

Andreas Leich

**Ein Beitrag zur Realisierung der  
videobasierten weiträumigen  
Verkehrsbeobachtung**

**TUD***press*

**2006**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Einführung in den Stand der Technik</b>	<b>11</b>
2.1	Begriffe . . . . .	11
2.1.1	Verkehrskenngrößen . . . . .	12
2.1.2	Videobasierte Detektoren und Weiträumigkeit . . . . .	16
2.1.3	Messfehler und ihre Ursachen . . . . .	17
2.2	Anwendungsgebiete . . . . .	18
2.2.1	Steuerung von Lichtsignalanlagen . . . . .	19
2.2.2	Verkehrszählung . . . . .	22
2.2.3	Kalibrierung und Verifikation eines Verkehrsmodells . . . . .	23
2.2.4	Verkehrszustandsbestimmung und Verkehrsbeeinflussung . . . . .	25
2.2.5	Zusammenfassung . . . . .	26
2.3	Weiträumige Verkehrsbeobachtung und Bildverarbeitung . . . . .	27
2.3.1	Begriffe . . . . .	28
2.3.2	Hintergrundvergleich . . . . .	28
2.3.3	Bewegungsbestimmung mit einer diskreten Kostenfunktion . . . . .	31
2.3.4	Kontinuierliche Kostenfunktion und Blendenproblem . . . . .	33
2.3.5	Merkmalsverfolgung . . . . .	34
2.3.6	Regressionsansatz . . . . .	35
2.3.7	Formulierung als Variationsproblem . . . . .	35
2.3.8	Zusammenfassung . . . . .	36
2.4	Lösungsidee und spezielle Aufgabenstellung . . . . .	37

<b>3</b>	<b>Bestimmung der Verkehrsdichte mit der Kontinuitätsgleichung</b>	<b>39</b>
3.1	Die Verkehrsdichte als kontinuierliche Funktion . . . . .	39
3.1.1	Kontinuumshypothese und Kontinuumsapproximation . . . . .	40
3.1.2	Kontinuitätsgleichung . . . . .	40
3.1.3	Approximation der Funktion der lokalen Dichte . . . . .	42
3.1.4	Approximation der Funktion der lokalen Geschwindigkeit . . . . .	45
3.1.5	Zusammenfassung . . . . .	49
3.2	Lösung der Kontinuitätsgleichung . . . . .	49
3.2.1	Numerische Lösung mit einem finiten Differenzenschema . . . . .	50
3.2.2	Das MACCORMACK-Verfahren und Systemstabilität . . . . .	52
3.2.3	Stabilität des MACCORMACK-Verfahrens im Frequenzbereich . . . . .	55
3.2.4	Methode des kleinsten Residuums . . . . .	58
3.2.5	Analytische Lösung mit der Charakteristikenmethode . . . . .	61
3.2.6	Numerische Lösung mit der Charakteristikenmethode . . . . .	65
3.2.7	Zusammenfassung . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Bewegungsbestimmung durch robuste Regression</b>	<b>69</b>
4.1	Der LUCAS-KANADE-Algorithmus . . . . .	70
4.1.1	Bewegungsbestimmung als nichtlineares Ausgleichsproblem . . . . .	70
4.1.2	Auflösungsvermögen bei Verwendung des euklidischen Abstands . . . . .	75
4.1.3	Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses und Abtasttheorem . . . . .	76
4.2	Mehrskalenanalyse im Parameterraum und Konditionsproblem . . . . .	79
4.2.1	Lineare und robuste lineare Regression . . . . .	79
4.2.2	Robuste Fehlerfunktion . . . . .	82
4.2.3	Graduated Non-Convexity zur Lösung des robusten Regressionsproblems . . . . .	84
4.2.4	Einfluss des Grauwertgradienten auf die Kostenfunktion . . . . .	90
4.2.5	Das Konditionsproblem . . . . .	91
4.3	Grundlagen für die Lösung des Konditionsproblems . . . . .	94
4.3.1	Quadratische Form . . . . .	94
4.3.2	Eigenwerte und Eigenvektoren der Hesse-Matrix . . . . .	94
4.3.3	Transformation in eine isotrope quadratische Form . . . . .	96

---

4.3.4	Präkonditionierung . . . . .	99
4.4	Lösung des Konditionsproblems im Zusammenhang mit GNC . . . . .	100
4.4.1	Konditionszahl von Hesse-Matrix und Gleichungssystem . . . . .	100
4.4.2	Robuste Fehlerfunktion und inkrementelle Präkonditionierung . . . . .	104
4.4.3	Regressionsbasierte Bewegungsbestimmung mit Präkonditionierung und GNC . . . . .	107
4.5	Belegungs- und Zählinformation . . . . .	107
4.6	Zusammenfassung . . . . .	114
<b>5</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>115</b>
5.1	Numerische Verfahren zur Lösung der Kontinuitätsgleichung . . . . .	115
5.1.1	Referenzfunktionen . . . . .	115
5.1.2	Implementierung der Lösungsverfahren . . . . .	116
5.1.3	Ergebnisse für die analytische Testfunktion . . . . .	118
5.1.4	Ergebnisse für ein synthetisches und ein reales Fahrmanöver . . . . .	121
5.2	Bewegungsbestimmung und Fahrzeugzählung . . . . .	125
5.2.1	Software zur Durchführung der Experimente . . . . .	125
5.2.2	Bewegungsbestimmung mit und ohne Präkonditionierung anhand eines Beispiels . . . . .	126
5.2.3	Ergebnisse für verschiedene Szenen . . . . .	130
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
<b>A</b>	<b>Mathematische Grundlagen</b>	<b>141</b>
A.1	Mahalanobis-Abstand . . . . .	141
A.2	Hauptachsentransformation . . . . .	144
A.3	Transformation einer quadratischen Form in eine isotrope quadratische Form . . . . .	144
A.4	Spektralkondition für Zerlegungen einer Matrix . . . . .	145
<b>B</b>	<b>B-Spline-Funktionen</b>	<b>148</b>
B.1	B-Spline-Approximation . . . . .	148
B.2	B-Spline-Interpolation . . . . .	149
B.3	Schnelle kubische B-Spline-Approximation . . . . .	151

B.4 Ableitungen der robusten Kostenfunktion für ein überbestimmtes LGS zur Bewegungsbestimmung . . . . . 155