

Ein Beitrag zur 3D-Umfeldwahrnehmung für automatisierte Straßenfahrzeuge im urbanen Raum

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jens Rieken
aus: Emden

eingereicht am: 11. Juni 2019
mündliche Prüfung am: 28. Oktober 2020

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Wünsche

Druckjahr: 2020

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Beitrag und Methodik der Arbeit | 3 |
| 1.2 | Struktur der Arbeit | 7 |
| 1.3 | Verwendete Terminologie | 9 |
| I | Systemkonzeption | 13 |
| 2 | Der Stadtpilot als Anwendungsfall automatisierter Fahrfunktionen | 15 |
| 2.1 | Projektbeschreibung und Zielsetzung | 16 |
| 2.2 | Darstellung der Funktionalen Systemarchitektur | 19 |
| 2.3 | Beschreibung der Anwendungsszenarien | 24 |
| 2.4 | Zusätzliche Szenarien durch Streckenerweiterung | 28 |
| 2.5 | Beispiele für Grenzszenarien für die Umfeldwahrnehmung | 29 |
| 2.6 | Zusammenfassung | 30 |
| 3 | Ableitung von Wahrnehmungsfertigkeiten | 31 |
| 3.1 | Fertigkeiten, Fähigkeiten und graphenbasierte Relationen | 31 |
| 3.2 | Fertigkeiten zur Umfeldwahrnehmung | 34 |
| 3.3 | Architektonische und technische Randbedingungen | 41 |
| 3.4 | Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 42 |
| 4 | Entwurf der Umfeldwahrnehmung | 45 |
| 4.1 | Stand der Forschung zu Modellierungsansätzen | 45 |
| 4.2 | Wahrnehmung mittels hochauflösender Lasersensorik | 60 |
| 4.3 | Laserbasierte Umfeldwahrnehmung des Projekts Stadtpilot | 64 |
| 4.4 | Abschluss der Systemkonzeption und Ergebnisdiskussion | 72 |
| II | Systemrealisierung | 75 |
| 5 | Grundlagen | 79 |
| 5.1 | Funktionsprinzip eines Lasersensors zur Distanzmessung | 79 |
| 5.2 | Sensorspezifikation Velodyne HDL-64E S2 | 81 |
| 5.3 | Daten-Repräsentation und Scan-Generierung | 82 |
| 6 | Punktwolken-Vorverarbeitung | 87 |
| 6.1 | Klassifikation der Bodenoberfläche | 89 |
| 6.2 | Klassifikation bodennaher Strukturen | 99 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.3 | Konvertierung in eine Multi-Volumen-Repräsentation | 107 |
| 6.4 | Punktwolken-Segmentierung | 110 |
| 6.5 | Segmentbasierte Beweglichkeitsschätzung | 121 |
| 7 | Modellierung des stationären Umfelds | 127 |
| 7.1 | Grundlagen | 129 |
| 7.2 | Identifikation des eigenen Beitrags | 135 |
| 7.3 | Besondere Aspekte des eingesetzten Frameworks | 136 |
| 7.4 | Repräsentierte Merkmale im stationären Umfeldmodell | 139 |
| 7.5 | Merkmals-Abstraktion und Gitterfusion | 150 |
| 7.6 | Weiterführende Extraktion von Merkmalen | 155 |
| 7.7 | Zusammenfassung und Kritik | 156 |
| 8 | Modellierung des beweglichen Umfelds | 159 |
| 8.1 | Identifikation des eigenen Beitrags | 161 |
| 8.2 | Das Objektmodell zur Repräsentation beweglicher Elemente | 161 |
| 8.3 | Hypothesengenerierung | 167 |
| 8.4 | Objektverfolgung | 174 |
| 8.5 | Zusammenfassung und Kritik | 191 |
| III | Systembewertung | 195 |
| 9 | Grundlagen und Stand der Forschung | 199 |
| 9.1 | Metriken für objektbasierte Repräsentationen | 201 |
| 9.2 | Erzeugung von Referenzdaten | 206 |
| 9.3 | Anwendbarkeit öffentlich verfügbarer Datensätze und Leistungsvergleiche | 208 |
| 9.4 | Fazit | 210 |
| 10 | Versuchsdurchführung | 213 |
| 10.1 | Bemerkungen zum Aufbau des Versuchssystems | 213 |
| 10.2 | Definition der zu bewertenden Szenarien | 214 |
| 10.3 | Eingesetzte Referenzdaten und Metriken | 220 |
| 11 | Versuchsergebnisse | 225 |
| 11.1 | Szenarien „Folgen einer mehrstreifigen Straße“ und „Fahrstreifenwechsel“ | 225 |
| 11.2 | Szenario „Abbiegen durch entgegenkommenden Verkehr“ | 236 |
| 11.3 | Szenario „Annäherung an einen Verkehrsknotenpunkt“ | 237 |
| 11.4 | Szenario „Folgefahrt auf einer nicht ebenen Fahrbahn“ | 239 |
| 11.5 | Szenarienübergreifende Aspekte | 240 |
| 11.6 | Zusammenfassung und Fazit | 246 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| IV | Schlussteil | 251 |
| 12 | Zusammenfassung und Ausblick | 253 |
| 12.1 | Rekapitulation im Kontext der Forschungsfragestellungen | 253 |
| 12.2 | Offene Punkte und weiterführende Fragestellungen | 256 |
| | Anhang | 263 |
| A | Koordinatensysteme & Transformationen | 263 |
| A.1 | Koordinaten- und Achsensysteme | 263 |
| A.2 | Koordinatentransformationen | 265 |
| B | Gitterbasierte Modellierung | 269 |
| B.1 | Konzept zum latenzminimalen Zugriff auf Gittermodelle | 269 |
| B.2 | Konvertierungsvorschriften für die Tristate-Darstellung | 272 |
| B.3 | Belegungsschätzung durch ein binäres Bayes'sches Filter | 273 |
| C | Objektverfolgung | 277 |
| C.1 | Grundlagen rekursiver Zustandsschätzung | 277 |
| C.2 | Definition der eingesetzten Bewegungsmodelle | 283 |
| D | Systemkonfiguration zur Evaluation | 289 |
| E | Parameter der Algorithmen | 291 |
| | Abkürzungen und Nomenklatur | 295 |
| | Eigene Veröffentlichungen | 299 |
| | Betreute studentische Arbeiten | 301 |
| | Literaturverzeichnis | 303 |