

Dipl.-Phys. Reinhold Behringer, Iphofen

# **Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurver- laufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug**

Reihe **12**: Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. **310**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>I Einführung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Über Roboter und Rechnersehen . . . . .	1
1.1.1 Intelligenzleistungen beim menschlichen Sehen . . . . .	2
1.1.2 Künstliche Intelligenz und Rechnersehen . . . . .	4
1.2 Intelligente Systeme im Straßenverkehr . . . . .	5
1.2.1 Verkehrskrise als Forschungsanreiz . . . . .	5
1.2.2 Das intelligente Fahrzeug . . . . .	7
1.3 Entwicklungsgeschichte und Kontext . . . . .	9
1.3.1 Der 4-D-Ansatz zum Rechnersehen . . . . .	9
1.3.2 Auf dem Weg zum autonomen Straßenfahrzeug – die Arbeiten der UniBwM . . . . .	11
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	15
<b>2 Stand der visuellen Fahrspurerkennung</b>	<b>16</b>

2.1	Experimentalfahrzeuge zum Rechnersehen . . . . .	17
2.1.1	Europäische Firmen und Institutionen . . . . .	17
2.1.2	Arbeitsgruppen in den USA . . . . .	20
2.1.3	Japan und Restasien . . . . .	22
2.2	Verfahren zur visuellen Fahrspurdetektion . . . . .	23
2.2.1	Mit dynamischem Modell (4-D) . . . . .	24
2.2.2	Mit räumlichem Modell (3-D) . . . . .	26
2.2.3	Mit Bild-Modell (2-D) . . . . .	27
2.2.4	Ohne explizites Modell . . . . .	30
2.2.5	Erkennung von Infrastruktur . . . . .	32
<b>II</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>Rekursive Zustandsschätzung</b>	<b>34</b>
3.1	Gaußsche Ausgleichsrechnung . . . . .	35
3.2	Beschreibung von dynamischen Systemen . . . . .	37
3.2.1	Kontinuierliche dynamische Systeme . . . . .	37
3.2.2	Diskrete dynamische Systeme . . . . .	37
3.3	Das Kalmanfilter . . . . .	38
3.3.1	Der Kalman-Filter-Algorithmus . . . . .	39
3.3.2	Modifikationen des Kalmanfilters . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Fehlerdetektion bei rekursiven Schätzverfahren</b>	<b>43</b>
4.1	Fehlerdetektion durch analytische Redundanz . . . . .	44
4.1.1	Fehlersensitive Filter . . . . .	44
4.1.2	Mehrfachhypthesenfilter . . . . .	45

4.1.3	Innovationsgestützte Verfahren . . . . .	45
4.2	Das GLR-Verfahren . . . . .	46
4.2.1	Auftretende Fehlertypen . . . . .	46
4.2.2	Fehlereinfluß auf Kalmanfilter . . . . .	47
4.2.3	Der GLR-Test . . . . .	48
4.2.4	Modifikationen des GLR-Verfahrens . . . . .	50
4.2.5	Sprung in einer Zustandsgröße . . . . .	51
4.2.6	Die Wahl der Entscheidungsschwelle . . . . .	52
 <b>III Visuelle Fahrspurerkennung</b>		<b>54</b>
 <b>5 Modellierung von Straße und Fahrspur</b>		<b>54</b>
5.1	Straßenbauvorschriften in Deutschland . . . . .	55
5.2	Dynamisches Krümmungsmodell . . . . .	56
5.2.1	Horizontalkrümmung . . . . .	57
5.2.2	Vertikalkrümmung . . . . .	60
5.3	Dynamisches Spurbreitenmodell . . . . .	62
5.4	Ortsfeste Segmentmodellierung . . . . .	63
5.4.1	Ein einzelnes Segment . . . . .	64
5.4.2	Segmentkopplung . . . . .	65
5.5	Segmentgenerierung . . . . .	67
5.5.1	Räumliche rekursive Schätzung . . . . .	67
5.5.2	Sprungdetektion . . . . .	68
 <b>6 Die Fahrspur im Videobild</b>		<b>69</b>
6.1	Anforderungen an Spurerkennung . . . . .	70

6.1.1	Qualitative Anforderungen . . . . .	70
6.1.2	Quantitative Anforderungen . . . . .	71
6.1.3	Konsequenzen . . . . .	72
6.2	Abbildung der Fahrspur im Videobild . . . . .	73
6.2.1	Perspektivische Projektion . . . . .	73
6.2.2	Fahrspurskelettlinie . . . . .	74
6.2.3	Nickwinkel, Fahrspurbreite und Vertikalkrümmung . . . . .	76
6.2.4	Die Jacobi-Matrizen . . . . .	80
6.2.5	Genauigkeitsgrenzen . . . . .	82
6.3	Bildverarbeitung zur Fahrspurdetektion . . . . .	83
6.3.1	Steuerung der Kanten- und Liniensuche . . . . .	85
6.3.2	Meßwertselektion . . . . .	86
6.4	Erkennung von Szenenkontext . . . . .	87
6.4.1	Spurmarkierungstyp . . . . .	88
6.4.2	Aus-/Einfahrten . . . . .	88
6.4.3	Gesamtrepräsentation einer Straße . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Fahrzeugmodell und rekursives Schätzverfahren</b>	<b>91</b>
7.1	Dynamisches Modell für Fahrzeugbewegung . . . . .	92
7.1.1	Lateralbewegung . . . . .	92
7.1.2	Nickbewegung . . . . .	95
7.2	Zustandsschätzung durch Kalmanfilter . . . . .	97
<b>IV</b>	<b>Realisierung und Ergebnisse</b>	<b>99</b>
<b>8</b>	<b>Systemarchitektur und Hardware</b>	<b>99</b>

8.1	Voll- und teilautonome Experimentalfahrzeuge . . . . .	100
8.1.1	VaMP . . . . .	100
8.1.2	VaMoRs . . . . .	101
8.1.3	Bei Industriepartnern der UniBwM . . . . .	102
8.2	Das Transputer-Multicluster-System . . . . .	102
8.2.1	Gesamtsystem . . . . .	104
8.2.2	Teilsystem zur Fahrspurerkennung . . . . .	104
8.2.3	Video-Simulationssystem zur Programmentwicklung . . . . .	105
<b>9</b>	<b>Realisierung und Verarbeitungsstruktur</b>	<b>107</b>
9.1	Zustandsinitialisierung . . . . .	107
9.2	Ablauf des rekursiven Schätzverfahrens . . . . .	109
9.2.1	Verschränkte Operatorkommandierung . . . . .	109
9.2.2	Auslösen einer Neu-Initialisierung . . . . .	110
9.2.3	Das Systemrauschen . . . . .	110
9.2.4	Spurwechsel . . . . .	111
<b>10</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>113</b>
10.1	Algorithmenverifikation auf Videoszenen . . . . .	113
10.1.1	Eigenzustand während Spurwechselmanöver . . . . .	114
10.1.2	Nickwinkelschätzung . . . . .	116
10.1.3	Spurbreitenschätzung . . . . .	118
10.1.4	Vertikalkrümmung . . . . .	120
10.1.5	Segmentgenerierung aufgrund Horizontalkrümmung . . . . .	121
10.2	Güte der Schätzergebnisse . . . . .	124
10.2.1	Selbstdiagnose . . . . .	124

10.2.2	Beziehung zur <i>Ground-Truth</i> . . . . .	125
10.3	Langstreckenfahrt München–Odense (DK) u. zurück . . . . .	127
10.3.1	Autobahnstrecke . . . . .	128
10.3.2	Auf Landstraßen durch Dänemark . . . . .	131
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
<b>Anhang</b>		<b>136</b>
<b>A</b>	<b>Verwendete Notation</b>	<b>136</b>
A.1	Symbole . . . . .	136
A.2	Kalmanfilter-Nomenklatur . . . . .	138
A.2.1	Die Meßgleichung . . . . .	138
A.2.2	Die Systemgleichung . . . . .	138
<b>B</b>	<b>Koordinatenkonventionen</b>	<b>140</b>
B.1	Die Norm LN9300 . . . . .	140
B.2	Koordinatensysteme und -transformationen . . . . .	141
B.2.1	Transformationen durch Homogene Koordinaten . . . . .	141
B.2.2	Das Fahrspurkoordinatensystem . . . . .	142
B.2.3	Das Fahrzeugkoordinatensystem . . . . .	143
B.2.4	Das Kamerakoordinatensystem . . . . .	144
<b>C</b>	<b>Klothoidenmathematik</b>	<b>146</b>
C.1	Mathematische Grundlagen . . . . .	146
C.2	Näherungsbeschreibungen . . . . .	148
<b>D</b>	<b>Straßenbau-Richtlinien</b>	<b>151</b>

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	XI
D.1 Horizontale Krümmung . . . . .	151
D.2 Vertikale Krümmung . . . . .	153
D.3 Spurweitenänderung . . . . .	153
<b>E Das Bildverarbeitungstool KRONOS</b>	<b>155</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>Index</b>	<b>171</b>