



Simulation von infrastrukturellen Umfelderfassungslösungen zur Systemkonzeptbewertung

Masterarbeit

erstellt von cand. mach. Viviane Bremer
Braunschweig, der 14. Dezember 2018

Technische Universität Braunschweig
Institut für Fahrzeugtechnik
Direktor: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
Betreuer: Adrian Sonka

Aufgabenstellung (Original bzw. Kopie)

Sperrklausel

Die Ausgabe der vorliegenden Bachelor/Master/Studien/Projektarbeit mit dem Titel ist ausschließlich unter Genehmigung der Institutsleitung zulässig.

Ort, den Datum

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelor/Master/Studien/Projektarbeit mit dem Titel, ohne unerlaubte fremde Hilfe oder Beratung und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel angefertigt habe.

Ort bei Unterschrift, den Datum bei Unterschrift

Name des Autors

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
2 Umfelderkennung	2
2.1 Sensoren zur Umfelderkennung	2
2.1.1 Ultraschall	2
2.1.2 Radar	4
2.1.3 Lidar	6
2.1.4 Kamera	7
2.2 Datenverarbeitung	8
2.2.1 Objekterkennung und Tracking	8
2.2.2 Datenfusion	9
2.3 Sensoreinsatz im Fahrzeug	10
2.4 Sensoreinsatz in der Infrastruktur	11
3 Anforderungen an ein Software-Tool zur Sensorbewertung	12
4 Software-Tool zur Sensorbewertung	13
4.1 Programmstruktur/Architektur	13
4.2 Implementierung	13
5 Evaluation	14
6 Zusammenfassung und Ausblick	15
Literatur	16
Anhang	17

Abbildungsverzeichnis

1	Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt	3
2	Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [W HLS15]	8

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Δh_{ax}	$[\text{m/s}^2]$	Überschwingweite
------------------------	------------------	------------------

1 **Einleitung**

2 Umfelderkennung

Dieses Kapitel stellt zunächst die bestehenden Sensoren zur Umfelderkennung vor und erläutert deren Funktionsprinzipien. Anschließend wird auf die Sensordatenverarbeitung eingegangen. Dazu gehören die Datenfusion, die Objekterkennung und das Tracking. Auf diesen Grundlagen aufbauend wird in den Kapiteln 2.3 und 2.4 aufgezeigt, wie dies im Fahrzeug und auch in der Infrastruktur genutzt wird.

2.1 Sensoren zur Umfelderkennung

Die Sensoren zur Umfelderkennung werden in entfernungsgebende und bildgebende Sensoren unterschieden. Zu ersterem gehören der Ultraschall, der Radar und der Lidar. Zu letzterem die Kamera mit dem sichtbaren und dem Infrarotspektrum. Im Folgenden werden die einzelnen Sensorprinzipien erläutert.

2.1.1 Ultraschall

Als Ultraschall werden die Schallfrequenzen ab 20kHz bezeichnet. Sie gehören zu den Frequenzen, die für das menschliche Ohr nicht hörbar sind. Die Messung mit Ultraschall gehört zu den Laufzeitmessungen. Ein Sender emittiert Schallwellen, die schließlich von Objekten reflektiert werden. Mit Hilfe der gemessenen Laufzeit Δt bis das Echo wieder am Sender ankommt kann der Abstand d zum gemessenen Objekt bestimmt werden [TR14]:

$$d = \frac{c_S \Delta t}{2}. \quad (1)$$

Mit der Schallgeschwindigkeit c_S . Da die Strecke zwischen Sender und Objekt zweimal durchlaufen wird, muss diese halbiert werden um den tatsächlichen Abstand zu erhalten. Neben der reinen Abstandsmessung kann mit Hilfe von zwei Sendern, deren Erfassungsbereiche überlappen, auch eine Positionsbestimmung durchgeführt werden. Hierzu wird das Trilaterationsverfahren genutzt. Für ein rundes Objekt ist dies in Abbildung 1 dargestellt. Der Abstand D berechnet sich mittels des Satzes von

Abbildung
überarbeiten!

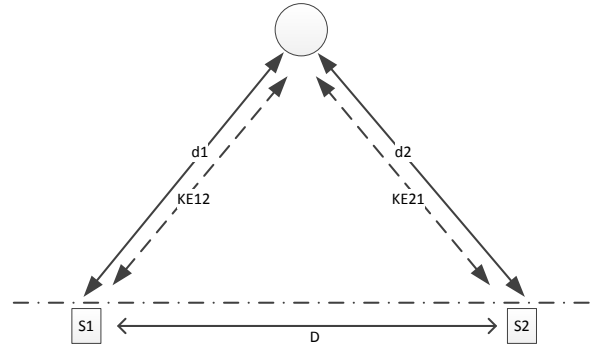


Abbildung 1: Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt

Pythagoras:

$$D = \sqrt{DE1^2 - \frac{(d^2 + DE1^2 - DE2^2)^2}{4d^2}} \quad (2)$$

Die Reichweite des Ultraschallsensors ist abhängig von der ausgesendeten Schallintensität I_S , da die Schallintensität in Abhängigkeit von der Entfernung r des gemessenen Objektes abnimmt. Somit ergibt sich, mit der effektiven Reflexionsfläche σ und bezogen auf den Normabstand r_1 , die reflektierte Schallintensität

$$I_{refl} = \sigma I_s \left(\frac{r_1}{2r} \right)^2. \quad (3)$$

Des Weiteren verringert der Reflexionsgrad ρ_S und die Impedanz der Atmosphäre die Schallintensität bei der Reflexion. Als untere Grenze zur Objektmessung muss die Schallintensität des Empfangssignals oberhalb des Rauschens liegen, d.h. $\geq 10\text{dB}$ sein.

Zur Schallerzeugung und -empfang wird bei Ultraschallsensoren eine Membran aus einer Piezokeramik eingesetzt [WHL15]. Zum Aussenden der Schallwellen wird die Membran aktiv in Schwingung versetzt und nach einer festgelegten Sendedauer wieder zur Ruhe gebracht. Die Zeit bis der reflektierte Schall die Membran wieder zur Schwingung anregt wird mit Gleichung 1 zur Abstandsbestimmung genutzt.

2.1.2 Radar

radio detection and ranging

elektromagnetische Wellen im Radiofrequenzbereich/Mikrowellen

24GHz und 77GHz für Automobil

Strahlen gebündelt mit Richtantenne

Zwei Messverfahren: Puls-Doppler und Dauerstrich (FMCW)

Puls-Doppler: Rechteckpulse mit Zwischenfrequenz (Mischer), Abstand mit Pulslaufzeit bezogen auf Pulsmitte, betrachtet Doppler-Frequenzen, Annäherung positiv/Entfernen negativ

FMCW: Frequenzrampen, Differenzfrequenz betrachten (je größer Δf desto größer Δt desto größer d)

Reichweite von Sendeleistung und Richtcharakteristik abhängig

Rückstreuquerschnitt σ beeinflusst reflektiertes Signal

je größer σ desto besser erkennbar

FoV erweiterbar durch Scan oder Mehrstrahler

Die Radarmessung (Radio Detection And Ranging) gehört zu den berührungslosen Messverfahren und wird insbesondere bei anspruchsvollen Umgebungsbedingungen eingesetzt [TR14]. Bei diesem Verfahren werden elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich eingesetzt, welche kaum anfällig gegenüber Temperaturschwankungen und Nebel sind. Für den Automobilbereich sind die 24GHz und 77GHz Frequenzen reserviert [WHLS15].

Zur Abstandsmessung finden zwei verschiedene Ansätze Verwendung. Das ist zum Einen das Puls-Doppler-Verfahren und zum Anderen das Dauerstrich-Verfahren (FMCW). Ersteres funktioniert ähnlich wie die Laufzeitmessung beim Ultraschall.

$$r = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta t_0 \omega_{obj} - \varphi_{BA}}{m_\omega \Delta t_0 - \Delta \omega_{BA}}, \quad (4)$$

$$\dot{r} = \frac{c}{2\omega_0} \cdot \frac{m_\omega \Delta \varphi_{BA} - \Delta \omega_{BA} \omega_{obj}}{m_\omega \Delta t_0 - \Delta \omega_{BA}} \quad (5)$$

Radar steht für Radio Detection And Ranging und sendet elektromagnetischen Wellen im Radiofrequenzbereich aus. Für den Automobilbereich sind die 24GHz und 77GHz Frequenzbänder reserviert [WHLS15].

Im Gegensatz zum Ultraschall breiten sich beim Radar die Wellen nicht gleichmäßig in alle Raumrichtungen aus, sondern werden mit Hilfe einer sogenannten Richtantenne gebündelt. Je nach Richtcharakteristik ergibt sich der Antennengewinn G , der Einfluss auf die Reichweite nimmt. Die Empfangsleistung für ein reflektiertes Radarsignal ergibt sich zu

$$P_R = \frac{10^{-2kr/1000} \sigma \lambda^2 G^2 V_{mp}^2 P_{total}}{(4\pi)^3 r^4} \quad (6)$$

mit dem Rückstreuquerschnitt

$$\sigma_{plate} = 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2}. \quad (7)$$

Gleichung 6 berücksichtigt außerdem sogenannte Signalleistungsschüttler mit dem Faktor V_{mp}^2 , $0 \leq V_{mp} \leq 2$.

Bei der Abstandsmessung wird neben der Laufzeitbestimmung der Doppler-Effekt genutzt. Der Doppler-Effekt besagt, dass sich die Frequenz bei der Reflexion in Abhängigkeit von der Änderung des Abstandes \dot{r} ändert. Diese Frequenz wird auch Dopplerfrequenz $f_{Doppler}$ genannt und ergibt sich mit der Trägerfrequenz f_0 und der Lichtgeschwindigkeit c folgendermaßen:

$$f_{Doppler} = -2\dot{r} f_0 / c \quad (8)$$

Bei einer Annäherung ($\dot{r} < 0$) ist diese positiv und beim Entfernen negativ. Stehende Objekte können mit diesem Effekt jedoch nicht gemessen werden.

2.1.3 Lidar

Light Detection and Ranging, kurz Lidar, gehört zu den optischen Messverfahren und nutzt UV-, IR-Strahlen oder Strahlen aus dem sichtbaren Spektrum [WHLS15]. Für die Messung großer Entfernungen wird die Pulslaufzeitmessung genutzt bei dem kurze Lichtblitze hoher Leistung, meist Laser-Pulse, gesendet und die Laufzeit gemessen wird [TR14]. Der Abstand wird ähnlich wie beim Ultraschall bestimmt:

$$d = \frac{c_L \Delta t}{2} \quad (9)$$

Mit der Lichtgeschwindigkeit c_L . Die Reichweite beim Lidar ist durch die Lichtintensität, welche den Laserschutzvorschriften genügen muss, beschränkt. Des Weiteren beeinflusst auch der Reflexionsgrad ρ_L die Reichweite. Dieser ist insbesondere von der Oberfläche des Objektes abhängig, aber auch von seiner Größe. So ergibt sich für die reflektierte Lichtintensität P_r für ein großes bzw. nahes Objekt die folgende Gleichung:

$$P_r = \frac{\rho_L \cdot A_t \cdot H \cdot T^2 \cdot P_t}{\pi^2 \cdot R^3 \cdot (Q_v/4)(\Phi/2)^2} \quad (10)$$

Für ein Objekt, das – durch die Entfernung – kleiner ist als der Lichtpunkt ändert sich Gleichung 10 zu:

$$P_r = \frac{\rho_L \cdot A_t \cdot H \cdot T^2 \cdot P_t}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot (Q_v Q_h/4)(\Phi/2)^2}. \quad (11)$$

Hierbei ist Φ der Winkel der Objektreflexion, H die Objektbreite, A_t die Empfangslinsenfläche, T die Transmission der Atmosphäre, Q_v und Q_h die vertikale bzw. horizontale Strahldivergenz und P_t die Laserleistung.

Das Sichtfeld kann von dem eindimensionalen Fall mit einem Strahl in nur eine Richtung auch horizontal und vertikal beliebig erweitert werden. Dafür gibt es zwei verschiedene Ansätze. Ein Ansatz ist der Einsatz eines schwenkbaren Spiegels, der den/die Laserstrahl/en ablenkt. Hierdurch ist ein horizontaler Öffnungswinkel von bis zu 360° und ein vertikaler Öffnungswinkel von bis zu 120° möglich. Der zweite

Ansatz nutzt ein Array aus Laserdioden, die mittels Multiplexverfahren angesteuert werden. Der horizontale Öffnungswinkel bei dieser Variante beträgt bis zu 110° und der vertikale Öffnungswinkel ist von der Strahlbreite abhängig und beträgt in etwa 2° bis 5° .

2.1.4 Kamera

Die Kamera gehört zu den bildgebenden Sensoren und besitzt dadurch den Vorteil ähnliche Informationen wie das menschliche Auge zu produzieren. Somit können Objekte mit einer hohen Genauigkeit identifiziert werden. Jedoch ist die Entfernungsmessung mit einer Monokamera eher ungenau, da dies nur anhand der Auflösung geschätzt werden kann. Diese bestimmt auch den Sichtbereich und die Reichweite. Letzteres wird durch den Bereich des scharfen Abbildens begrenzt [HMS16]. Die untere Grenze a_v der Reichweite liegt vor und die obere Grenze a_h hinter der Objektebene und ergeben sich mit

$$a_v = \frac{af'^2}{f'^2 - u'k(a + f')} \quad (12)$$

$$a_h = \frac{af'^2}{f'^2 + u'k(a + f')}. \quad (13)$$

Dabei ist k die Blendenzahl, a der Abstand zwischen Objektebene und Eintrittspupille, f' die Brennweite und u' der Durchmesser des Unschärfekreises, der sich folgendermaßen bestimmen lässt:

$$u' = \frac{\text{Formatdiagonale}}{1000} \quad (14)$$

Neben dem sichtbaren Spektrum können einige Kameras auch das Infrarotspektrum erkennen. So kann auch bei Nacht bzw. Dunkelheit die Kamera weiterhin eingesetzt werden. Es gibt zwei verschiedene Ansätze hierbei, die unterschiedliche Infrarotbereiche nutzen [WHLS15]. Eine Möglichkeit ist das Nahinfrarot (NIR). Hierbei wird die Szene mit NIR-Strahlung ausgeleuchtet, die von der Kamera erkannt wird. Die

andere Möglichkeit ist der Einsatz von Ferninfrarot (FIR). In diesem Spektrum liegt die Wärmestrahlung von Objekten, die von speziellen Wärmebildkameras erfasst werden kann.

2.2 Datenverarbeitung

Im folgenden Abschnitt wird auf die Datenverarbeitung genauer eingegangen. Hierzu gehört die Objekterkennung und das Objekttracking, welche durch eine Datenfusion erweitert werden können. Der Ablauf der Datenverarbeitung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

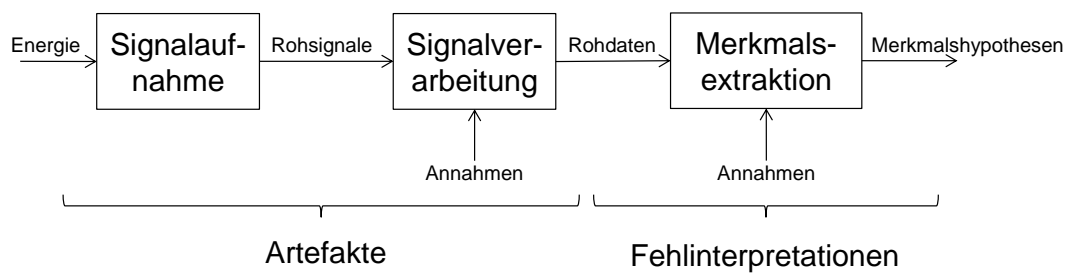


Abbildung 2: Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [WHLS15]

Als erstes wird die Signalaufnahme mittels des Sensors durchgeführt. Dem schließt sich eine Signalverarbeitung der Rohsignale an. Danach werden mit Hilfe einer Merkmalsextraktion Merkmals- bzw. Objekthypothesen aufgestellt. Fehlerquellen sind hierbei Artefakte durch Verletzung von physikalischen Annahmen in der Signalverarbeitung und Fehlinterpretationen durch Annahmen in der Merkmalsextraktion.

2.2.1 Objekterkennung und Tracking

Segmentierungsverfahren (Lidar und Radar):

Messrohpunkte eines Objektes liegen in enger Nachbarschaft

Verbinden/Gruppieren der Punkte mittels Region-Growing oder Linienextraktion

Einteilen der Segmente in I- und L-Formen

Segmentabmessungen bestimmen Objektklasse

”U”-Form bzw parallele Kanten bei Kamera:

Kantenpaare suchen und um eine horizontale Kante erweitern (Kopf)

Gradientenhistogramme als Bildmerkmale:

Histogramm über Häufigkeit der vorkommenden Farbwerte im Bild

Mit Kantenextraktion bis auf Fußgänger in Video

Merkmalsrekonstruktion durch Achsspiegelung bei teilweise verdeckten Objekten

[Leo08]

Bayes-Filter:

allgemeingültiges Verfolgungsverfahren

schätzt aus der Beobachtung neue mögliche Position

Beobachtung im Zustandsraum

gibt Wahrscheinlichkeitsdichte für aktuellen Zustand mit Berücksichtigung aller
vorigen Beobachtungen

Kalman-Filter (Tracking und Fusion):

Zustände aufgrund von redundanten Daten schätzen

schätzt aufgrund von Systemeingangsdaten mögliche neue Position

vergleicht Schätzung mit Messwerten

Differenz wird gewichtet und dient als Korrektur des aktuellen Zustands

Partikelfilter für Tracking

approximiert Wahrscheinlichkeit durch endliche Summe von Diracstößen mit Gewich-
ten

Die Paare aus Gewicht und Zustand sind Partikel

Gewichte werden im Innovationsschritt aktualisiert

[WHLS15] [Rud09]

2.2.2 Datenfusion

- Datenaufnahme (Komplementär, Konkurrierend, Kooperativ)

- implizit/explicit
- a-/synchron

[Kla]

2.3 Sensoreinsatz im Fahrzeug

Ultraschall

- Einpark-Assistent
- Front/Heck

Radar

- ACC, ACC S&G
- Spurwechselassistent
- Toter Winkel Assistent
- Front/Heck

Lidar

- ACC
- Front/360°

Kamera

- Fahrbahnerkennung
- Objekterkennung
- Verkehrsschilderkennung
- Spurhalteassistent
- Einparkassistent
- Front/Heck

- sichtbar/IR Spektrum
- Fusion mit Radar/Lidar
- Fahrerassistenzsysteme
- autonomes Fahren

2.4 Sensoreinsatz in der Infrastruktur

- Kamera
- Radar
- Lidar
- Unfallforschung

3 Anforderungen an ein Software-Tool zur Sensorbewertung

- Sensormodell/Sensorattribute
 - FoV (Öffnungswinkel, Reichweite)
 - Datenqualität (Auflösung Genauigkeit, Messdauer)
 - Arbeitsfrequenz
 - Umwelteinflüsse (Witterung, Tag/Nacht, Temperatur)
 - Maße (Größe, Gewicht)
 - Schnittstellen
- Objekte
 - Fahrzeuge (KFZ, LKW, Zweirad)
 - Fußgänger
 - Geschwindigkeit
- Umgebung
 - Straße (Spuren, Kreuzung,...)
 - Objekte (Position, Intention)
 - Witterung
- Bewertung

4 Software-Tool zur Sensorbewertung

4.1 Programmstruktur/Architektur

4.2 Implementierung

5 Evaluation

6 Zusammenfassung und Ausblick

Literatur

- [HMS16] HERING, Ekbert ; MARTIN, Rolf ; STOHRER, Martin: *Physik für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49355-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49355-7>. – ISBN 978-3-662-49354-0
- [Kla] KLAUS DIETMAYER, ALEXANDER KIRCHNER UND NICO KÄMPCHEN: Fusionsarchitekturen zur Umfeldwahrnehmung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme, S. 59–88
- [Leo08] LEONHARD F. WALCHSHÄUSL: *Maschinelle Erkennung von Verkehrsteilnehmern mittels heterogener Sensorik*. München, Technische Universität München, Diss., 2008
- [Rud09] RUDI LINDL: *Tracking von Verkehrsteilnehmern im Kontext von Multi-sensorsystemen*. München, TU München, Diss., 2009
- [TR14] TRÄNKLER, Hans-Rolf ; REINDL, Leonhard M.: *Sensortechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>. – ISBN 978-3-642-29941-4
- [WHLS15] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; LOTZ, Felix ; SINGER, Christina: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3>. – ISBN 978-3-658-05733-6

Anhang

Hier sind zusätzliche Infos einzubringen

Das Beispiel für eine Tabbing Umgebung zeigt, dass es möglich ist, mehrere Zeilen mit dem gleichen Einzug darzustellen:

$$v_{Start} = 120 \text{ km/h} = 33,3 \text{ m/s}$$

$$v_{End} = 80 \text{ km/h} = 22,2 \text{ m/s}$$

$$v_{Diff} = 40 \text{ km/h} = 11,1 \text{ m/s}$$