



Technische Hochschule
Ingolstadt

Fakultät Elektro-
und Informationstechnik

Semantische Segmentierung der Umgebung auf Basis von 3D-Daten

Simon Kuhn

Wissenschaftliche Arbeit im Zuge des Fachwissenschaftlichen Seminares

Erstprüfer: Prof. Dr. Christian Pfitzner

Betreuer: Prof. Dr. Christian Pfitzner

Ausgabedatum: 23.03.2023

Abgabedatum: 31.08.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Hintergrund und Motivation	4
1.2	Problemstellung und aktueller Stand	4
2	Sensoren zur Erfassung von 3D-Daten	5
2.1	LiDAR-Sensoren	5
2.2	Tiefenkameras	5
2.3	Passive und aktive Sensoren	6
2.4	Auswahl von Sensoren für die semantische Segmentierung	6
3	Datengrundlage und Vorverarbeitung	7
3.1	3D-Datenformate und Datentypen	7
3.2	Vorverarbeitungsschritte wie Filterung, Normalenberechnung und Downsampling .	7
3.3	Datenannotation und Ground Truth-Erstellung	8
4	Grundlagen der semantischen Segmentierung	10
4.1	Verfahren zur semantischen Segmentierung	10
4.2	Evaluierung von Verfahren zur semantischen Segmentierung	10
4.3	Herausforderungen und Limitationen	11
5	Anwendungszzenarien der semantischen Segmentierung	12
5.1	Autonomes Fahren	12
5.2	Robotik in der Industrie	12
5.3	Augmented Reality	12
5.4	Stadtplanung	12
5.5	Umweltüberwachung	12
6	State-of-the-Art Methoden zur semantischen Segmentierung auf Basis von 3D-Daten	13
6.1	Überblick über aktuelle Forschung und Entwicklungen	13
6.2	Vorstellung ausgewählter Methoden und deren Funktionsweise	13
7	Bewertung und Vergleich von Methoden zur semantischen Segmentierung	14
7.1	Evaluationsmetriken und -verfahren	14
7.2	Vergleich von Methoden anhand von Leistungskriterien	14
8	Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen	15
8.1	Herausforderungen bei der semantischen Segmentierung von 3D-Daten	15
8.2	Potenziale und Trends für zukünftige Entwicklungen	15

9 Zusammenfassung und Anwendung	16
9.1 Zusammenfassung der Arbeit	16
9.2 Ausblick auf zukünftige Forschungsrichtungen	16

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

In den letzten Jahren hat die Forschung im Bereich der autonomen Fahrzeuge und der Robotik enorme Fortschritte gemacht. Ein wichtiger Faktor für die Entwicklung dieser Technologien ist die Fähigkeit, die Umgebung ausreichend genau zu erkennen und zu verstehen. In diesem Zusammenhang hat die semantische Segmentierung der Umgebung auf Basis von 3D-Daten eine immer größere Bedeutung erlangt. Die semantische Segmentierung ist ein Verfahren zur automatischen Klassifizierung von Objekten und Strukturen in der Umgebung. Dabei werden jedem Pixel oder jedem Voxel in einem 3D-Modell eine bestimmte semantische Bedeutung zugeordnet, z.B. Straße, Gebäude, Bäume oder Fahrzeuge. Eine präzise und schnelle semantische Segmentierung ist eine wesentliche Voraussetzung für eine zuverlässige Navigation von mobilen Plattformen, wie autonomen Fahrzeugen oder Robotersystemen [1]. In dieser Arbeit wird die semantische Segmentierung der Umgebung auf Basis von 3D-Daten untersucht. Dabei sollen verschiedene Methoden und Ansätze für die semantischen Segmentierung, sowie bestehende Probleme dargestellt und bewertet werden.

1.2 Problemstellung und aktueller Stand

Trotz der Fortschritte im Bereich der Computer Vision gibt es noch immer einige Herausforderungen zu überwinden. Eines der Probleme besteht in der Komplexität der Umgebung. Ein 3D-Umfeld kann durch eine Vielzahl von verschiedenen Objekten und Strukturen, die miteinander interagieren und sich gegenseitig beeinflussen, besonders herausfordernd sein. Es ist schwierig, all diese Details genau zu erfassen und zu segmentieren, besonders wenn die Daten unvollständig oder fehlerhaft sind. Ein weiteres Problem ist die Notwendigkeit einer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit. Die Verarbeitung von großen Datenmengen erfordert eine erhebliche Rechenleistung, um eine schnelle und präzise Segmentierung der Umgebung zu ermöglichen. Dies kann für viele Anwendungen, insbesondere für sich schnell bewegendende mobile Geräte, eine Herausforderung darstellen [2].

Hinzu kommt die begrenzte Genauigkeit der Segmentierungsverfahren. Es gibt noch immer Schwierigkeiten bei der Unterscheidung zwischen ähnlichen Objekten, insbesondere wenn sie sich in Form oder Größe ähneln. Es ist schwierig, alle subtilen Unterschiede zu erfassen, die für eine präzise Segmentierung notwendig sind. Eine Vielzahl aktueller Entwicklungen beschäftigt sich mit der Verbesserung der Algorithmen. Dabei gelten besonders Deep-learning Methoden und Convolutional Neural Networks (CNNs) als vielversprechende Ansätze, um die Komplexität der Umgebung besser zu erfassen [3, 4].

2 Sensoren zur Erfassung von 3D-Daten

2.1 LiDAR-Sensoren

LiDAR-Sensoren, die auch unter dem Namen Light Detection and Ranging-Sensoren bekannt sind, stellen eine weit verbreitete Technologie zur Erfassung von 3D-Daten dar. Sie basieren auf dem Einsatz von Laserstrahlen, welche ausgesendet werden und von Objekten in der Umgebung reflektiert werden. Dabei kann zwischen Time of Flight (TOF) LiDAR und phasenbasiertem LiDAR unterschieden werden. Während TOF-LiDAR die Distanz über eine Messung der Laufzeit der Lichtwelle bestimmt, erfolgt die Entfernungsmessung beim phasenbasierten LiDAR über die Auswertung der Phasenverschiebung der vom Objekt reflektierten Lichtwelle. Hierdurch können LiDAR-Sensoren hochgenaue Entfernungen zu den reflektierenden Objekten erfassen aus denen sich detaillierte 3D-Punktwolken erzeugen lassen, welche die Geometrie und räumliche Verteilung von Objekten in der Umgebung darstellen. Zusätzlich lassen sich LiDAR-Sensoren in Scanning-LiDAR und Non-Scanning-LiDAR untergliedern. Non-Scanning-LiDAR nutzt dabei einen statischen Laserstrahl, während Scanning-LiDAR einen sich bewegenden Laserstrahl nutzt. [5]

2.2 Tiefenkameras

Tiefenkameras basieren auf verschiedene Verfahren, um Entfernungen zu messen. Im Bereich der semantische Segmentierung kommen besonders Kamerasysteme, die auf Stereo-Vision, Time-of-Flight oder Structured Light basieren zum Einsatz. Kamerasysteme, die auf dem Prinzip der Stereo-Vision basieren, werden als Stereo Kameras bezeichnet. Bei diesen werden zwei räumlich getrennte Kameras verwendet, die gemeinsam Bilder von derselben Szene aus zwei leicht unterschiedlichen Perspektiven aufnehmen. Der dabei entstehende horizontale Versatz der beiden Bilder wird als Disparität bezeichnet. Aus diesem lassen sich Tiefeninformationen des betrachteten Objektes berechnen [6]. Bei Time of Flight Kameras wird ein modulierte Lichtsignal im Infrarotbereich ausgesendet und von Objekten in der Umgebung reflektiert. Über die Phasenverschiebung der Infrarotwelle lässt sich die Entfernung des Objektes zur Kamera berechnen [7]. 3D-Kameras auf Basis von Structured Light projizieren ein spezielles 2D-Muster auf das zu betrachtende Objekt. Aus der Verzerrung dessen, lassen sich Tiefeninformationen berechnen [8]. Die meisten Tiefenkameras stellen dabei die Tiefeninformationen in einem Bild aus Graustufen dar. Zusätzlich gibt es auch RGB-D Kameras, welche zusätzlich zu einer Structured Light oder TOF-Kamera über eine RGB-Kamera verfügen. Diese haben häufig eine höhere räumliche Auflösung und sind in der Lage zusätzlich Farbinformationen aufzunehmen, besitzen jedoch einen deutlich kleineren Arbeitsbereich [9].

2.3 Passive und aktive Sensoren

Grundsätzlich lassen sich Sensoren zur Gewinnung von 3D-Daten in zwei Klassen unterscheiden. Aktive Sensoren wie LIDAR-Sensoren senden selbst Energie in Form von Laser- oder Lichtwellen aus, um Informationen über das Objekt zu sammeln. Die reflektierten Signale werden von der Sensor-Einheit aufgenommen und zur Berechnung von Tiefeninformationen verwendet. Im Gegensatz dazu erfordern passive Sensoren wie Stereokameras keine aktive Energiequelle, sondern nutzen das natürliche Licht, das von der Umgebung reflektiert wird. Der Vorteil von aktiven Sensoren besteht darin, dass sie unabhängig von der Umgebungshelligkeit arbeiten und auch bei Dunkelheit eingesetzt werden können. Passive Sensoren hingegen können bei schlechten Lichtverhältnissen Schwierigkeiten haben, genaue Tiefeninformationen zu liefern. Es ist jedoch anzumerken, dass passive Sensoren in der Regel kostengünstiger sind und eine höhere räumliche Auflösung bieten können.

2.4 Auswahl von Sensoren für die semantische Segmentierung

Die Wahl der geeigneten Sensoren für die semantische Segmentierung hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie den Anforderungen der Anwendung, den Umgebungsbedingungen, dem Budget und den gewünschten Ergebnissen. Aspekte wie die benötigte Genauigkeit, räumliche Auflösung, Reichweite, Echtzeitfähigkeit und Umgebungsbedingungen sollten bei der Auswahl von Sensoren berücksichtigt werden. Zum Beispiel benötigen Anwendungen im Bereich der autonomen Fahrzeuge möglicherweise Sensoren mit hoher Reichweite und Genauigkeit, während Anwendungen im Innenbereich möglicherweise Sensoren mit höherer räumlicher Auflösung und Echtzeitfähigkeit benötigen. Die Umgebungsbedingungen, wie schlechte Beleuchtungsbedingungen oder komplexe Geometrien, können ebenfalls die Leistung von Sensoren beeinflussen und die Wahl von geeigneten Sensoren beeinflussen. Das Budget ist ebenfalls ein wichtiger Faktor bei der Auswahl von Sensoren, da verschiedene Sensoren unterschiedliche Kosten haben können. Schließlich sollten auch die gewünschten Ergebnisse der semantischen Segmentierung berücksichtigt werden, da verschiedene Sensoren besser geeignet sein können, um bestimmte Objekte oder Strukturen in der Umgebung zu segmentieren. Zum Beispiel können Lidar-Sensoren aufgrund ihrer präzisen Tiefeninformationen und Reichweite gut geeignet sein, um Objekte wie Straßen, Gebäude oder Bäume zu segmentieren, während Kameras oder Tiefenkameras besser für die Segmentierung von Fußgängern oder Fahrzeugen geeignet sein können.

3 Datengrundlage und Vorverarbeitung

3.1 3D-Datenformate und Datentypen

Bei der semantischen Segmentierung von 3D-Daten spielen die zugrunde liegenden 3D-Datenformate eine elementare Rolle. Diese bilden die Grundlage für die Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von 3D-Daten, die für die semantische Segmentierung verwendet werden. In diesem Kapitel werden die beiden verbreitetsten 3D-Datenformate und Datentypen untersucht, die in der Forschung und Praxis eingesetzt werden.

Ein wichtiges 3D-Datenformat ist das Punktwolkenformat, das häufig von LiDAR-Sensoren erzeugt wird. Punktwolken sind Sammlungen von 3D-Punkten, die die Oberfläche von Objekten in der Umgebung darstellen. Sie können in verschiedenen Dateiformaten gespeichert werden, wie beispielsweise dem ASCII-Format oder dem binären LAS-Format (LASer File Format), das speziell für LiDAR-Daten entwickelt wurde. Diese Formate ermöglichen die Speicherung von großen Mengen an Punkten mit 3D-Koordinaten, Intensitätsinformationen und weiteren Attributen, die zur semantischen Segmentierung verwendet werden können. Im Vergleich zu Bildern weisen Punktwolken eine stark variable Punktdichte auf. Dies lässt sich durch Faktoren, wie eine ungleichmäßige Abtastung des Raumes, der Verdeckung von Objekten und der relativen Ausrichtung des Objektes zum Sensor begründen [10]. Das Punktwolkenformat erzeugt dabei große Datenmengen, was zu einer rechenintensiven Verarbeitung der Daten führen kann.

Neben Punktwolken werden auch 3D-Gitter oder Voxel-Daten oft für die semantische Segmentierung verwendet. Voxel sind volumetrische Elemente, die den Raum in einem dreidimensionalen Gitter unterteilen. Jeder Voxel enthält dabei Informationen über Materialeigenschaften, Farbe oder Textur des Objektes an diesem Punkt. Voxel-Daten können in verschiedenen Formaten gespeichert werden, wie zum Beispiel das binäre OctoMap-Format oder dem ASCII-Format. Sie bieten dabei eine effektive Möglichkeit, komplexe dreidimensionale Strukturen darzustellen und weiter zu analysieren. Die Voxeldichte im Raum kann dabei frei gewählt werden und bestimmt so die Auflösung und den Speicherbedarf des Datensatzes.

3.2 Vorverarbeitungsschritte wie Filterung, Normalenberechnung und Downsampling

Die Vorverarbeitung von 3D-Daten ist ein wichtiger Schritt in der semantischen Segmentierung, um die Qualität und Genauigkeit der Segmentierungsergebnisse zu verbessern. In diesem Kapitel werden verschiedene Vorverarbeitungsschritte wie Filterung, Normalenberechnung und Downsampling betrachtet, die oft in der Praxis angewendet werden.

Filterung von 3D-Daten: Die Filterung von 3D-Daten beinhaltet das Entfernen von unerwünschtem Rauschen oder Ausreißern, um die Qualität der Daten zu verbessern. Dies kann durch verschiedene Filtertechniken erfolgen, wie zum Beispiel Medianfilter, Gaußscher Filter [11] oder region growing und Bilateralfilter [12]. Diese Filter können angewendet werden, um Rau-

schen oder Ausreißer in den 3D-Punktwolken oder Voxel-Daten zu reduzieren und somit die Qualität der Daten für die semantische Segmentierung zu verbessern.

Normalenberechnung: Die Berechnung von Normalen ist ein wichtiger Schritt, um die geometrische Information der 3D-Daten zu erfassen. Normalen sind Vektoren, die senkrecht zur Oberfläche von Objekten in der Umgebung stehen und die Orientierung der Oberfläche angeben. Die Normalenberechnung kann auf Basis von Punktwolken durchgeführt werden und ermöglicht es, die Richtung und Orientierung der Objektoberflächen zu erfassen, was für die semantische Segmentierung von Objekten von Bedeutung ist.

Downsampling: Das Downsampling von 3D-Daten beinhaltet die Reduzierung der Datenmenge, um die Verarbeitungsgeschwindigkeit und den Speicherbedarf zu reduzieren. Dies kann durch verschiedene Techniken wie das Subsampling von Punktwolken oder das Voxel-Downsampling bei Voxel-Daten erfolgen. Downsampling ermöglicht es, die Datenmenge zu reduzieren, während wichtige strukturelle und semantische Informationen erhalten bleiben.

Die Anwendung von Vorverarbeitungsschritten wie Filterung, Normalenberechnung und Downsampling ist von großer Bedeutung, um die Qualität und Genauigkeit der 3D-Daten für die semantische Segmentierung zu verbessern. Durch die Reduzierung von Rauschen, die Erfassung von Normalen und die Reduzierung der Datenmenge können genauere und effizientere Segmentierungsergebnisse erzielt werden, die die Grundlage für die nachfolgenden Schritte der semantischen Segmentierung bilden. Es ist wichtig, geeignete Vorverarbeitungsschritte entsprechend den spezifischen Anforderungen der Anwendung und der verwendeten 3D-Daten auszuwählen und anzuwenden, um eine effektive und präzise semantische Segmentierung zu gewährleisten.

3.3 Datenannotation und Ground Truth-Erstellung

Die Datenannotation und die Erstellung einer Ground Truth sind entscheidende Schritte in der semantischen Segmentierung, um die Trainingsdaten für maschinelles Lernen bereitzustellen und Modelle für die Segmentierung von 3D-Daten zu trainieren und zu evaluieren. In diesem Kapitel werden verschiedene Aspekte der Datenannotation und der Ground Truth-Erstellung betrachtet.

Datenannotation: Die Datenannotation beinhaltet das manuelle oder automatische Hinzufügen von semantischen Labels oder Klasseninformationen zu den 3D-Daten. Dies kann durch das Markieren von Regionen oder Objekten in den Punktwolken oder Voxel-Daten erfolgen, um sie bestimmten Klassen oder Kategorien zuzuordnen. Die Datenannotation kann von menschlichen Annotatoren durchgeführt werden oder mit Hilfe von automatisierten Algorithmen, die auf maschinellem Lernen oder Regelbasierten Methoden basieren. Die Qualität und Genauigkeit der Datenannotation sind von entscheidender Bedeutung für die Qualität und Leistungsfähigkeit der semantischen Segmentierungsalgorithmen.

Ground Truth-Erstellung: Die Ground Truth-Erstellung beinhaltet die Erstellung von referenzbasierten Segmentierungsergebnissen, die als Grundlage für das Training und die Evaluierung von semantischen Segmentierungsalgorithmen dienen. Die Ground Truth kann manuell oder automatisch erstellt werden, indem die annotierten Daten als Referenz verwendet werden, um die Leistung von Segmentierungsalgorithmen zu bewerten. Die Ground Truth-Erstellung ist ein kritischer Schritt, um die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit von Segmentierungsergebnissen zu gewährleisten und die Qualität von trainierten Modellen zu überprüfen.

Herausforderungen bei der Datenannotation und Ground Truth-Erstellung: Die Datenannotation und Ground Truth-Erstellung können mit verschiedenen Herausforderungen verbunden sein,

wie zum Beispiel Unsicherheiten in der Klassen- oder Objektabgrenzung, Unvollständigkeit oder Inkonsistenz in den Annotationsdaten, Schwierigkeiten bei der Handhabung großer Datenmengen und das Management von Zeitaufwand und Ressourcen. Es ist wichtig, diese Herausforderungen zu berücksichtigen und geeignete Methoden und Werkzeuge einzusetzen, um die Qualität und Genauigkeit der Datenannotation und Ground Truth-Erstellung zu gewährleisten.

4 Grundlagen der semantischen Segmentierung

4.1 Verfahren zur semantischen Segmentierung

Es gibt verschiedene Verfahren zur semantischen Segmentierung, die sich hauptsächlich in der Art und Weise unterscheiden, wie sie die räumliche Abhängigkeit der Daten nutzen, um semantische Informationen zu extrahieren. Eine Gruppe von Methoden basiert auf der Verwendung von Konvolutional-Neural-Networks (CNNs), die durch ihre Fähigkeit zur Lernfähigkeit und Komplexitätssteigerung bekannt sind. Einige dieser Methoden sind Fully Convolutional Networks (FCN), U-Net, SegNet und DeepLab.

Eine andere Gruppe von Methoden nutzt Conditional Random Fields (CRFs), um die räumlichen Zusammenhänge der Daten zu berücksichtigen. Diese Methoden können mit CNNs kombiniert werden, um die Vorteile beider Ansätze zu nutzen. Zu den Methoden in dieser Kategorie gehören zum Beispiel das DeepLab-CRF und das W-Net.

Eine weitere Gruppe von Methoden nutzt Graphen-basierte Modelle, um semantische Informationen zu extrahieren. Diese Modelle können auf verschiedene Arten definiert werden, wie zum Beispiel durch das Erstellen von Graphen basierend auf der Nachbarschaftsbeziehung der Datenpunkte oder durch die Verwendung von Punkt-Clouds. Beispiele für diese Methoden sind PointNet und PointNet++.

Insgesamt gibt es eine Vielzahl von Verfahren zur semantischen Segmentierung, die sich durch ihre spezifischen Ansätze und Techniken unterscheiden. Die Wahl der geeigneten Methode hängt von den spezifischen Anforderungen der Anwendung ab, wie beispielsweise der Art und Menge der verfügbaren Daten und der Genauigkeit, die erforderlich ist, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen.

4.2 Evaluierung von Verfahren zur semantischen Segmentierung

Die Evaluierung von Verfahren zur semantischen Segmentierung erfolgt in der Regel anhand von Metriken wie der "Intersection over Union" (IoU), auch "Jaccard Index" genannt. Dieser Wert gibt an, wie viel Prozent der vorhergesagten Pixel tatsächlich richtig klassifiziert wurden im Verhältnis zu den tatsächlich vorhandenen Pixeln. Weitere Metriken sind die "Pixelgenauigkeit" (Pixel Accuracy), die "Klassen-Genauigkeit" (Class Accuracy) und die "Mittlere-Klassen-Genauigkeit" (Mean Class Accuracy). Für die Evaluierung wird in der Regel ein Testdatensatz verwendet, der sowohl Bilder als auch Ground-Truth-Masken enthält. Anhand dieser Daten wird das Verfahren trainiert und anschließend auf dem Testdatensatz ausgewertet. Die Bewertung der Ergebnisse ermöglicht die Beurteilung der Leistung des Verfahrens und die Vergleichbarkeit mit anderen Ansätzen.

4.3 Herausforderungen und Limitationen

Die semantische Segmentierung stellt verschiedene Herausforderungen dar, insbesondere im Hinblick auf die Komplexität der Umgebung und die Vielfalt der Objekte und Strukturen. Eine Herausforderung besteht darin, dass Objekte und Strukturen oft unterschiedliche Skalierungen, Formen und Orientierungen aufweisen, was eine präzise Klassifizierung erschwert.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die semantische Segmentierung oft in Echtzeit erfolgen muss, um eine zuverlässige Navigation von autonomen Fahrzeugen und Robotern zu ermöglichen. Dies erfordert eine hohe Rechenleistung und eine effiziente Implementierung der Verfahren.

Insgesamt stellt die semantische Segmentierung eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen und Robotern dar und wird voraussichtlich in Zukunft eine immer größere Bedeutung erlangen.

5 Anwendungsszenarien der semantischen Segmentierung

5.1 Autonomes Fahren

5.2 Robotik in der Industrie

5.3 Augmented Reality

5.4 Stadtplanung

5.5 Umweltüberwachung

6 State-of-the-Art Methoden zur semantischen Segmentierung auf Basis von 3D-Daten

6.1 Überblick über aktuelle Forschung und Entwicklungen

6.2 Vorstellung ausgewählter Methoden und deren Funktionsweise

7 Bewertung und Vergleich von Methoden zur semantischen Segmentierung

7.1 Evaluationsmetriken und -verfahren

7.2 Vergleich von Methoden anhand von Leistungskriterien

8 Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen

8.1 Herausforderungen bei der semantischen Segmentierung von 3D-Daten

8.2 Potenziale und Trends für zukünftige Entwicklungen

9 Zusammenfassung und Anwendung

9.1 Zusammenfassung der Arbeit

9.2 Ausblick auf zukünftige Forschungsrichtungen

Literatur

- [1] Kaihong Yang, Sheng Bi und Min Dong. „Lightningnet: Fast and Accurate Semantic Segmentation for Autonomous Driving Based on 3D LIDAR Point Cloud“. In: *2020 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. 2020, S. 1–6. DOI: 10.1109/ICME46284.2020.9102769.
- [2] Mohammad Hosein Hamian u. a. „Semantic Segmentation of Autonomous Driving Images by the Combination of Deep Learning and Classical Segmentation“. In: *2021 26th International Computer Conference, Computer Society of Iran (CSICC)*. 2021, S. 1–6. DOI: 10.1109/CSICC52343.2021.9420573.
- [3] Tuan Pham. „Semantic Road Segmentation using Deep Learning“. In: *2020 Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB)*. 2021, S. 45–48. DOI: 10.1109/ATiGB50996.2021.9423307.
- [4] Liuhao Ge u. a. „3D Convolutional Neural Networks for Efficient and Robust Hand Pose Estimation from Single Depth Images“. In: *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017, S. 5679–5688. DOI: 10.1109/CVPR.2017.602.
- [5] Jingyun Liu u. a. „TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle“. In: *2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)*. 2018, S. 185–190. DOI: 10.1109/OGC.2018.8529992.
- [6] Emre DANDIL und Kerim Kürşat ÇEVİK. „Computer Vision Based Distance Measurement System using Stereo Camera View“. In: *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. 2019, S. 1–4. DOI: 10.1109/ISMSIT.2019.8932817.
- [7] Yosef Dalbah, Stephan Rohr und Friedrich M. Wahl. „Detection of dynamic objects for environment mapping by time-of-flight cameras“. In: *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2014, S. 971–975. DOI: 10.1109/ICIP.2014.7025195.
- [8] Inzamam Anwar und Sukhan Lee. „High performance stand-alone structured light 3D camera for smart manipulators“. In: *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*. 2017, S. 192–195. DOI: 10.1109/URAI.2017.7992709.
- [9] José Gomes da Silva Neto u. a. „Comparison of RGB-D sensors for 3D reconstruction“. In: *2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*. 2020, S. 252–261. DOI: 10.1109/SVR51698.2020.00046.
- [10] Yin Zhou und Oncel Tuzel. „VoxelNet: End-to-End Learning for Point Cloud Based 3D Object Detection“. In: *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018, S. 4490–4499. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00472.

- [11] Karl Thurnhofer-Hemsi u. a. „Super-Resolution of 3D MRI Corrupted by Heavy Noise With the Median Filter Transform“. In: *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2020, S. 3015–3019. DOI: 10.1109/ICIP40778.2020.9191237.
- [12] Li Chen, Hui Lin und Shutao Li. „Depth image enhancement for Kinect using region growing and bilateral filter“. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012)*. 2012, S. 3070–3073.