

Dipl.-Ing. Klaus Kohlmann, München

**Über die Konturerkennung  
in biologischen und  
maschinellen Bild-  
verarbeitungssystemen  
unter Verwendung  
der Hilbert-Transformation**

Reihe **10**: Informatik/  
Kommunikationstechnik Nr. **441**

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen der maschinellen Bildverarbeitung .....</b>	<b>5</b>
2.1 Aufbau eines digitalen Bildverarbeitungssystems .....	5
2.2 Einige systemtheoretische Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung .....	7
2.2.1 Zweidimensionale Signale .....	7
2.2.2 Zweidimensionale Spektren .....	9
2.2.3 Zweidimensionale Systeme .....	13
<b>3. Das visuelle System des Menschen .....</b>	<b>16</b>
3.1 Die Anatomie des menschlichen Auges.....	17
3.2 Die Informationsverarbeitung in der Netzhaut .....	20
3.2.1 Die Photorezeptoren .....	23
3.2.2 Die Horizontalzellen .....	24
3.2.3 Die Bipolarzellen.....	25
3.2.4 Die Amakrinzellen .....	29
3.2.5 Die Ganglienzellen .....	29
3.3 Das Sehzentrum im Gehirn .....	30
3.4 Modelle des Sehzentrums für maschinelle Bildverarbeitungsmethoden .....	33
<b>4. Klassische konturorientierte Verfahren zur Kantendetektion.....</b>	<b>36</b>
4.1 Kantenmodelle .....	37
4.2 Differenzoperatoren 1. Ordnung .....	39
4.3 Differenzoperatoren 2. Ordnung .....	42
4.4 „Optimale“ Operatoren .....	43
4.4.1 Der Marr-Hildreth-Operator .....	44
4.4.2 Der Canny-Operator .....	45
4.5 Zusammenfassung.....	47
<b>5. Modellierung visueller Reize aufgrund von Phaseninformation .....</b>	<b>48</b>
5.1 Die Bedeutung der Phaseninformation .....	49
5.2 Eine neue Beschreibungsweise für ideale Dach- und Stufenkanten .....	50
5.3 Die Ausdehnung des Prinzips auf Schattenkonturen .....	53

5.3.1	Wie Schatten entstehen .....	53
5.3.2	Schattenkonturen und Mach-Bänder .....	54
5.3.3	Eine neue Beschreibungsweise für ideale Rampenkanten .....	55
5.4	Die Gewinnung von lokaler Phaseninformation .....	57
5.4.1	Zur Physiologie des menschlichen visuellen Systems .....	57
5.4.2	Die Beschreibung visueller Reize durch Quadratursignale .....	58
5.4.3	Illustration anhand der idealen Kantenmodelle .....	60
5.5	Eine neue Interpretation visueller Informationen.....	61
<b>6.</b>	<b>Kantendetektion basierend auf der Hilbert-Transformation .....</b>	<b>65</b>
6.1	Die Hilbert-Transformation .....	66
6.1.1	Die kontinuierliche Hilbert-Transformation .....	66
6.1.2	Die diskrete Hilbert-Transformation .....	67
6.1.3	Das analytische Signal.....	69
6.2	Eindimensionale Kantendetektionsverfahren .....	71
6.2.1	Auf der direkten Faltung beruhende Verfahren.....	71
6.2.2	Auf der schnellen Faltung beruhende Verfahren.....	72
6.2.2.1	Prinzip der schnellen Faltung.....	72
6.2.2.2	Aufwandsabschätzung .....	73
6.2.2.3	Der vollständige Kantendetektionsalgorithmus .....	74
6.2.2.4	Kantendetektion bei Testbildern mit idealen Kanten.....	75
6.2.2.5	Kantendetektion bei realen Bildern .....	77
6.2.2.6	Zusammenfassung und Bewertung .....	81
6.2.3	Erster Ansatz für ein „zweidimensionales“ Kantendetektionsverfahren.....	82
6.2.3.1	Der Kantendetektionsalgorithmus .....	82
6.2.3.2	Kantendetektion bei Testbildern mit idealen Kanten.....	84
6.2.3.3	Kantendetektion bei realen Bildern .....	85
6.2.3.4	Zusammenfassung und Bewertung .....	88
<b>6.3</b>	<b>Die zweidimensionalen Hilbert-Transformationsgleichungen .....</b>	<b>88</b>
6.3.1	Die kontinuierlichen 2D Hilbert-Transformationsgleichungen.....	88
6.3.2	Die diskreten 2D Hilbert-Transformationsgleichungen .....	91
6.4	Zweidimensionale Kantendetektionsverfahren .....	92
6.4.1	Kantendetektion basierend auf 2D analytischen Signalen .....	92

6.4.1.1 Kantendetektion bei Testbildern mit idealen Kanten.....	92
6.4.1.2 Kantendetektion bei realen Bildern .....	94
6.4.1.3 Zusammenfassung und Bewertung .....	96
6.4.2 Kantendetektion basierend auf der Verknüpfung eines Signals mit seinen eindimensionalen Hilberttransformierten .....	96
6.4.2.1 Kantendetektion bei Testbildern mit idealen Kanten.....	98
6.4.2.2 Kantendetektion bei realen Bildern .....	98
6.4.1.3 Zusammenfassung und Bewertung .....	100
<b>7. Die Detektion von Bildmerkmalen mit zweidimensionalen Intensitätsänderungen.....</b>	<b>101</b>
7.1 Überblick über die konventionellen Detektionsverfahren .....	102
7.1.1 Konturorientierte Techniken .....	102
7.1.2 Auf Masken basierende Techniken .....	104
7.1.3 Zusammenfassung und Bewertung.....	106
7.2 Signalorientiertes Detektionsverfahren unter Verwendung der zweidimensionalen Hilbert-Transformation .....	106
7.2.1 Das Detektionsschema .....	107
7.2.2 Die Realisierung der 2D-DHT.....	109
7.2.3 Verhalten des Detektionsverfahrens bei nicht-idealen Signalen .....	110
7.2.4 Schwächen des Verfahrens.....	112
7.2.4.1 Einfluß der Lage des Öffnungswinkels eines Eckpunkts.....	112
7.2.4.2 Einfluß des Abklingens lokaler Maxima der 2D-DHT .....	114
7.3 Vergleich der konventionellen mit dem signalorientierten Detektionsverfahren .....	115
7.3.1 Detektionsergebnisse bei Testbildern mit idealen Sprungkanten.....	115
7.3.2 Detektionsergebnisse bei realen Aufnahmen geometrischer Schablonen .....	119
7.3.3 Detektionsergebnisse bei realen Bildern .....	121
7.3.4 Standardisiertes Testbild .....	123
7.4 Zusammenfassung und Bewertung .....	127
<b>8. Zusammenfassung .....</b>	<b>129</b>
<b>9. Symbolverzeichnis .....</b>	<b>130</b>
<b>10. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>132</b>