	0.5	Geschwindigkeitsbegrenzung rückwärts
max_vel_y	0.0	Planer darf keine Geschwindigkeit in y-Richtung planen
acc_lim_y	0.0	Planer darf nicht in y-Richtung beschleunigen
max_vel_theta	3.1	Winkelgeschwindigkeit experimentell bestimmt für optimale Performance (gemessen ca. $1.1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$)
acc_lim_x	2	x-Beschleunigung experimentell bestimmt für optimale Performance (gemessen ca. $0.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)
acc_lim_theta	1.12	Winkelbeschleunigung gemessen
cmd_angle_instead_rotvel	True	Planer gibt Lenkwinkel und x-Geschwindigkeit aus (für nicht holonome Roboter)
enable_homotopy_class_planning	False	Schnellere Planung, da nicht mehrere Möglichkeiten betrachtet werden

Tabelle 2.2: Parameter mit hohem Einfluss auf die Performance des TEB local planner.

ter. Ob die Transformationen zwischen den Koordinatensystemen korrekt sind lässt sich damit überprüfen. Außerdem lässt sich damit die globale Karte, Costmap und der Lascan darstellen und auf Korrektheit prüfen. Zusätzlich ist die Position und der Footprint (digitale Repräsentation des Fahrzeugs) virtualisierbar, die sich beim fahren auch verschieben. Dabei ist zu bemerken, dass sich die dargestellte Position des Fahrzeugs nur verschiebt, wenn der Motor angesteuert wird, beim Drehen des Hallsensors ohne Ansteuerung wird vom `pses_odometrie` Package keine Positionsänderung gepublisht. Sobald die Karte und Position des Fahrzeugs korrekt wiedergegeben werden, ist es sinnvoll in RViz über den Button `2D Nav Goal` ein Ziel zu setzen und die geplante Trajektorie ausgeben zu lassen.

Es sei angemerkt, dass ein positiver Wert für die Stellgröße des Lenkwinkels einen Einschlag nach rechts bedeutet, der TEB local planner allerdings mit positiven Werten einen Lenkeinschlag nach links meint.

Hilfreiche Tools

Für Testfahren ist es hilfreich das Fahrzeug und einen Laptop mit dem selben WLAN-Netzwerk zu verbinden und per SSH auf das System des Autos zuzugreifen. Dazu wird die IP-Adresse des Fahrzeugs benötigt (`ifconfig`) und die Verbindung vom Laptop zum Fahrzeug geschieht dann über `ssh user@IP`. Dafür ist es ratsam einen WLAN-Hotspot, beispielsweise über ein Handy, einzurichten.

Frame	Ursprung
map	map_server
odom	pses_odometry
base_footprint	pses_odometry
base_link	Navigation Stack
base_laser	Navigation Stack
camera_depth_frame	LaserScan

Tabelle 2.3: TF-Baum mit dem Ursprung oben.

Mit dem Tool `dynamic_reconfigure`⁶ lassen sich Parameter während der Laufzeit verändern. Wurde der Knoten entsprechend konfiguriert, wird der Parameter auf der per SSH verbundenen Konsole mit `roslaunch dynamic_reconfigure dynparam set NODE PARAMETER VALUE` geändert. Somit kann während einer Testfahrt an der Performance des Fahrzeugs gearbeitet werden, ohne an den Arbeitsplatz zurückkehren zu müssen. Eine weitere Möglichkeit zur Kontrolle über das Netzwerk bietet die Konfiguration verteilter Systeme⁷. Da ROS ohnehin über Netzwerkstandards kommuniziert, bietet es die Option Topics im Netzwerk zu verteilen. Das bedeutet, dass die Nodes auf dem Fahrzeug gestartet und die Topics auf einem Laptop, der im selben Netzwerk hängt, durch RViz visualisiert werden können. Dadurch kann während einer Testfahrt mit dem Navigation Stack die Karte und Trajektorie kontrolliert werden. Zudem ist es möglich Ziele zu setzen und die aktuelle Position des Fahrzeugs vorzugeben. Dies geschieht über den Button 2D Pose Estimate und dient dazu den Roboter in der Karte zu positionieren. Die Konfiguration auf dem Fahrzeug sowie dem Laptop folgt diesem Schema:

Auf Fahrzeug:

IP herausfinden (`ifconfig`)

In jedem Terminal, in dem ein Topic am Laptop braucht wird:

```
export ROS_IP=machine_ip_addr <- IP des Fahrzeugs
node/launch-file starten
```

Auf Laptop:

Terminal:

```
export ROS_MASTER_URI=http://172. . . :11311 <- IP Fahrzeug
IP herausfinden (ifconfig)
export ROS_IP=machine_ip_addr (Laptop IP)
rviz
```

Rundkurs mit und ohne Hindernissen

Die beiden Aufgaben Rundkurs ohne sowie mit Hindernissen sind vom Grundprinzip sehr ähnlich und werden beide mit dem Navigation Stack bewältigt. Die Planung des zu fahrenden Pfades bleibt gleich, nur einige Parameter für die Fahrt machen einen

⁶ http://wiki.ros.org/dynamic_reconfigure

⁷ <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/MultipleMachines>

Unterschied für die beiden Aufgaben. Die Dateien zum Starten und Konfigurieren des Navigation Stack befinden sich in Anhang A.1. Die sich für den Kurs mit und ohne Hindernissen unterscheidenden Parameter sind jeweils mit dem Kommentar `for obstacle` `parcour` vermerkt.

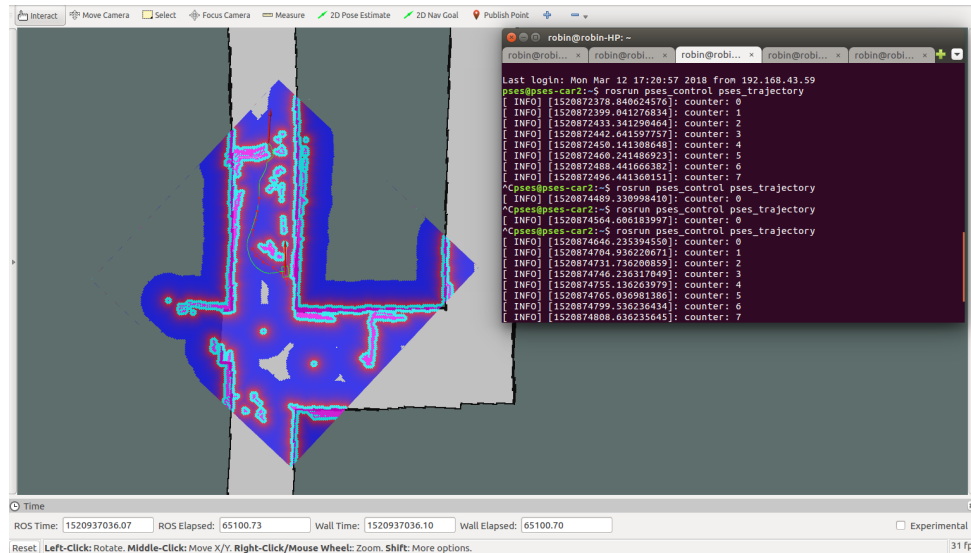


Abbildung 2.5: Ausschnitt aus rviz mit der Costmap, dem Footprint des Fahrzeugs und der Zielführung sowie das Terminal, in dem der Fahrknoten gestartet ist.

Probleme

Obwohl der Navigation Stack und hauptsächlich der TEB local planner insgesamt gut eingestellt sind, gibt es einige Probleme, die es in Zukunft zu lösen gibt.

- **Artefakte Laserscan:** Das Package `depthimage_to_laserscan` liest eine Zeile aus dem Tiefenbild, der mit Rauschen behaftet ist. Dadurch entstehen Artefakt-Punkte auf der Costmap, die der Planer als Hindernis erkennt, die allerdings nicht real sind. Obwohl das Tiefenbild bereits durch einen Medianfilter (Filtergröße 5) bearbeitet wird, tritt dieser Effekt immer noch auf. Ein Lösungsansatz wäre die Größe des Filters zu erhöhen, allerdings ist der verwendete Filter aus dem Package `pses_kinect_utilities` mit Größe 5 begrenzt. Ein weiterer Lösungsansatz wäre den Laserscan aus mehreren Zeilen des Tiefenbildes auszulesen und von jeder Spalte den maximalen Wert herauszuschreiben.
- **Recovery:** Da die lokale Costmap nicht nur die aktuellen Daten aus dem Laserscan beinhaltet, mit den alten Daten eine Karte zusammenbaut, können Artefakte mit in die Karte eingetragen werden. Passiert das häufiger an einer Stelle, kann es den Weg für den Trajektorienplaner versperren. Um diese falsch detektierten Punkte wieder loszuwerden, gibt es den Parameter `recovery_behaviors`, der verschiedene Szenarien zum Leeren des Costmap beinhaltet. Es gibt einige Parameter⁸, die den Zeitpunkt des Ausführens des Recovery

⁸ http://wiki.ros.org/move_base#Parameters

Programms beeinflussen, diese sollten eingestellt werden. Es sei angemerkt, dass der Parameter `clearing_rotation_allowed` auf `false` gesetzt sein sollte, da das Fahrzeug eine solche Bewegung nicht vollziehen kann.

- **Rückwärts fahren:** Sobald das Fahrzeug nah an einem Hindernis fährt, kommt es in einen Bereich in dem der Wert der Straffunktion hoch ist. Das bedeutet, dass das Fahrzeug sich in diesem Bereich nur langsam bewegen darf. Es hat sich gezeigt, dass in diesem Fall der TEB local planner nur noch vereinzelt Geschwindigkeitswerte ausgegeben hat und im Hindernis stecken geblieben ist.
Der Navigation Stack sollte entsprechend eingestellt werden, dass dieser in solchen Situationen rückwärts fährt und sich somit Platz verschafft, um am Hindernis vorbei zu fahren.
- **AMCL Fehldetektion:** AMCL dient dazu sich besser in einer Karte zu orientieren, indem es den Laserscan auf die Karte projiziert und damit die aktuelle Position bestimmt. Während der Testfahrten kam es gelegentlich vor, dass AMCL in einer Kurve die hintere Wand auf die vordere Wand gemapt hat und somit den Weg verschlossen hat.
Das Verhalten ist abhängig von der Qualität der Fahrt und sollte untersucht werden. AMCL⁹ bringt selbst Parameter mit, die zum Verbessern dieses Verhaltens beitragen könnten.

2.5.2 Base Controller

Das Fahrzeug wird tatsächlich von einem Knoten gesteuert, dessen Aufgabe darin besteht, die Stellgrößen für den Motor und die Lenkung zu berechnen und die verschiedenen Ziele für den Rundkurs zu setzen.

Modelle

Da die Lenkwinkel- und Geschwindigkeitsbefehle aus dem Navigation Stack in m/s und in rad gepublished werden, müssen sie zu Stellgrößen umgerechnet werden. Hierfür werden die im Abschnitt 2.1 beschriebenen Geschwindigkeits- und Lenkwinkelmodelle genutzt. Diese Stellgrößen werden dann als Topics für die `uc_bridge` gepublished.

Zielsetzung

Damit eine Trajektorie geplant wird, muss dem Navigation Stack ein Ziel übergeben werden. Es bestehen mehrere Möglichkeiten dafür. Entweder gibt man ein Ziel manuell in `rviz` über, oder man publisht ein Ziel direkt in dem Topic `/move_base_simple/goal`. Um den Rundkurs zu fahren, wurden mehrere Ziele entlang der Strecke gesetzt, wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Mithilfe eines Zählers wird jedes Ziel automatisch aktiviert, sobald das Fahrzeug sich ausreichend dem vorherigen Ziel genähert hat, d.h. in einer Entfernung kleiner als 1,5m.

⁹ <http://wiki.ros.org/amcl>

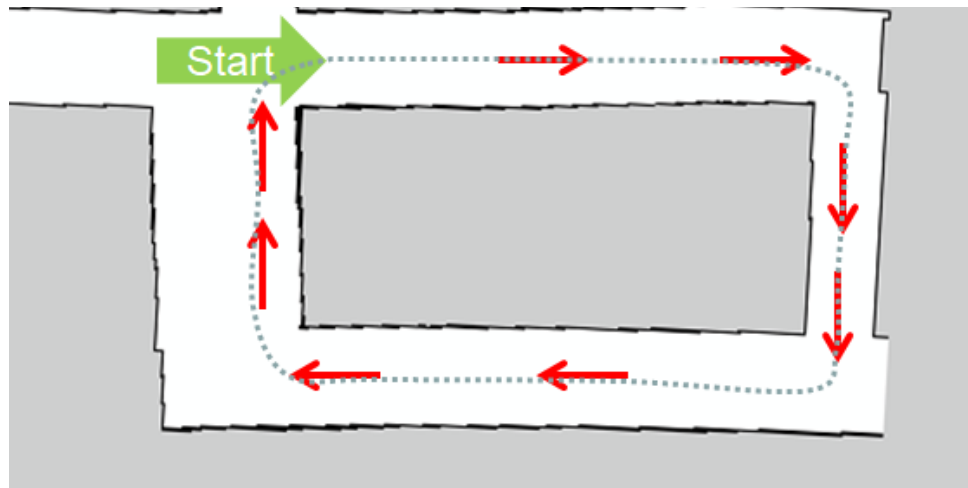


Abbildung 2.6: Aufeinanderfolgenden Ziele entlang des Parcours

Recovery Behavior

Wie bereits im Kapitel 2.5.1 (siehe Probleme) erwähnt, ist es möglich, dass der lokale Planer aufgrund der Präsenz von Artefakten in der Costmap keine vernünftige Trajektorie berechnen kann. Das Auto fährt dann abwechselnd rück- und vorwärts, ohne einen Ausweg zu finden. Um dieses Problem zu beheben, wurde ein eigenes *Recovery Behavior* implementiert, das dieses problematische Verhalten erkennen und das Obstacle Layer in der Costmap leeren soll.

Diese Implementierung hat jedoch nicht völlig funktioniert, da das richtige Layer beim Leeren der Costmap nicht gefunden werden konnte. Aus Zeitmangel konnte dieser Fehler nicht behoben werden.

2.6 Ergebnisse und Probleme

Wie im Kapitel 2.3.1 bereits erwähnt, haben wir den Extended Kalmanfilter nicht fertig eingestellt. Der implementierte EKF benutzt die IMU-Daten und die Geschwindigkeit, welche durch den Hall-Sensor berechnet wird. Obwohl wir die Y-Geschwindigkeit des Fahrzeugs nicht als Eingabegröße für unseren EKF verwenden und nur die Steuerung der X-Geschwindigkeit und Yaw-Rate zugelassen sind, bewegt sich unser Auto in den gefilterten Odometriedaten des EKF seitwärts. Das Einstellen der maximalen Be- und Entschleunigungswerte des Fahrzeugs hat zwar zur Verbesserung der Abschätzung beigetragen, das Problem der seitlichen Bewegung jedoch nicht behoben.

3 Personenverfolgung

3.1 Modulbeschreibung

3.1.1 Detektion

3.1.2 Tracking

3.1.3 Clustering

3.1.4 Controller

Die jetzt bekannten Koordinaten $\vec{p} = [p_x, p_y, p_z]^T$ der Person sind aus mehrfachen Gründen als finales Ziel ungeeignet. Zum einen ist eine Erkennung der Person schwierig, wenn das Auto so nah an diese heranfährt. Zum anderen fährt das Auto bei stationärer Ausregelung stets die Person an. Daher ergibt sich das finale Ziel bzw. die Führungsgröße aus einer radialen Verschiebung der Personenkoordinaten in Richtung der Kamera mittels des Strahlensatzes zu

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \cdot (1 - d_p/d_{euc}) \\ p_y \\ p_z \cdot (1 - d_p/d_{euc}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

mit $d_{euc} = \sqrt{p_x^2 + p_z^2}$ und d_p als beliebiger Abstand zur Person. Wir legen $d_p = 2.0$ fest, allerdings bietet es sich an, diesen variabel zu gestalten, um zum Beispiel Fahrten um Ecken in schmalen Gängen zu verbessern. Bei diesem großen Abstand kann es durchaus vorkommen, dass solche Szenarien nicht bewältigt werden können.

Eine Anfahrt dieser Zielkoordinate \vec{w} ist auf zwei Varianten möglich. Die einfachste und ressourcenschonendste ist die Regelung mithilfe eines konventionellen Reglers. Mit der Wahl eines PD-Reglers entspricht diese Variante der von uns genutzten. Dabei muss zum einen der Lenkwinkel mit

$$\delta = K_{P,\delta} \cdot w_x(t) + K_{D,\delta} \frac{w_x(t) - w_x(t-1)}{dt} \quad (2)$$

berechnet werden, um die x -Koordinate anzufahren. Zum anderen muss mit

$$v = K_{P,v} \cdot w_z(t) + K_{D,v} \frac{w_z(t) - w_z(t-1)}{dt} \quad (3)$$

die Geschwindigkeit berechnet werden, um mit einem flüssigen Fahrverhalten die z -Koordinate zu erreichen. Dabei entsprechen $K_{P,\delta}$ und $K_{D,\delta}$ bzw. $K_{P,v}$ und $K_{D,v}$ den jeweiligen Verstärkungsfaktoren, t dem Abtastzeitpunkt und dt der Differenz beider Abtastzeitpunkte. Sofern stationäre Genauigkeit gewünscht ist, müssen die Regelgesetze um einen I-Anteil erweitert werden und eine Implementierung eines Anti-Windups sollte erfolgen.

Als zweite Variante ist die Kombination mit einem lokalen Mapper und Planer möglich. Hier kann der Navigation Stack aus Kapitel 2.3 bei gleichbleibender Konfiguration verwendet werden. Das Ziel \vec{w} wird stetig als ROS-Message PoseStamped gesendet, welche direkt als Zielvorgabe des Planers verwendet werden kann. Somit liegt ein dynamisches Ziel vor, das mit einer Erkennung von möglichen Hindernissen und einer Umgehung dieser angefahren wird. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass diese Variante sehr rechenintensiv ist und auf der aktuellen Hardwarekonfiguration des Autos nicht lauffähig ist.

3.2 Implementierung und Umsetzung

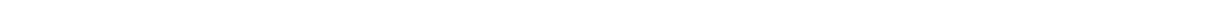
3.3 Ergebnisse und Probleme



4 Fazit und Ausblick



Literatur



A Anhang

A.1 Launch und Config Dateien des Navigation Stack

Listing A.1: launch/kai_configuration.launch

```
<launch>
  <!-- Transform between coordinate systems -->
  <node pkg="tf" type="static_transform_publisher" name="
    base_laser_broadcaster" args="0.08 0 0.115 0 0 0 1 base_link
    base_laser 20" />
  <node pkg="tf" type="static_transform_publisher" name="
    base_link_broadcaster" args="0 0 0 0 0 0 1 base_footprint
    base_link 20" />
  <node pkg="tf" type="static_transform_publisher" name="
    base_camera_depth_frame_broadcaster" args="0 0 0 0 0 0 1
    base_laser camera_depth_frame 20" />
  <include file="$(find kinect2_bridge)/launch/kinect2_bridge.
    launch"/>

  <!-- Start odometry node -->
  <node pkg="pses_odometry" type="odometry_node" name="
    odometry_node" output="screen">
  </node>
</launch>
```

Listing A.2: launch/move_base.launch

```
<launch>
  <master auto="start"/>

  <arg name="depth_image" default="/kinect_utilities/
    depth_image_filtered"/>

  <!-- Create LaserScan -->
  <node pkg="depthimage_to_laserscan" type="
    depthimage_to_laserscan" name="depthimage_to_laserscan"
    output="screen">
    <remap from="image" to="$(arg depth_image)"/>
  </node>

  <!-- Run the map server -->
  <arg name="pses_map" default="/home/pses/catkin_ws/src/
    pses_control/pses_navigation/map2.yaml"/>
  <node name="map_server" pkg="map_server" type="map_server" args
    ="$(arg pses_map)"/>

  <!-- Run AMCL -->
  <include file="$(find amcl)/examples/amcl_diff.launch" />
```

```

<!-- Start Navigation Stack -->
<node pkg="move_base" type="move_base" respawn="false" name="
  move_base" output="screen">
  <rosparam file="$(find pses_navigation)/cfg/
    costmap_common_params.yaml" command="load" ns="
    global_costmap" />
  # for obstacle parcoure costmap_common_params_obstacle.yaml
  <rosparam file="$(find pses_navigation)/cfg/
    costmap_common_params.yaml" command="load" ns="
    local_costmap" />
  # for obstacle parcoure costmap_common_params_obstacle.yaml
  <rosparam file="$(find pses_navigation)/cfg/
    local_costmap_params.yaml" command="load" />
  <rosparam file="$(find pses_navigation)/cfg/
    global_costmap_params.yaml" command="load" />
  <rosparam file="$(find pses_navigation)/cfg/
    base_local_planner_params.yaml" command="load" />
  # for obstacle base_local_planner_params_obstacle.yaml
  <rosparam file="$(find pses_navigation)/cfg/
    base_global_planner_params.yaml" command="load" />
  <param name="base_local_planner" value="teb_local_planner/
    TebLocalPlannerROS" />
  <param name="base_global_planner" value="navfn/NavfnROS" />
  <param name="controller_frequency" value="8.0"/>
  <rosparam param="recovery_behaviors"> [{name: "
    conservative_reset", type: "clear_costmap_recovery/
    ClearCostmapRecovery"}, {name: "aggressive_reset", type: "
    clear_costmap_recovery/ClearCostmapRecovery"}] </rosparam>
  <param name="planner_patience" value="5.0"/>
  <param name="clearing_rotation_allowed" value="false"/>
</node>

</launch>

```

Listing A.3: cfg/base_global_planner_params.yaml

```

NavfnROS:
  allow_unknown: true
  cost_factor: 0.55

```

Listing A.4: cfg/base_local_planner_params.yaml

```

TebLocalPlannerROS:

```

```

  odom_topic: odom
  map_frame: /map

```

```

# Trajectory

```

```
teb_autosize: True
dt_ref: 0.75 # 0.5 for obstacle parcour
dt_hysteresis: 0.1
global_plan_overwrite_orientation: True
max_global_plan_lookahead_dist: 3.5
feasibility_check_no_poses: 5

# Robot
max_vel_x: 0.8 # 0.5 for obstacle parcour
max_vel_x_backwards: 0.5
max_vel_y: 0.0
acc_lim_y: 0.0
max_vel_theta: 3.1
acc_lim_x: 2
acc_lim_theta: 1.12
footprint_model:
  type: "polygon"
  vertices: [ [-0.18, 0.105], [0.18, 0.105], [0.18,-0.105], [-0.18,
    -0.105] ] # for type "polygon"
min_turning_radius: 1.0
wheelbase: 0.25 # Wheelbase of our robot
cmd_angle_instead_rotvel: True # stage simulator takes the angle
  instead of the rotvel as input (twist message)

# GoalTolerance

xy_goal_tolerance: 0.3
yaw_goal_tolerance: 0.5
free_goal_vel: True

# Obstacles

min_obstacle_dist: 0.2
include_costmap_obstacles: True
costmap_obstacles_behind_robot_dist: 1.0
obstacle_poses_affected: 30
costmap_converter_plugin: ""
costmap_converter_spin_thread: True
costmap_converter_rate: 5

# Optimization

weight_max_vel_x: 2.0

# Homotopy Class Planner

enable_homotopy_class_planning: False
```

```
enable_multithreading: True
simple_exploration: False
max_number_classes: 3
roadmap_graph_no_samples: 15
roadmap_graph_area_width: 5
h_signature_prescaler: 0.5
h_signature_threshold: 0.1
obstacle_keypoint_offset: 0.1
obstacle_heading_threshold: 0.45
visualize_hc_graph: False
```

Listing A.5: `cfg/costmap_common_params.yaml`

```
obstacle_range: 5
raytrace_range: 5.5
footprint: [[-0.18, 0.105], [0.18, 0.105], [0.18, -0.105], [-0.18,
    -0.105]]
map_type: costmap

plugins:
  - {name: static_map, type: "costmap_2d::StaticLayer"}
  - {name: obstacles, type: "costmap_2d::VoxelLayer"}
  - {name: inflation_layer, type: "costmap_2d::InflationLayer"}

obstacles:
  combination_method: 1
  observation_sources: laser_scan_sensor
  laser_scan_sensor: {sensor_frame: base_laser, data_type:
    LaserScan, topic: /scan, marking: true, clearing: true}

inflation_layer:
  inflation_radius: 1.0
  cost_scaling_factor: 0.7 # 5 for obstacle parcou
```

Listing A.6: `cfg/global_costmap_params.yaml`

```
global_costmap:
  global_frame: /map
  robot_base_frame: base_link
  update_frequency: 5.0
  static_map: true
  transform_tolerance: 0.5

static_map:
  enable: true
  map_topic: map
```

Listing A.7: `cfg/local_common_params.yaml`

```
local_costmap:
```

```
global_frame: odom
robot_base_frame: base_link
update_frequency: 5.0
publish_frequency: 2.0
static_map: false
transform_tolerance: 0.2
rolling_window: true
width: 10.0
height: 10.0
resolution: 0.05
```