
Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keinem anderen Prüfungsamt vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Göteborg, den March 7, 2017

Julian-B. Scholle

Das autonome Fahren und die Vernetzung von Fahrzeugen mit Ihrer Umwelt sind zusammen mit der Elektromobilität die meistdiskutierten Themen der Automobilbranche. Zu Recht: Autonomes Fahren besitzt das Potenzial, im Mobilitätsmarkt völlig neue Strukturen entstehen zu lassen.

1.1 Motivation

Da die Technische Hochschule Chalmers ergänzend zu Volvos “DriveMe” Projekt das Projekt “CampusShuttle” initiiert, “CampusShuttle” ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt der Technischen Hochschule Chalmers und der Universität Göteborg.

Das Projekt ist dabei im ReVeRe (Chalmers Research Vehicle Resource) angesiedelt. Die Vision ist dabei ein selbstfahrendes Auto zwischen den beiden Campus der Technische Hochschule Chalmers.

Dabei soll, im Rahmen des Projekts, das Fahrzeug in verschiedenen Verkehrsszenarien untersucht werden. Der Fokus liegt dabei besonders auf den Stadtverkehr, das Fahrzeug muss dabei nicht nur in der Lage sein mit anderen Autos zu interagieren, sondern ebenfalls mit Straßenbahnen, Bussen, Fahrrädern und Fußgängern sicher agieren.

1.2 Research Question

2.1 Autonomous Driving

2.2 Roundabouts in Law

In Germany, there is no law stipulating the exact construction of roundabouts. Instead, the elements of the rural roads and city streets are dealt with in Directives for the Design of rural roads [RAL] and the Directives for the Design of Urban Roads [RASt]. These guidelines are also relevant to the choice of a convenient junction type when linking roads. The considerations discussed there are based on traffic variables, area-related characteristics, economic criteria and spatial planning or urban planning requirements. The guidelines also regulate the basic design and operational formation of roundabouts. The Directives for the Design of Urban Roads [RASt] are relevant for this dispute. Since the access the RASt ist limited, most of the information is coming from [5] whereupon RASt is based on.

2.2.1 Elements of a Roundabout

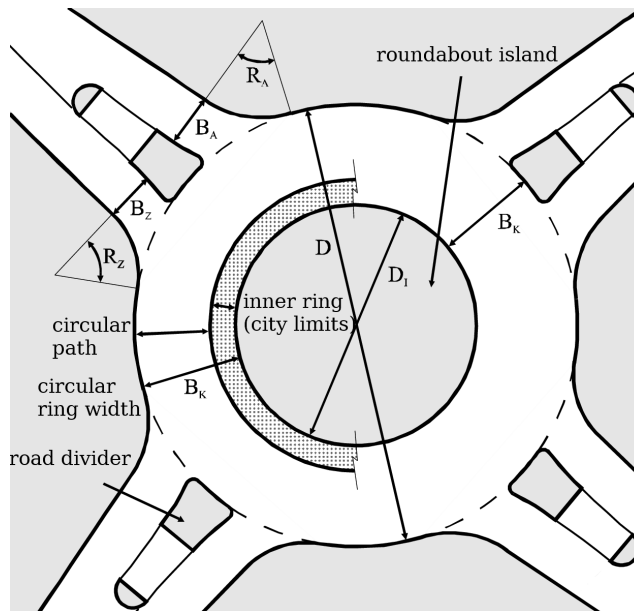
Definition 2.1 (roundabout island) *The roundabout island is the constructional area in the middle of the roundabout, which is surrounded by vehicles. For miniature roundabouts, the roundabout island is crossable. [5]*

Definition 2.2 (circular path) *The circular path is the road that serves to drive the roundabout island. An inner ring, if present, is not part of the circular path (VwV-StVO zu §9a V., Rn. 5). [5]*

Definition 2.3 (circular ring with (B_K)) *The structural width includes the circular track and a paved inner ring, if any. It is dependent on the outer diameter and the desired traffic routing (one or two lanes). The edge strip width is oriented on the relevant continuous roadway. [5]*

Definition 2.4 (outer diameter (D)) *The outer diameter is measured at the*

Figure 2.1: Definition of individual design elements and dimensions of a roundabout [5]



outer edge of the circular ring. It is the essential measure for describing the size of the roundabout. [5]

Definition 2.5 (inner diameter (D_1)) The inner diameter is the diameter of the roundabout island. [5]

Definition 2.6 (road divider) The road divider is the structurally designed island between the circular exit and circular driveway. It serves to separate the circular exit and circular driveway, the management of the traffic, as well as the pedestrians and cyclists as cross-bordering aid. [5]

Definition 2.7 (lane width of the circular driveway (B_Z) and circular exit (B_A)) The width of the circular driveway and exit is measured at the beginning of the corner. [5]

Definition 2.8 (Corner rounding radius (R_Z and R_A)) This is the radius of the rounding at the right edge of the road between the circular driveway and the circular path. For a elliptical arch with a radius sequence of three different radii, R_Z is the radius R_2 of the central arc. When the road edge is formed as a tractrix, R_Z is the smallest radius of the road edge. [5]

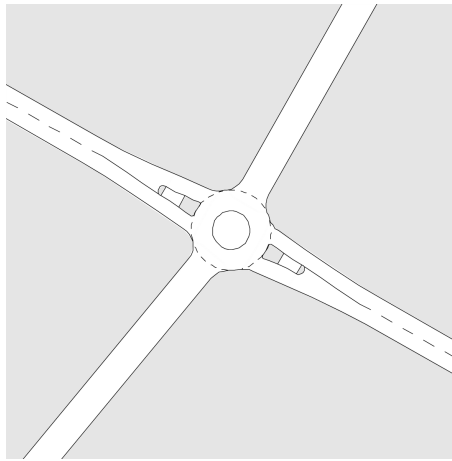
2.2.2 Types of Roundabouts

There are several types of roundabouts, which are differentiated by the different application criteria and the partly different design principles according to the situation inside and outside built areas. Furthermore, a division is made as a function of its size. [5]

Mini Roundabout

Within built-up areas, smaller outer diameters are possible under certain conditions. These roundabouts are called mini roundabout. The roundabout island must then be capable of being passed over. The outer diameter should be at least 13 m, so that the circular island does not become too small. Larger outer

Figure 2.2: Mini Roundabout [5]



diameters make driving easier. Outer diameters of more than 22m, however, do not offer any transport advantages. From an outside diameter of about 22 m, therefore, the installation of a small roundabout with 26 m is generally more convenient. Bypasses are generally not required in the areas where mini roundabout can be used.

Small Roundabout

Figure 2.3: Small Roundabout [5]



The small roundabout has a single lane circular path and single lane circular driveways and exits. The roundabout island is not passable. The outer diameter must be at least 26 m. Bypasses can be set up for driving geometric reasons or to increase performance.

Two-lane Passable Roundabout

If the capacity of the small roundabout is not sufficient and can not be ensured by the installation of bypasses, the circular path of a small roundabout can be designed to be two-lane driveable. At such a roundabout, the circular path is so wide that cars can travel side by side in a circle. If a further increase in the capacity is required, individual circular driveway can also be carried out in two lanes, if pedestrians and cyclists are not to be considered regularly. For safety reasons, circular exits are always carried out in single lanes. For geometrical reasons, the outer diameter must be at least 40 m for two-laned accessibility.

Figure 2.4: Two-lane Passable Roundabout [5]

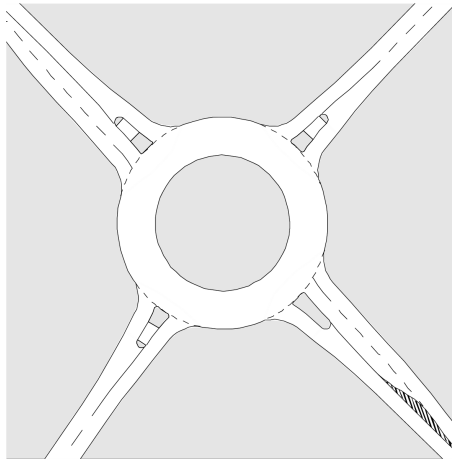
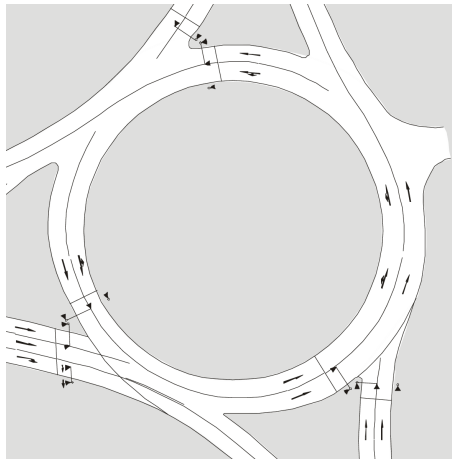


Figure 2.5: Large Roundabout [5]



Large Roundabout

Large Roundabouts with two or more lanes marked by markers on the circular path should be operated with a light signaling system only, if the nodal point design and traffic control are closely coordinated.

2.3 Middleware OpenDAVINCI

2.4 Hardware Platform

Gefragt wird hier nach den Kriterien dafür, welche Methode für eine bestimmte Art der Anwendung geeignet ist, warum eine bestimmte Methode angewandt werden muss oder angewendet wird und keine andere. Verständnisfragen zum methodischen Weg werden hier geklärt. Die Methodologie ist demnach eine Metawissenschaft und somit eine Teildisziplin der Wissenschaftstheorie. Demgegenüber bezeichnet Methodik das Methodenwissen des Praktikers oder des Wissenschaftlers.

3.1 Selection of Sensors

3.2 Selection of Algorithms

3.3 Simulation Environment

Klare, logische Gliederung

Möglichst ausgeglichene Kapitel (bezüglich Umfang und Zahl der Unterkapitel)

Gesamte Arbeit enthält so wenig Redundanz wie möglich

Ist auch innerhalb der einzelner Kapitel oder Abschnitte sinnvoll strukturiert

Kapitel und Unterkapitel beginnen stets mit einer ganz kurzen Einleitung (in der Regel 1-3 Sätze, die erklären, was im Folgenden zu erwarten ist)

Kurze, aussagekräftige Überschriften in einheitlichem Stil

Beschreibung von Konzepten. Technische Details, wie z.B. Quellcode, umfangreiche Auflistungen, ergänzende Abbildungen usw. kommen in den Anhang.

4.1 Object Detection

4.1.1 Ground Removal

Um in einer PointCloud Objekte zu erkennen ist es nötig, zu wissen, welche Messungen zu Boden und welche zu Objekten gehören. Es gibt viele Möglichkeiten dieses zu erreichen. Die Naivste Methode ist das Entfernen der Bodenplatte anhand ihrer Z-Koordinate. Diese Methode hat allerdings viele Nachteile, zum einen muss der LIDAR Sensor exakt gerade auf ein Fahrzeug angebracht werden, zum anderen muss das Fahrzeug ein sehr steifes Fahrwerk haben, um eventuelle Neigungen des Sensors zu verhindern. Weiterhin erlaubt dies ausschließlich die Entfernung von planaren Grundflächen, also flache nicht hügelige Untergründe. Eine weitere verbreitete Methode ist das Entfernen der Bodenplatte auf Basis eines statistischen Mittelwertes [7]. Diese Methode benötigt allerdings auch eine Kalibrierung der Sensorabstände zum Boden. Und die

Bestimmung weiterer Schwellwerte, welche umgebungsabhängig sind. Die Vorteile beider Methoden sind ihre geringe nötige Rechenleistung und Laufzeit $O(n)$. Bessere Methoden wie Gradientenbasierende Expansionsalgorithmen benötigen einen Startpunkt, der als Bodenplatte identifiziert werden kann. Eine weitere Möglichkeit ist die Beschreibung von Objekten als konvexe Objekte [4], die ebenfalls auf Basis der Gradienten beschrieben werden kann. Vorteil dieser Methode ist, dass keine initiale Position für die Bodenplatte benötigt wird.

Für unseren Anwendungsfall mit dem Velodyne VLP-16 besteht das Problem darin, dass die Auflösung des Sensors in der Höhe sehr gering ist. Abhängig von der Entfernung des Fahrzeuges innerhalb der benötigten Reichweite fallen nur zwei Lagen auf die Testfahrzeuge, weshalb Gradientenbasierende Methoden hier zuverlässig versagen. Da die Gradienten zu klein sind und die Verkeilerung der nötigen Thresholds zu häufigen falschen Positiven führt. Die Methode des statistischen Mittelwertes und die Methode auf Basis der Z-Koordinate, leider am Fahrwerk des Volvo XC90 SUV. Die Höhe des Fahrzeuges ändert sich außerdem durch Veränderung des Fahrprofils (Sport/Eco, etc.) um mehrere Zentimeter. Auch leicht erhöhte Geschwindigkeiten im Kreisverkehr (ca 30 km/h) führen zu einer deutlichen Seitenneigung des Fahrzeuges. Darum wird nun eine weitere Methode vorgeschlagen. Die Erkennung einer Grundfläche in den Messdaten.

Für die Erkennung des Bodens gehen wir von folgenden Annahmen aus, die Straße lässt sich approximativ als Ebene im R3 darstellen. Weiterhin ist die Grundfläche die niedrigste Fläche im Koordinatensystem. Daher wird im ersten Schritt der in Polarkoordinaten vorliegende Datensatz in mehrere Tortenstückförmige Segmente geteilt. Innerhalb dieser Tortenstücke wird dann eine Suche nach den 10 Messungen mit dem niedrigsten Z-Wert gesucht. Die Einteilung in Segmente ist deshalb nötig, um zu verhindern, dass alle Messwerte in ein einziges lokales Minimum laufen. Aus diesen vorgefilterten Messwerten werden nun für einen RANSAC drei zufällige, jedoch nicht in benachbarten Segmenten liegende Messwerte herausgesucht. Aus diesen drei Punkten wird nun eine Ebene in der Hesseschen Normalform gebildet, was eine effiziente Distanzberechnung zu anderen Punkten erlaubt. Danach sammeln wir alle weiteren Punkte aus unseren Minima, anhand eines Distanzkriteriums. Danach wird aus der Ebene und den neu gesammelten Punkten durch einen Planefitting Algorithmus [section 4.1.1] eine neue Ebene und deren Fehler berechnet. Der Fehler wird über die Summe der quadratischen Abstände aller Punkte zur Ebene berechnet.

Bevor wir die Ebene jedoch als eventueller Lösungskandidat hinzufügen wird geprüft, ob sich die Ebene innerhalb von einem plausiblen Parameterbereich befindet. Dazu zählt, dass die Entfernung der Ebene zwischen 1.9m und 2.2m bewegen sollte, dies entspricht in etwa der Montagehöhe des Velodyne-Sensors.

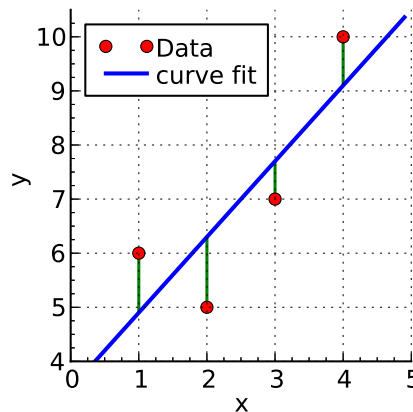
Die Anzahl an Iterationen des RANSAC ist auf 50 begrenzt. Nach dem Durchlauf des RANSAC werden alle Punkte in der Pointcloud anhand ihrer Distanz zur Ebene als Grundfläche markiert. Als Threshold wurde hier ein Wert von 0.5m genommen.

Planefitting

Zum Planefitting einer Ebene wird üblicherweise eine SVD (Singular Value Decomposition) genutzt. SVD hat eine Komplexität von $\mathcal{O}(\min\{mn^2, m^2n\})$ [2], da das Planefitting innerhalb des RANSAC's sehr häufig mit einer großen

Anzahl an Punkten ausgeführt wird, führt das Ausführen des SVD innerhalb des RANSAC zu einer sehr hohen Laufzeit. Deshalb wird an dieser Stelle ein "Linear least Squares (LLSQ)" Algorithmus mit einigen Optimierungen eingesetzt. Bei der Verwendung des LLSQ gilt es zu beachten, dass nicht der Abstand der Punkte zur Ebene optimiert wird, sondern der Abstand der Punkte zur Ebene entlang einer Achse (in unserem Fall der z-Achse) siehe fig. 4.1. Das kann zu Problemen führen, wenn die Punkte weit gestreut, also weit von der optimalen Ebene entfernt sind. Da wir unsere Punkte innerhalb des RANSAC allerdings anhand eines Distanzkriteriums vorselektieren, stellt dies kein Problem dar.

Figure 4.1: Linear least Squares (LLSQ) [6]



Die Darstellung einer Ebene in Koordinatenform sieht wie folgt aus: $a\vec{x} + b\vec{y} + c\vec{z} + d = 0$. Da wir eine Ebene im \mathbb{R}^3 betrachten, ist dieses Gleichungssystem überbestimmt. Da wir unsere Ebene in Richtung der z-Achse optimieren wollen, setzen wir Parameter c auf 1 und können unser Gleichungssystem nun einfach nach z auflösen: $a\vec{x} + b\vec{y} + d = -\vec{z}$. Die Vektoren $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ stellen dabei die zu fittenden Punkte dar. In Matrixschreibweise:

$$X\vec{\beta} = \vec{z}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z_0 \\ -z_1 \\ \vdots \\ -z_n \end{bmatrix}$$

Dieses System hat üblicherweise keine Lösung, unser eigentliches Ziel ist jedoch auch nicht exakte Lösungen für $\vec{\beta}$ zu finden, sondern eine gute Näherung $\hat{\beta}$ dafür:

$$\hat{\beta} = \min(\|\vec{z} - X\vec{\beta}\|^2)$$

Das können wir tun, indem wir unsere Gleichung mit der Transponierten unserer Punktmatrix X multiplizieren:

$$(X^T X)\hat{\beta} = X^T \vec{z}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_n \\ y_0 & y_1 & \dots & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_n \\ y_0 & y_1 & \dots & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -z_0 \\ -z_1 \\ \vdots \\ -z_n \end{bmatrix}$$

Dieses Gleichungssystem könne man nun mit der Berechnung der Inverse von $(X^T X)$ auflösen. Da die Berechnung von Inversematritzen mit $\mathcal{O}(n^3)$ ebenfalls aufwändig ist, nun ein weiterer Trick um rechenleistung zu sparen. Nach dem Multiplizieren der Transponierten erhalten wir:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i x_i & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i y_i & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{bmatrix}$$

Gut zu sehen sind hier die Summen in den Randbereichen der Matrix X und dem Vektor \vec{z} . Diese können wir auf Null setzten, wenn wir alle Punkte relativ zum Mittelwert-Punkt aller Punkte definieren, also $P_i = P_i - \bar{P}$. Nun erhalten wir:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i x_i & \sum x_i y_i & 0 \\ \sum y_i x_i & \sum y_i y_i & 0 \\ 0 & 0 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nun können wir d ebenfalls auf Null setzten, denn wenn alle unsere Punkte relativ zum Mittelwert-Punkt sind, dann läuft auch unsere Ebene immer durch diesen Punkt. Daher können wir nun eine komplette Dimension streichen:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i x_i & \sum x_i y_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \end{bmatrix}$$

Das Gleichungssystem können wir nun einfach mit der Cramer's rule lösen

$$\begin{aligned} D &= \sum x_i x_i \cdot \sum y_i y_i - \sum x_i y_i \cdot \sum x_i y_i \\ a &= \frac{\sum y_i z_i \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i z_i \cdot \sum y_i y_i}{D} \\ b &= \frac{\sum x_i y_i \cdot \sum x_i z_i - \sum x_i x_i \cdot \sum y_i z_i}{D} \\ \vec{n} &= [a, b, 1]^T \end{aligned}$$

Dabei gibt es zu beachten, dass die Determinante nicht Null oder nahe Null sein darf. Da der Winkel zwischen dem Fahrzeug und der Ebene jedoch immer nahe 90 Grad liegt, ist die Determinante typischerweise sehr groß. Sollte die Determinante doch nahe 0 (nicht gleich 0) sein, wird die Berechnung trotzdem durchgeführt, da dies auch zu einem großen Fehler im Fitting führt. Dies ist an dieser Stelle erwünscht, da der RANSAC ungeeignete Ebenen anhand des Fehlers aussortiert. Ist die Determinante exakt Null, wird die Berechnung stattdessen mit einem kleinen Wert für D fortgesetzt.

Aus dem Normalenvektor \vec{n} und dem Mittelwert-Punkt \bar{P} können wir nun wieder die Hessesche Normalenvektor bestimmen.

Letztendlich haben wir so den Algorithmus von $\mathcal{O}(m^2 n)$ auf $\mathcal{O}(n)$ runterbrechen können.

4.1.2 Clustering

In aktuellen Abreiten mit 3D-LIDAR Daten werden die Daten häufig als erstes in eine Heightmap projiziert [7, 1, 3]. Danach werden direkt benachbarte

Messungen mit ähnlichen Messwerten zusammengefasst. Alternativ werden die Messungen auch anhand eines Distanzkriteriums zusammengefasst. Erstere Methode hat den Nachteil, dass einzelne Ausreißer dazu führen, dass das Objekt in mehrere Cluster zerfällt. Letztere wird meist mit einem KD-Tree oder einer ähnlichen Datenstruktur kombiniert, welche typischerweise hohe Kosten für die Erstellung verursachen.

Hier wird eine Methode vorgeschlagen, welche die Vorteile beider Methoden kombiniert. Dazu ist es nötig zu wissen, wie die Daten von der OpenDAVINCI Middleware geliefert werden. Das OpenDAVINCI auf der Übertragung der Daten mit UDP Multicast setzt, werden die Daten in einer kompakten Form übertragen, welche in einen einzigen UDP Frame passt.

CompactPointCloud
startAzimuth : float endAzimuth : float entriesPerAzimuth : uint32 distances : bytes
getStartAzimuth : float ...

Dabei wird von einer konstanten Drehrate des Sensors ausgegangen, was in einer äquidistanten der Messwerte resultiert. Die Anzahl der Messungen pro Azimuth wird in entriesPerAzimuth festgehalten und entspricht für den Velodyne VLP16 16. Um nun an die eigentlichen Messwerte zu kommen müssen jeweils zwei distance Werte zu einem Unsigned 16Bit Integer umgewandelt werden, welcher dann die Messung in cm enthält. Jeweils 16 dieser Werte ergeben dann einen Messframe in dem der vertikale Winkel auf einen Bereich zwischen -15 und +15 abgebildet werden muss.

Die Zusammenfassung von Messwerten zu Objekten wird üblicherweise

4.1.3 Object Tracking

4.1.4 Classification

4.1.5 State Estimation

4.2 Mapping

4.2.1 OpenDAVINIC Map

4.2.2 Simplification

5

Evaluation

5.1 Simulation

5.2 Real Measurements

Kann in mehrere Unterkapitel gegliedert werden

Greift Thesen oder Fragestellungen aus der Einleitung wieder auf

Fasst die Arbeit knapp und prägnant zusammen

Ordnet die Ergebnisse in Gesamtzusammenhänge ein

Zieht Schlussfolgerungen aus den erarbeiteten Ergebnissen

Kann auch eigene Bewertungen oder Meinungen enthalten

Gibt einen Ausblick auf mögliche Konsequenzen oder notwendige weitere zu lösende Probleme

7

Future Work

Bibliography

- [1] M Himmelsbach, T Luettel, and H.-J. Wuensche. “Real-time object classification in 3D point clouds using point feature histograms”. In: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2009), pp. 994–1000. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354493. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5354493>.
- [2] M Holmes, a Gray, and C Isbell. “Fast SVD for large-scale matrices”. In: *Workshop on Efficient Machine Learning* 1.1 (2007), pp. 2–3.
- [3] Bo Li, Tianlei Zhang, and Tian Xia. “Vehicle Detection from 3D Lidar Using Fully Convolutional Network”. In: *Robotics: Science and Systems XII*. Robotics: Science and Systems Foundation, 2016. ISBN: 9780992374723. DOI: 10.15607/RSS.2016.XII.042. arXiv: 10.15607. URL: <http://www.roboticsproceedings.org/rss12/p42.pdf>.
- [4] F. Moosmann, O. Pink, and C. Stiller. “Segmentation of 3D lidar data in non-flat urban environments using a local convexity criterion”. In: *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. June 2009, pp. 215–220. DOI: 10.1109/IVS.2009.5164280.
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Straßenentwurf. *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*. 2006.
- [RAL] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Straßenentwurf. *Richtlinien für die Anlage von Landstrassen (RAL)*. FGSV (Series). FGSV-Verlag, 2013.
- [RASt] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Straßenentwurf. *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RASt 06*. FGSV (Series). FGSV-Verlag, 2007. ISBN: 9783939715214.
- [6] Wikipedia. *Linear least squares (mathematics)*. 2017. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_least_squares_\(mathematics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_least_squares_(mathematics)) (visited on 03/06/2017).

- [7] Liang Zhang et al. “Multiple Vehicle-like Target Tracking Based on the Velodyne LiDAR*”. In: *IFAC Proceedings Volumes* 46.10 (June 2013), pp. 126–131. ISSN: 14746670. DOI: 10.3182/20130626-3-AU-2035.00058. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667015349211>.