

Dipl.-Ing. Nikolaus Müller, München

# **Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug**

Reihe **12**: Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. **281**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Umwelterfassung und Fortbewegung . . . . .	1
1.1.1	Ein Beispiel aus dem Bereich der wirbellosen Tiere . . . . .	1
1.1.2	Beispiele aus dem Bereich der Wirbeltiere . . . . .	3
1.1.3	Beispiel Mensch . . . . .	4
1.2	Beitrag der vorliegenden Arbeit . . . . .	6
1.3	Aufbau dieser Arbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1	Autonome Fahrzeuge mit der Fähigkeit zu komplexen Manövern . . . . .	10
2.2	Autonome Fahrzeuge zum Einsatz in gut strukturierter Umgebung . . . . .	13
2.2.1	Aktivitäten in Europa . . . . .	13
2.2.2	Aktivitäten in den USA . . . . .	17
2.2.3	Aktivitäten in Fernost . . . . .	19
2.3	Bildvorverarbeitungstechniken zum Erkennen von Straßen . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Versuchsumgebung und Sensorik</b>	<b>24</b>
3.1	Das Fahrzeug VaMoRs . . . . .	24
3.2	Der Hardware-in-the-loop Simulationskreis . . . . .	25
3.3	Erfassung der Umwelt . . . . .	27
3.3.1	Das Sichtsystem . . . . .	27
3.3.2	Inertialsensoren . . . . .	30
3.3.3	Odometrie und Propriozeption . . . . .	31
3.3.4	GPS . . . . .	31
3.4	Die Aktuatorik . . . . .	34

<b>4</b>	<b>Voraussetzungen zur Navigation in Echtzeit</b>	<b>36</b>
4.1	Erkennen von Form und Bewegung . . . . .	36
4.1.1	Der 4-D-Ansatz . . . . .	36
4.1.2	Zustandsschätzung mittels Kalman-Filter . . . . .	38
4.1.3	Modellbasierte Bildfolgenverarbeitung . . . . .	41
4.1.4	Aktive Blickrichtungssteuerung . . . . .	42
4.2	Wissenshintergrund . . . . .	42
4.2.1	Zeitveränderliches Wissen . . . . .	42
4.2.2	Digitale Landkarten . . . . .	43
4.2.3	Form- und Bewegungsmodelle . . . . .	44
4.3	Spezifische Fähigkeiten . . . . .	44
4.3.1	Spurfahren . . . . .	45
4.3.2	Navigation . . . . .	46
4.4	Systemstruktur . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Manövrieren auf engem Raum</b>	<b>52</b>
5.1	Modellierung der Kurvenfahrt . . . . .	52
5.1.1	Kinematische Begrenzung: Der Wendekreis . . . . .	57
5.2	Fahrzeugvorsteuerung und Regelung . . . . .	58
5.2.1	Festlegen der Bahnkurve . . . . .	58
5.2.2	Fahrzeugführung zur Laufzeit . . . . .	60
5.3	Modellbasierte Bildverarbeitung . . . . .	67
5.3.1	Das Abbildungsmodell . . . . .	67
5.3.2	Entdecken einer Querstraße . . . . .	70
5.3.3	Vermessen der Formparameter des Abzweigs . . . . .	73
5.3.4	Schätzen der Fahrzeugposition relativ zur Querstraße . . . . .	87
5.3.5	Bestimmen des Horizonts im Stillstand . . . . .	91
5.4	Blickrichtungsvorsteuerung und Regelung . . . . .	94
5.4.1	Vorsteuerung der Gierachse . . . . .	95
5.4.2	Vorsteuerung der Nickachse . . . . .	97

5.4.3	Realisierungsaspekte . . . . .	98
5.5	Implementierungsdetails . . . . .	101
5.5.1	Die Programmstruktur . . . . .	101
5.5.2	Betriebsarten des CS Moduls . . . . .	103
5.5.3	Die Schnittstelle zwischen Bildverarbeitungprozeß CS und Fahrzeugführung VC . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Positionsbestimmung durch Sensordatenfusion</b>	<b>106</b>
6.1	Konzeption . . . . .	107
6.1.1	Das Systemmodell . . . . .	107
6.1.2	Das Meßmodell . . . . .	110
6.2	Realisierung . . . . .	114
6.2.1	Positionsschätzung . . . . .	114
6.2.2	Einbindung in das Navigationsprogramm . . . . .	117
6.2.3	Implementierung . . . . .	119
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>120</b>
7.1	Fahrmanöver . . . . .	121
7.2	Positionsbestimmung . . . . .	129
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion</b>	<b>132</b>
<b>A</b>	<b>Nomenklatur</b>	<b>134</b>
A.1	Liste der verwendeten Abkürzungen . . . . .	134
<b>B</b>	<b>Herleitungen</b>	<b>137</b>
B.1	Vorsteuerung der Kurvenfahrt . . . . .	137
B.1.1	Näherungsfehler durch polynomiale Beschreibung . . . . .	137
B.1.2	Das Streckenverhältnis $s$ . . . . .	137
B.2	Die Fahrzeugdynamik . . . . .	140
B.2.1	Fehler durch Linearisierung . . . . .	140
B.2.2	Die Querdynamik des Fahrzeugs . . . . .	141

## VIII

B.2.3	Die Translationsdynamik des Fahrzeugs . . . . .	141
B.2.4	Die Rotationsdynamik um die Hochachse . . . . .	142
B.2.5	Die Rotationsdynamik um die Längs- und Querachse . . . . .	143
B.3	Bildverarbeitungsaspekte . . . . .	144
B.3.1	Lage der Querstraße im Bild . . . . .	144
B.3.2	Richtungsempfindlichkeit der ternären Masken . . . . .	145
B.3.3	Berechnung der Tiefenauflösung . . . . .	145
B.4	Vorsteuerung der Blickrichtung . . . . .	147
B.4.1	Bewegungsunschärfe durch Gieren . . . . .	147
B.4.2	Anfangsentfernung der Vorausschau . . . . .	147
B.4.3	Gierrate in Phase 2 . . . . .	148
B.4.4	Gierrate in Phase 3 bei konstanter Vorausschau . . . . .	149
B.4.5	Gierrate in Phase 3 bei variabler Vorausschau . . . . .	150
B.4.6	Geschwindigkeitsmaximum des Vorausschaupunkts $P_v$ . . . . .	151
B.4.7	Berechnung der Winkel . . . . .	151
B.4.8	Berechnung der Mindestentfernung . . . . .	152