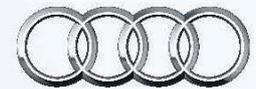


Audi
Dissertationsreihe



Christian Funk

Heterogene Sensordatenfusion für eine prädiktive Lichtsteuerung



Audi-Dissertationsreihe, Band 85





Heterogene Sensordatenfusion für eine prädiktive Lichtsteuerung

Der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Christian Funk
geb. am 29. August 1981 in Heidelberg

2013



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2013
Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-520-4

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2013

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2013

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

978-3-95404-520-4



*Meinen Eltern, die mich immer unterstützt
und mir meine Ausbildung ermöglicht haben.*



Danksagung

Wer aufhört besser zu werden, hat aufgehört, gut zu sein.
(Philip Rosenthal, Unternehmer – 1916)

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Lichtelektronik/ Innovationen bei der AUDI AG in Ingolstadt. Während dieser Zeit konnte ich viele wertvolle Erfahrungen sammeln, die ich nicht mehr missen möchte. Die Arbeitsumgebung und das Umfeld trugen dazu bei, dass die Arbeit entstehen konnte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek für seine Betreuung, seine Unterstützung und sein Vertrauen, das er bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt in mich gesetzt hat. Als FH-Absolvent musste ich zusätzliche, auf die Promotion vorbereitende Studien absolvieren. Den Mitarbeitern am IDS danke ich für die dabei gegebene Unterstützung.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer für die freundliche Übernahme des Koreferats bedanken.

Ein weiterer Dank gilt meinem Vorgesetzten Dr.-Ing. Wolfgang Huhn und meinem direkten Vorgesetzten Stephan Berlitz für ihr in mich gesetztes Vertrauen, die flexible Arbeitsweise und die eingeräumten Freiheiten während der Erstellung der Arbeit.

Dank gebührt auch Dr.-Ing. Friedrich Burgahn, der mir den Start bei Audi ermöglichte.

Großer Dank gilt zudem meinen Kollegen der Fachabteilung für die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre sowie meinen studentischen Mitarbeitern Georg Bauer, Martin Gutmann, Andreas Kubala, Kerstin Baskakow und Lars Wölfer, die mich mit ihren Arbeiten unterstützt haben.

Bei Alfons Siedersbeck und Sebastian Engel möchte ich mich für die vielen fachlichen Diskussionen rund um das Thema „prädiktives Kurvenlicht“ und ihrer wertvollen Unterstützung in vielen programmiertechnischen Belangen bedanken. Ohne sie wären unter anderem die häufigen Nachtfahrten nicht möglich gewesen, die wir oftmals mit viel Humor absolvierten.

Schließlich möchte ich meiner Freundin für ihre Geduld in der Schlussphase der Arbeit danken.

Weiterer Dank gilt meiner Familie, die mir zu jeder Zeit den nötigen Rückhalt, die Unterstützung und das Interesse an meiner Arbeit entgegenbrachte.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Motivation	2
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1	Kraftfahrzeuglichttechnik	5
2.2	Fahrzeugführung und visuelle Informationsaufnahme	9
2.2.1	Fahrzeugführung und Fahraufgabe	9
2.2.2	Visuelle Informationsaufnahme	11
2.3	Linienführung von Straßen und Berechnungsvorschriften für Klothoiden	13
2.4	Sensorik zur Erfassung des horizontalen Straßenverlaufs	15
2.5	Kamerasysteme und Bildverarbeitung	18
2.6	Aufbau von Fahrzeugnavigationssystemen	22
2.6.1	Ortsbestimmung und Positionierung	22
2.6.2	Digitale Karten und Koordinatensysteme	27
2.7	Gesetzliche Grenzen für ein prädiktives Kurvenlicht	29
3	Konzepte zur prädiktiven Lichtsteuerung	31
3.1	Aktueller Stand der Nachtfahrsicherheit	31
3.2	Potential der nächtlichen Sichtverbesserung durch eine prädiktive Lichtsteuerung	35
3.2.1	Situationsabhängige Lichtverteilungen	35
3.2.2	Vorausschauendes Kurvenlicht	38
4	Anforderungen an das Gesamtsystem	41
4.1	Verwendete Sensoren (Heterogenes Sensorkonzept)	41
4.2	Aufbau des Versuchsfahrzeugs	44
4.3	Auswahl der Eingangsdaten	46
4.4	Plausibilisierung der Eingangsdaten	48
4.5	Sensordatenfusion	53
4.6	Berechnung der Schwenkwinkel	58
5	Vorausschauende Adaption der horizontalen Lichtverteilung	60
5.1	Schwenkstrategien	60



5.1.1	Statische Vorausschau	63
5.1.2	Tangentiales Verfahren	63
5.1.3	Volladaptive Verfahren	64
5.2	Genauigkeitsbetrachtung	67
5.2.1	Genauigkeitsanforderungen an das Umfeldmodell	68
5.2.2	Latenzen der Eingangssensoren	74
5.3	Vorverarbeitung und Gewichtung der Eingangssignale	78
5.3.1	Approximation der Fahrspurkrümmung	79
5.3.2	Berechnung der Kurvigkeit	82
5.3.3	Algorithmen zur Gewichtung der Eingangsdaten	83
5.4	Sensordatenfusion	91
5.4.1	Kalman-Filter Ansatz	92
5.4.2	Sensordatenfusion über die Daten des RLS-Algorithmus	97
5.4.3	Bewertung der Fusionsergebnisse	98
5.5	Konzepte zur Verbesserung der System-Performance	100
6	Experimentelle-Ergebnisse und Simulations-Ergebnisse	102
6.1	Probandenstudie zur gewünschten Schwenkcharakteristik	102
6.2	Entwicklung einer Simulationsumgebung	110
6.2.1	Simulationen zur Bestimmung der Sichtverbesserung bei Verwendung des prädiktiven Kurvenlichts	111
6.2.2	Auswertung der beleuchteten Fläche vor dem Fahrzeug	117
6.2.3	Bewertung hinsichtlich der Blendung	121
6.3	Probandentest zur Bewertung des Gesamtsystems	125
6.3.1	Versuchsvorbereitungen	127
6.3.2	Ergebnisse der Fahrversuche	128
6.3.3	Auswertung des Frageteils	138
7	Zusammenfassung und Ausblick	142
	Anhang	146
A	Regelung RAS-L sowie Berechnungsvorschriften für Klothoiden	146
B	Transformation von WGS-84 Koordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem	149
C	Vergleich der Schwenkwinkel verschiedener Systeme und Genauigkeitsanforderungen	150
D	Auswertung der Erprobungen zur Radienverteilung	154
E	Fragebogen des dynamischen Probandentest	156
	Literaturverzeichnis	160



Erklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben. Zitate aus anderen Quellen sind als solche kenntlich gemacht. Weiterhin versichere ich, dass ich diese Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe.

Christian Funk
Ingolstadt, den 23. 07. 2013



Formelverzeichnis

Lateinische Notation

a	Große Halbachse (Äquatorachse)
a_{Fzg}	Längsbeschleunigung des Fahrzeugs
A	Proportionalitätsfaktor einer Klothoide
\mathbf{A}_k	Zustandsübergangsmatrix zum Zeitschritt k
b	Kleine Halbachse (Polachse)
\mathbf{B}	Steuermatrix zum Zeitschritt k
C	Leuchtdichtekontrast
c_0	Momentankrümmung
\tilde{c}_0	Bezogen auf den Koordinatenursprung transformierte Momentankrümmung
\tilde{c}_1	Bezogen auf den Koordinatenursprung transformierte Krümmungsänderung
\tilde{c}_2	Bezogen auf den Koordinatenursprung transformierte Endkrümmung
$c(l)$	Krümmung an der Stelle l
dc	Krümmungsänderung
D	Lateraler Abstand einer Fahrspurmarkierung zur Fahrzeugmitte
e	Numerische Exzentrizität
E	Beleuchtungsstärke
f_d	Frequenzverschiebung des Dopplereffektes
F_{abs}	Absolute Abweichung zweier Signalfolgen
F_{rel}	Relative Abweichung zweier Signalfolgen
G_{abs}	Faktor zur Gewichtung der absoluten Abweichung
G_{rel}	Faktor zur Gewichtung der relativen Abweichung
h_e	Elliptische Höhe
\mathbf{H}_k	Messmatrix zum Zeitschritt k
\mathbf{I}	Einheitsmatrix
I_L	Lichtstärke
k	Fahrspurkrümmung
\mathbf{K}_k	Kalmanverstärkungsfaktor zum Zeitschritt k
KU_i	Kurvigkeit an der Stelle i
l	Position an der die Krümmung bestimmt werden soll
\tilde{l}	Bezogen auf den Koordinatenursprung transformierte Klothoidenlänge
l_h	Abstand der Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt
l_v	Abstand der Vorderachse zum Fahrzeugschwerpunkt

L	Bogenlänge einer Klothoide
L_0	Leuchtdichte eines Objektes
L_u	Umgebungsleuchtdichte
N	Normalkrümmungskreisradius
p	Übertragungswert der Krümmungsinformation über den CAN-Bus
\mathbf{P}_k^-	Zeitliche Prädiktion der Fehlerkovarianz des Zustands zum Zeitschritt k
\mathbf{P}_k	Fehlervarianzmatirx zum Zeitschritt k
\mathbf{Q}_k	Kovarianz des Prozessrauschens zum Zeitschritt k
r	Abstand zu einem Objekt
r_E	Abstand einer beleuchteten Fläche zur Lichtquelle
R	Fahrspurradius
\mathbf{R}_k	Kovarianz des Messrauschens zum Zeitschritt k
$s_{i'}$	Laufvariable zur maximalen Vorausschau
ΔT	Dauer eines Zeitschritts
\mathbf{u}_k	Steuervektor zum Zeitschritt k
v	Geschwindigkeits des Fahrzeugs
v_e	Entwurfsgeschwindigkeit einer Strasse
\mathbf{v}_k	Messrauschen zum Zeitschritt k
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs zu einem anderen
\mathbf{w}_k	Systemrauschen zum Zeitschritt k
x	Longitudinaler Abstand eines Punktes zur Schwenkwinkelberechnung
\mathbf{x}_k	Zustandsvektor zum Zeitschritt k
$\hat{\mathbf{x}}_k$	Geschätzter Zustandsvektor zum Zeitschritt k
$\hat{\mathbf{x}}_k^-$	Zeitliche Prädiktion des Zustandsvektors zum Zeitschritt k
X, Y, Z	Kartesische Koordinaten
y	Lateraler Abstand eines Punktes zur Schwenkwinkelberechnung
\mathbf{z}_k	Messwerte zum Zeitpunkt k

Griechische Notation

α	Schwenkwinkel der Scheinwerfer
α_f	Fusionierter Schwenkwinkel der Scheinwerfer
$\Delta\alpha$	Tangentenwinkel am Endpunkt der Klothoide
$\dot{\beta}$	Schwimmwinkelgeschwindigkeit
γ	Winkeländerung eines Streckenstückes zur Berechnung der Krümmung
$\gamma_{i'}$	Faktor zur Fusion der Momentanen- und der Vorausschauenden Gewichtung des RLS-Algorithmus
δ	Radeinlenkwinkel
κ	Faktor zur Gewichtung der Krümmungsänderung
λ	Gewichtungsfaktor des RLS-Algorithmus
λ_e	Elliptische Länge
σ_{xy}	Kovarianz zweier Signalfolgen



τ	Tangentenwinkel einer Klothoide
Φ_{xy}	Kreuzkorrelation zweier Signalfolgen
$\tilde{\Phi}_{xy}$	Normierte Kreuzkorrelation zweier Signalfolgen
φ_e	Elliptische Breite
$\dot{\psi}$	Gierwinkelgeschwindigkeit
ω	Vergessensfaktor des RLS-Algorithmus



1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die 125-jährige Geschichte des Automobils ist vor allem dadurch geprägt, dass ständig neue Systeme sowie Funktionen entwickelt wurden, die das Autofahren erleichtern und sicherer machen sollen. Es ist ein Prozess, der seit langem andauert, dessen Fokus sich aber im Laufe der Jahre verschoben hat: Während die Bemühungen der Anfangsjahre des Automobils insbesondere darin bestanden, die Fortbewegung zu gewährleisten, so ist das heutige Bestreben zumeist, bereits vorhandene Funktionen noch weiter zu verbessern.

Die automobilen Lichttechnik ist dabei, wie auch das Auto selbst, fast 125 Jahre alt, denn bereits die ersten Fahrzeuge verfügten über einen Scheinwerfer. Auch wenn dieser in keiner Weise mit heutigen Lichtsystemen vergleichbar ist, so hatte er damals schon die Aufgabe, die Straße vor dem Fahrzeug auszuleuchten. Bestand die gesamte „Lichttechnik“ zu Beginn nur aus einer Petroleumlampe, stieg mit dem Einsatz der elektrischen Leuchtmittel am Automobil im Jahr 1912 auch die Lichtausbeute rasch an. Durch die Verbesserung der Leuchtmittel konnte die Lichtstärke im Laufe der Jahre weiter erhöht werden. Mit Einführung der Gasentladungslampen im Jahr 1991 vergrößerte sich die zur Verfügung stehende Lichtstrom auf einen Wert von bis zu 3.200 Lumen je Lichtquelle. 17 Jahre später (2008) konnte mit der Einführung des Voll-LED¹-Scheinwerfers erneut ein Meilenstein in der automobilen Lichttechnik gesetzt werden. LED-Scheinwerfer sind im Hinblick auf ihre Lichtausbeute vergleichbar mit Gasentladungslampen, sie werden diese aber in den nächsten Jahren deutlich übertreffen [8]. Ein großer Vorteil liegt in der emittierten Lichtfarbe, die mit 5.500 Kelvin sehr nah an der des Tageslichtes liegt und für den Fahrer angenehmer und heller wirkt als bei einem Scheinwerfer mit Gasentladungslampe.

Aber nicht nur im Bereich der eigentlichen Lichttechnik ist eine fortwährende Weiterentwicklung zu beobachten. Diese ist auch bei Sicherheitssystemen zu erkennen. Während der Schwerpunkt früher auf dem Ausbau der passiven Systeme lag, die bei einem Unfall Insassen schützen sollen, sind es heutzutage aktive Systeme, die verhindern sollen, dass ein Fahrzeug überhaupt in eine gefährliche Fahrsituation gerät. Lichtsysteme gehören dem Bereich der aktiven Sicherheit an, da ihre Funktion die Sicht des Fahrers ver-

¹LED = Light Emitting Diode

bessern soll, um kritische Situationen zu vermeiden. Die zunehmende Vernetzung von verschiedenen Sensoren und Steuergeräten im Fahrzeug ermöglicht die Umsetzung von völlig neuen Funktionen, die bisher nicht denkbar waren [48]. So ist ein Navigationssystem nicht mehr nur zur Routenberechnung nutzbar, sondern auch als Sensor für Fahrerassistenzsysteme [24], [70], [72]. Möglich ist dies durch die Bereitstellung der nötigen Navigationsinformationen als Eingangsgröße für entsprechende Assistenzfunktionen. Darüber hinaus sind in heutigen Fahrzeugen auch immer häufiger Kamerasysteme zu finden. In Verbindung mit dem optischen Messprinzip generieren sie eine aktuelle, vorausschauende Aussage über die Straßen- und Verkehrsverhältnisse vor dem Fahrzeug, die als Eingangsgröße moderner Lichtsysteme verwendet werden kann. Diese Lichtsysteme lassen sich grob in zwei Gruppen teilen: Fernlicht- und Abblendlichtsysteme.

Bei einem Fernlichtsystem wird durch Zuschalten weiterer Lichtquellen zum Abblendlicht die Sicht des Fahrers erhöht. Die Funktion des Systems besteht darin, durch Automation der Fernlichtaktivierung dessen Nutzungsdauer zu erhöhen. Hierbei existieren Systeme, die nur zwischen den zwei Zuständen Fern- und Abblendlicht wechseln können. Neben diesen gibt es adaptive Systeme, die auch Zwischenstufen in der Lichtverteilung annehmen können. Durch die Adaption der Hell-Dunkel-Grenze vergrößert sich die Sicht für den Fahrer, da sich die Lichtverteilung dem Verkehr automatisch anpasst.

Die zweite Gruppe bilden Abblendlichtsysteme. Sie verbessern die Sicht des Fahrers, indem sie die Lichtverteilung den Umgebungsbedingungen, zum Beispiel aufgrund der Fahrzeuggeschwindigkeit, anpassen. Eine Funktion, die beiden Gruppen zugeordnet werden kann, ist das dynamische Kurvenlicht, welches auf Basis fahrdynamischer Größen den Lichtkegel in horizontaler Richtung schwenkt. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an. Sie beschreibt wie das dynamische Kurvenlicht durch den Einsatz prädiktiver Sensoren – wie Kamera- und Navigationssystem – verbessert werden kann, indem es in Abhängigkeit des zukünftigen Streckenverlaufs vorausschauend angesteuert wird.

1.2 Motivation

Laut Statistischem Bundesamt ereigneten sich im Jahr 2005 2,25 Millionen Unfälle auf Deutschlands Straßen. Dabei starben 5.361 Personen. Im Jahr 1966 dagegen betrug die Anzahl der Todesopfer noch 21.332 Personen, wobei allerdings die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge nur etwa einem Drittel der heutigen entsprach. Vergleicht man diese beiden Werte, so ist das eine sehr positive Entwicklung. Diese lässt sich auf staatliche Maßnahmen, wie die Einführung der Gurtpflicht für Vordersitze 1976, aber vor allem auch auf Entwicklungen der Automobilindustrie zurückführen. So haben Systeme wie das Elektronische-Stabilitätsprogramm (ESP) oder das Anti-Blockier-System (ABS) dazu beigetragen, die Anzahl der Unfälle zu reduzieren. Bei Nachtfahrten bleibt jedoch ein erhöhtes Risiko bestehen. Aufgrund von schlechten Sichtverhältnissen oder Blendung durch den Gegenverkehr geschehen nachts, trotz eines deutlich geringeren Verkehrsaufkommens, circa 28 Prozent der schweren Unfälle [15].

Diese Tatsachen verdeutlichen, dass visuelle Informationen für einen Fahrer zum Führen eines Kraftfahrzeugs von großer Bedeutung sind. Wada et. al. [134] zeigen auf, dass die wichtigste Information zum Erfüllen der Fahraufgabe für einen Fahrzeuglenker visuell ist. Shinar et. al. [117] publizierten, dass zum sicheren Fahren eines Fahrzeugs 90 Prozent der nötigen Informationen visueller Form sind. Die Studie von Nagayama [98] korreliert die Vorverlegung der Fahrerreaktion mit den dadurch vermeidbaren Unfällen. Er kommt zu dem Ergebnis, dass 50 Prozent der Nachtfahrerunfälle vermieden werden könnten, wenn der Fahrer ein Hindernis 0,5 bis 1 s früher erkennen würde.

Hinsichtlich des Unfallortes ist nach Cohen [19] die Häufigkeit von Unfällen in Kurven – verglichen mit geraden Strecken – überproportional hoch. Nach Sprute [122] wird etwa jeder zweite gefahrene Kilometer (47,8 Prozent) auf Bundes- oder Landstraßen zurückgelegt. Auf Landstraßen ereignen sich 40 Prozent aller Unfälle auf einer Geraden und 35 Prozent in Kurven. Da Kurven aber nur einen Anteil von 29 Prozent des Straßennetzes auf Landstraßen ausmachen, geschehen folglich doppelt so viele Unfälle im Bereich einer Kurve wie auf einer Geraden [19]. Auch erfolgt ein Unfall mit Beteiligung anderer Verkehrsteilnehmer bis zu 40 Prozent häufiger in einer Rechts- als in einer Linkskurve. Im Gegenzug ist der Anteil von selbstverschuldeten Unfällen in Linkskurven überdurchschnittlich hoch. Als Grund nennt Cohen eine höhere Geschwindigkeit aufgrund der größeren Radien im Vergleich zu Rechtskurven und die daraus resultierenden besseren optischen Verhältnisse [19].

Fasst man die verschiedenen Fakten zur Häufigkeit einer Fahrt auf einer Land- oder Bundesstraße, den Unfallschwerpunkten an Kurven und die Verringerung der Unfälle bei Vorverlegung der Fahrerreaktion zusammen, ergibt sich daraus Verbesserungspotential im Hinblick auf die Beleuchtung der Fahrbahn. Entwicklungen wie Halogen- oder Gasentladungslampen führten zwar bereits zu einer verbesserten Ausleuchtung der Straße, jedoch erlaubten es diese alleine noch nicht, die Lichtverteilung dem Verkehrsgeschehen, geschweige denn dem Kurvenverlauf, anzupassen. Dies wurde erst durch den Einsatz des adaptiven Kurvenlichts realisiert. Der Schwenkwinkel zur horizontalen Drehung der Lichtverteilung wird dabei in Abhängigkeit des Lenkwinkels und der Fahrzeuggeschwindigkeit errechnet. Grundlage des Systems ist die Annahme, dass sich der Streckenverlauf vor dem Fahrzeug nicht ändert und so die Größen des momentanen Fahrzustandes verwendet werden können. Dies führt jedoch in einigen Fällen, wie S-Kurven, zu einem Unter- beziehungsweise Übersteuern der Lichtverteilung. Für die Funktion des Systems bedeutet dies, dass erst nach der Reaktion des Fahrers mit einer Lenkbewegung die Lichtverteilung vor dem Fahrzeug in die jeweilige Richtung geschwenkt wird. Das Problem liegt hier in der falschen Annahme des zukünftigen Streckenverlaufs und nicht in der daraus resultierenden späten Reaktion des Fahrers.

Gründl [52] weist darauf hin, dass der primäre Sicherheitsgewinn eines Kurvenlichts darin besteht, dass die Aufmerksamkeit des Fahrers bereits vor Befahren einer Kurve auf die sich ändernde Geometrie gelenkt wird. Auch Huhn [66] ist der Auffassung, dass ein Kurvenlicht dazu dienen sollte, bereits vor der Kurve in diese hineinzuleuchten, um die Wahrnehmung und die visuellen Verhältnisse für den Fahrer zu verbessern. Für eine sol-