

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Digitale Bilder</b>	<b>1</b>
1.1	Programmieren mit Bildern	2
1.2	Bildanalyse und „intelligente“ Verfahren	3
1.3	Arten von digitalen Bildern	4
1.4	Bildaufnahme	4
1.4.1	Das Modell der Lochkamera	4
1.4.2	Die „dünne“ Linse	7
1.4.3	Übergang zum Digitalbild	8
1.4.4	Bildgröße und Auflösung	9
1.4.5	Bildkoordinaten	10
1.4.6	Pixelwerte	10
1.5	Dateiformate für Bilder	13
1.5.1	Raster- vs. Vektordaten	14
1.5.2	Tagged Image File Format (TIFF)	14
1.5.3	Graphics Interchange Format (GIF)	15
1.5.4	Portable Network Graphics (PNG)	16
1.5.5	JPEG	16
1.5.6	Windows Bitmap (BMP)	20
1.5.7	Portable Bitmap Format (PBM)	20
1.5.8	Weitere Dateiformate	20
1.5.9	Bits und Bytes	21
1.6	Aufgaben	23
<b>2</b>	<b>ImageJ</b>	<b>25</b>
2.1	Software für digitale Bilder	26
2.1.1	Software zur Bildbearbeitung	26
2.1.2	Software zur Bildverarbeitung	26
2.2	Eigenschaften von ImageJ	26
2.2.1	Features	28

2.2.2	Interaktive Werkzeuge . . . . .	28
2.2.3	ImageJ-Plugins . . . . .	29
2.2.4	Beispiel-Plugin: „inverter“ . . . . .	30
2.2.5	Plugin My_Inverter_A . . . . .	31
2.2.6	Plugin My_Inverter_B . . . . .	33
2.2.7	PlugIn oder PlugInFilter? . . . . .	33
2.2.8	Ausführen von ImageJ „Commands“ . . . . .	35
2.3	Weitere Informationen zu ImageJ und Java . . . . .	37
2.3.1	Ressourcen für ImageJ . . . . .	38
2.3.2	Programmieren mit Java . . . . .	38
2.4	Aufgaben . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Histogramme . . . . .</b>	<b>41</b>
3.1	Was ist ein Histogramm? . . . . .	42
3.2	Was ist aus Histogrammen abzulesen? . . . . .	43
3.2.1	Eigenschaften der Bildaufnahme . . . . .	44
3.2.2	Bildfehler . . . . .	46
3.3	Berechnung von Histogrammen . . . . .	47
3.4	Histogramme für Bilder mit mehr als 8 Bit . . . . .	50
3.4.1	Binning . . . . .	50
3.4.2	Beispiel . . . . .	50
3.4.3	Implementierung . . . . .	51
3.5	Histogramme von Farbbildern . . . . .	52
3.5.1	Luminanzhistogramm . . . . .	52
3.5.2	Histogramme der Farbkomponenten . . . . .	52
3.5.3	Kombinierte Farbhistogramme . . . . .	52
3.6	Das kumulative Histogramm . . . . .	54
3.7	Statistische Informationen aus dem Histogramm . . . . .	54
3.7.1	Mittelwert und Varianz . . . . .	55
3.7.2	Median . . . . .	56
3.8	Aufgaben . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Punktoperationen . . . . .</b>	<b>59</b>
4.1	Änderung der Bildintensität . . . . .	60
4.1.1	Kontrast und Helligkeit . . . . .	60
4.1.2	Beschränkung der Ergebniswerte ( <i>clamping</i> ) . . . . .	60
4.1.3	Invertieren von Bildern . . . . .	61
4.1.4	Schwellwertoperation ( <i>thresholding</i> ) . . . . .	61
4.2	Punktoperationen und Histogramme . . . . .	62
4.3	Automatische Kontrastanpassung . . . . .	63
4.4	Modifizierte Auto-Kontrast-Funktion . . . . .	64
4.5	Linearer Histogrammausgleich . . . . .	66
4.6	Histogrammanpassung . . . . .	69
4.6.1	Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten . . . . .	69
4.6.2	Prinzip der Histogrammanpassung . . . . .	71
4.6.3	Stückweise lineare Referenzverteilung . . . . .	71
4.6.4	Anpassung an ein spezifisches Histogramm . . . . .	73

4.6.5	Beispiel 1: Stückweise lineare Verteilungsfunktion . . . . .	75
4.6.6	Beispiel 2: Gaußförmiges Referenzhistogramm . . . . .	77
4.6.7	Beispiel 3: Histogrammanpassung an ein zweites Bild . . . . .	77
4.7	Gammakorrektur . . . . .	78
4.7.1	Warum Gamma? . . . . .	79
4.7.2	Mathematische Definition . . . . .	80
4.7.3	Reale Gammawerte . . . . .	80
4.7.4	Anwendung der Gammakorrektur . . . . .	82
4.7.5	Implementierung . . . . .	83
4.7.6	Modifizierte Gammakorrektur . . . . .	83
4.8	Punktoperationen in ImageJ . . . . .	86
4.8.1	Punktoperationen mit Lookup-Tabellen . . . . .	86
4.8.2	Arithmetische Standardoperationen . . . . .	87
4.8.3	Punktoperationen mit mehreren Bildern . . . . .	87
4.8.4	ImageJ-Plugins für mehrere Bilder . . . . .	89
4.9	Aufgaben . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Filter . . . . .</b>	<b>93</b>
5.1	Was ist ein Filter? . . . . .	93
5.2	Lineare Filter . . . . .	95
5.2.1	Die Filtermatrix . . . . .	95
5.2.2	Anwendung des Filters . . . . .	96
5.2.3	Berechnung der Filteroperation . . . . .	97
5.2.4	Beispiele für Filter-Plugins . . . . .	98
5.2.5	Ganzzahlige Koeffizienten . . . . .	99
5.2.6	Filter beliebiger Größe . . . . .	101
5.2.7	Arten von linearen Filtern . . . . .	102
5.3	Formale Eigenschaften linearer Filter . . . . .	105
5.3.1	Lineare Faltung . . . . .	105
5.3.2	Eigenschaften der linearen Faltung . . . . .	106
5.3.3	Separierbarkeit von Filtern . . . . .	108
5.3.4	Impulsantwort eines linearen Filters . . . . .	110
5.4	Nichtlineare Filter . . . . .	111
5.4.1	Minimum- und Maximum-Filter . . . . .	112
5.4.2	Medianfilter . . . . .	113
5.4.3	Gewichtetes Medianfilter . . . . .	114
5.4.4	Andere nichtlineare Filter . . . . .	117
5.5	Implementierung von Filtern . . . . .	118
5.5.1	Effizienz von Filterprogrammen . . . . .	118
5.5.2	Behandlung der Bildränder . . . . .	118
5.5.3	Debugging von Filterprogrammen . . . . .	119
5.6	Filteroperationen in ImageJ . . . . .	120
5.6.1	Lineare Filter . . . . .	121
5.6.2	Gaußfilter . . . . .	121
5.6.3	Nichtlineare Filter . . . . .	122
5.7	Aufgaben . . . . .	122

<b>6</b>	<b>Kanten und Konturen</b>	125
6.1	Wie entsteht eine Kante?	125
6.2	Gradienten-basierte Kantendetektion	126
6.2.1	Partielle Ableitung und Gradient	127
6.2.2	Ableitungsfilter	127
6.3	Einfache Kantenoperatoren	129
6.3.1	Prewitt- und Sobel-Operator	129
6.3.2	Roberts-Operator	131
6.3.3	Kompass-Operatoren	131
6.3.4	Kantenoperatoren in ImageJ	134
6.4	Weitere Kantenoperatoren	135
6.4.1	Kantendetektion mit zweiten Ableitungen	135
6.4.2	Kanten auf verschiedenen Skalenebenen	135
6.4.3	Von Kanten zu Konturen	136
6.5	Der Canny-Kantenoperator	137
6.5.1	Vorverarbeitung	138
6.5.2	Lokalisierung der Kanten	140
6.5.3	Kantenverfolgung mit Hysterese-Schwellwert	141
6.5.4	Weitere Informationen zum Canny-Operator	143
6.5.5	Implementierung	145
6.6	Kantenschärfung	145
6.6.1	Kantenschärfung mit dem Laplace-Filter	145
6.6.2	Unscharfe Maskierung ( <i>unsharp masking</i> )	149
6.7	Aufgaben	152
<b>7</b>	<b>Auffinden von Eckpunkten</b>	155
7.1	„Points of interest“	155
7.2	Harris-Detektor	156
7.2.1	Lokale Strukturmatrix	156
7.2.2	<i>Corner Response Function</i> (CRF)	157
7.2.3	Bestimmung der Eckpunkte	158
7.2.4	Beispiele	158
7.3	Implementierung	158
7.3.1	Schritt 1 – Berechnung der <i>corner response function</i>	160
7.3.2	Schritt 2 – Bestimmung der Eckpunkte	164
7.3.3	Schritt 3: Aufräumen	166
7.3.4	Zusammenfassung	167
7.4	Aufgaben	168
<b>8</b>	<b>Detection einfacher Kurven</b>	169
8.1	Auffällige Strukturen	169
8.2	Hough-Transformation	170
8.2.1	Parameterraum	171
8.2.2	Akkumulator	173
8.2.3	Eine bessere Geradenparametrisierung	173
8.3	Hough-Algorithmus	175

8.3.1	Auswertung des Akkumulators . . . . .	176
8.3.2	Erweiterungen der Hough-Transformation . . . . .	180
8.3.3	Schnittpunkte von Geraden . . . . .	182
8.4	Implementierung . . . . .	184
8.5	Hough-Transformation für konische Kurven . . . . .	186
8.5.1	Kreise und Kreisbögen . . . . .	186
8.5.2	Ellipsen . . . . .	188
8.6	Aufgaben . . . . .	189
<b>9</b>	<b>Morphologische Filter . . . . .</b>	<b>191</b>
9.1	Schrumpfen und wachsen lassen . . . . .	192
9.1.1	Nachbarschaft von Bildelementen . . . . .	193
9.2	Morphologische Grundoperationen . . . . .	193
9.2.1	Das Strukturelement . . . . .	194
9.2.2	Punktmengen . . . . .	194
9.2.3	Dilation . . . . .	195
9.2.4	Erosion . . . . .	196
9.2.5	Formale Eigenschaften von Dilation und Erosion .	197
9.2.6	Design morphologischer Filter . . . . .	198
9.2.7	Anwendungsbeispiel: <i>Outline</i> . . . . .	202
9.3	Zusammengesetzte morphologische Operationen . . . . .	203
9.3.1	Opening . . . . .	203
9.3.2	Closing . . . . .	204
9.3.3	Eigenschaften von Opening und Closing . . . . .	204
9.4	Verdünnung – <i>Thinning</i> . . . . .	205
9.4.1	Thinning-Algorithmus von Zhang und Suen . . . . .	206
9.4.2	Schneller Algorithmus ( <i>fast thinning</i> ) . . . . .	209
9.4.3	Implementierung . . . . .	209
9.4.4	Morphologische Operationen in ImageJ . . . . .	213
9.5	Morphologische Filter für Grauwertbilder . . . . .	215
9.5.1	Strukturelemente . . . . .	215
9.5.2	Dilation und Erosion . . . . .	216
9.5.3	Opening und Closing . . . . .	216
9.5.4	Implementierung . . . . .	217
9.6	Aufgaben . . . . .	219
<b>10</b>	<b>Regionen in Binärbildern . . . . .</b>	<b>223</b>
10.1	Auffinden von Bildregionen . . . . .	224
10.1.1	Regionenmarkierung durch <i>Flood Filling</i> . . . . .	224
10.1.2	Sequentielle Regionenmarkierung . . . . .	228
10.1.3	Regionenmarkierung – Zusammenfassung . . . . .	233
10.2	Konturen von Regionen . . . . .	234
10.2.1	Äußere und innere Konturen . . . . .	235
10.2.2	Kombinierte Regionenmarkierung und Konturfindung . . . . .	236
10.3	Repräsentation einzelner Bildregionen . . . . .	240
10.3.1	Matrix-Repräsentation . . . . .	240

10.3.2 Lauflängenkodierung . . . . .	242
10.3.3 <i>Chain Codes</i> . . . . .	243
10.4 Eigenschaften binärer Bildregionen . . . . .	246
10.4.1 Formmerkmale ( <i>Features</i> ) . . . . .	246
10.4.2 Geometrische Eigenschaften . . . . .	247
10.4.3 Statistische Formeigenschaften . . . . .	250
10.4.4 Momentenbasierte geometrische Merkmale . . . . .	253
10.4.5 Projektionen . . . . .	259
10.4.6 Topologische Merkmale . . . . .	260
10.5 Implementierung . . . . .	261
10.6 Aufgaben . . . . .	262
<b>11 Automatische Schwellwertoperationen . . . . .</b>	<b>267</b>
11.1 Globale, histogrammbasierte Schwellwertoperationen . . . . .	268
11.1.1 Einfache Verfahren zur Bestimmung des Schwellwerts . . . . .	271
11.1.2 Iterative Schwellwertbestimmung (Isodata-Algorithmus) . . . . .	273
11.1.3 Methode von Otsu . . . . .	274
11.1.4 Maximale-Entropie-Methode . . . . .	279
11.1.5 Minimum-Error-Methode . . . . .	283
11.2 Lokale, adaptive Schwellwertbestimmung . . . . .	291
11.2.1 Methode von Bernsen . . . . .	291
11.2.2 Adaptive Schwellwertmethode von Niblack . . . . .	295
11.3 Java-Implementierung . . . . .	304
11.3.1 Globale Schwellwertoperationen . . . . .	304
11.3.2 Adaptive Schwellwertoperationen . . . . .	304
11.4 Zusammenfassung und weitere Quellen . . . . .	307
11.5 Aufgaben . . . . .	308
<b>12 Farbbilder . . . . .</b>	<b>309</b>
12.1 RGB-Farbbilder . . . . .	309
12.1.1 Aufbau von Farbbildern . . . . .	311
12.1.2 Farbbilder in ImageJ . . . . .	314
12.2 Farträume und Farbkonversion . . . . .	322
12.2.1 Umwandlung in Grauwertbilder . . . . .	323
12.2.2 HSV/HSB- und HLS-Farbraum . . . . .	325
12.2.3 TV-Komponentenfarträume: YUV, YIQ und $YC_bC_r$ . . . . .	337
12.2.4 Farträume für den Druck: CMY und CMYK . . . . .	340
12.3 Statistiken von Farbbildern . . . . .	345
12.3.1 Wie viele Farben enthält ein Bild überhaupt? . . . . .	345
12.3.2 Histogramme . . . . .	346
12.4 Aufgaben . . . . .	347

<b>13 Farbquantisierung</b> . . . . .	351
13.1 Skalare Farbquantisierung . . . . .	352
13.2 Vektorquantisierung . . . . .	353
13.2.1 Popularity-Algorithmus . . . . .	354
13.2.2 Median-Cut-Algorithmus . . . . .	354
13.2.3 Octree-Algorithmus . . . . .	355
13.2.4 Weitere Methoden zur Vektorquantisierung . . . . .	359
13.2.5 Implementierung . . . . .	360
13.3 Aufgaben . . . . .	362
<b>14 Colorimetrische Farbräume</b> . . . . .	363
14.1 CIE-Farbräume . . . . .	363
14.1.1 Der CIEXYZ-Farbraum . . . . .	364
14.1.2 $xy$ -Chromazitätsdiagramm . . . . .	364
14.1.3 Normbeleuchtung . . . . .	367
14.1.4 Gamut . . . . .	367
14.1.5 Varianten des CIE-Farbraums . . . . .	368
14.1.6 CIELAB . . . . .	369
14.1.7 CIELUV . . . . .	370
14.1.8 Berechnung von Farbdifferenzen . . . . .	373
14.2 Standard-RGB (sRGB) . . . . .	373
14.2.1 Lineare vs. nichtlineare Farbwerte . . . . .	374
14.2.2 Transformation CIEXYZ $\rightarrow$ sRGB . . . . .	375
14.2.3 Transformation sRGB $\rightarrow$ CIEXYZ . . . . .	375
14.2.4 Rechnen mit sRGB-Werten . . . . .	376
14.3 Adobe RGB-Farbraum . . . . .	377
14.4 Chromatische Adaptierung . . . . .	378
14.4.1 XYZ-Skalierung . . . . .	379
14.4.2 Bradford-Adaptierung . . . . .	379
14.5 Colorimetrische Farbräume in Java . . . . .	380
14.5.1 <i>Profile Connection Space</i> (PCS) . . . . .	381
14.5.2 Relevante Java-Klassen . . . . .	384
14.5.3 Implementierung des CIELAB-Farbraums (Beispiel) . . . . .	385
14.5.4 ICC-Profile . . . . .	386
14.6 Aufgaben . . . . .	389
<b>15 Filter für Farbbilder</b> . . . . .	391
15.1 Lineare Filter . . . . .	391
15.1.1 Monochromatische Anwendung linearer Filter . . . . .	392
15.1.2 Einfluss des verwendeten Farbraums . . . . .	395
15.1.3 Lineare Filteroperationen bei zyklischen Komponenten . . . . .	399
15.2 Nichtlineare Filter für Farbbilder . . . . .	403
15.2.1 Skalares Medianfilter . . . . .	403
15.2.2 Vektor-Medianfilter . . . . .	404
15.2.3 Schärfendes Vektor-Medianfilter . . . . .	408

15.3 Java-Implementation .....	412
15.4 Weiterführende Literatur .....	415
15.5 Aufgaben .....	416
<b>16 Kanten in Farbbildern .....</b>	<b>417</b>
16.1 Monochromatische Methoden .....	418
16.2 Kanten aus vektorwertigen Bilddaten .....	423
16.2.1 Mehrdimensionale Gradienten .....	424
16.2.2 Die Jacobi-Matrix .....	424
16.2.3 Quadratischer lokaler Kontrast .....	425
16.2.4 Stärke von Farbkanten .....	426
16.2.5 Orientierung von Farbkanten .....	428
16.2.6 Grauwertgradient als Spezialfall .....	431
16.3 Canny-Operator für Farbbilder .....	433
16.4 Andere Farbkantenoperatoren .....	437
16.5 Java-Implementierung .....	438
<b>17 Kantenerhaltende Glättungsfilter .....</b>	<b>441</b>
17.1 Kuwahara-Filter .....	442
17.1.1 Anwendung auf Farbbilder .....	446
17.2 Bilaterales Filter .....	449
17.2.1 Domain-Filter .....	450
17.2.2 Range-Filter .....	450
17.2.3 Bilaterales Filter (allgemein) .....	451
17.2.4 Bilaterales Filter mit gaußförmigen Kernen .....	452
17.2.5 Anwendung auf Farbbilder .....	453
17.2.6 Effiziente Implementierung durch $x/y$ -Separierung .....	459
17.2.7 Weitere Informationen .....	462
17.3 Anisotrope Diffusionsfilter .....	463
17.3.1 Homogene Diffusion und Wärmeleitungsgleichung .....	465
17.3.2 Das Perona-Malik-Filter .....	467
17.3.3 Perona-Malik-Filter für Farbbilder .....	470
17.4 Implementierung .....	475
17.5 Aufgaben .....	476
<b>18 Einführung in Spektraltechniken .....</b>	<b>479</b>
18.1 Fouriertransformation .....	480
18.1.1 Sinus- und Kosinusfunktionen .....	480
18.1.2 Fourierreihen zur Darstellung periodischer Funktionen .....	483
18.1.3 Fourierintegral .....	484
18.1.4 Fourierspektrum und -transformation .....	485
18.1.5 Fourier-Transformationspaare .....	486
18.1.6 Wichtige Eigenschaften der Fouriertransformation .....	487
18.2 Übergang zu diskreten Signalen .....	491
18.2.1 Abtastung .....	491
18.2.2 Diskrete und periodische Funktionen .....	497

<b>18.3 Die diskrete Fouriertransformation (DFT) . . . . .</b>	<b>498</b>
18.3.1 Definition der DFT . . . . .	498
18.3.2 Diskrete Basisfunktionen . . . . .	501
18.3.3 Schon wieder Aliasing! . . . . .	501
18.3.4 Einheiten im Orts- und Spektralraum . . . . .	502
18.3.5 Das Leistungsspektrum . . . . .	506
<b>18.4 Implementierung der DFT . . . . .</b>	<b>507</b>
18.4.1 Direkte Implementierung . . . . .	507
18.4.2 Fast Fourier Transform (FFT) . . . . .	509
<b>18.5 Aufgaben . . . . .</b>	<b>509</b>
<b>19 Diskrete Fouriertransformation in 2D . . . . .</b>	<b>511</b>
19.1 Definition der 2D-DFT . . . . .	511
19.1.1 2D-Basisfunktionen . . . . .	512
19.1.2 Implementierung der zweidimensionalen DFT . . . . .	512
19.2 Darstellung der Fouriertransformierten in 2D . . . . .	513
19.2.1 Wertebereich . . . . .	516
19.2.2 Zentrierte Darstellung . . . . .	516
19.3 Frequenzen und Orientierung in 2D . . . . .	516
19.3.1 Effektive Frequenz . . . . .	517
19.3.2 Frequenzlimits und Aliasing in 2D . . . . .	518
19.3.3 Orientierung . . . . .	519
19.3.4 Geometrische Normalisierung des 2D-Spektrums . . . . .	519
19.3.5 Auswirkungen der Periodizität . . . . .	520
19.3.6 <i>Windowing</i> . . . . .	520
19.3.7 Gängige Fensterfunktionen . . . . .	522
19.4 Beispiele für Fouriertransformierte in 2D . . . . .	527
19.4.1 Skalierung . . . . .	527
19.4.2 Periodische Bildmuster . . . . .	527
19.4.3 Drehung . . . . .	527
19.4.4 Gerichtete, längliche Strukturen . . . . .	527
19.4.5 Natürliche Bilder . . . . .	527
19.4.6 Druckraster . . . . .	527
19.5 Anwendungen der DFT . . . . .	531
19.5.1 Lineare Filteroperationen im Spektralraum . . . . .	531
19.5.2 Lineare Faltung und Korrelation . . . . .	532
19.5.3 Inverse Filter . . . . .	533
19.6 Aufgaben . . . . .	534
<b>20 Diskrete Kosinustransformation (DCT) . . . . .</b>	<b>535</b>
20.1 Eindimensionale DCT . . . . .	535
20.1.1 Basisfunktionen der DCT . . . . .	536
20.1.2 Implementierung der eindimensionalen DCT . . . . .	536
20.2 Zweidimensionale DCT . . . . .	538
20.2.1 Beispiele . . . . .	539
20.2.2 Separierbarkeit . . . . .	539
20.3 Implementierung . . . . .	542

20.4 Weitere Spektraltransformationen . . . . .	543
20.5 Aufgaben . . . . .	543
<b>21 Geometrische Bildoperationen . . . . .</b>	<b>545</b>
21.1 2D-Koordinatentransformation . . . . .	546
21.1.1 Einfache geometrische Abbildungen . . . . .	547
21.1.2 Homogene Koordinaten . . . . .	548
21.1.3 Affine Abbildung (Dreipunkt-Abbildung) . . . . .	548
21.1.4 Projektive Abbildung (Vierpunkt-Abbildung) . . . . .	551
21.1.5 Bilineare Abbildung . . . . .	556
21.1.6 Weitere nichtlineare Bildtransformationen . . . . .	557
21.1.7 Lokale Transformationen . . . . .	559
21.2 Resampling . . . . .	560
21.2.1 <i>Source-to-Target Mapping</i> . . . . .	561
21.2.2 <i>Target-to-Source Mapping</i> . . . . .	562
21.3 Java-Implementierung . . . . .	563
21.3.1 Lineare Abbildungen . . . . .	564
21.3.2 Nichtlineare Abbildungen . . . . .	564
21.3.3 Anwendungsbeispiele . . . . .	564
21.4 Aufgaben . . . . .	565
<b>22 Interpolation . . . . .</b>	<b>569</b>
22.1 Einfache Interpolationsverfahren . . . . .	569
22.1.1 „Ideale“ Interpolation . . . . .	570
22.2 Interpolation als Faltung . . . . .	574
22.3 Kubische Interpolation . . . . .	574
22.4 Spline-Interpolation . . . . .	576
22.4.1 Catmull-Rom-Interpolation . . . . .	577
22.4.2 Kubische B-Spline-Interpolation . . . . .	578
22.4.3 Mitchell-Netravali-Approximation . . . . .	578
22.5 Lanczos-Interpolation . . . . .	579
22.6 Interpolation in 2D . . . . .	582
22.6.1 Nearest-Neighbor-Interpolation in 2D . . . . .	582
22.6.2 Bilineare Interpolation . . . . .	583
22.6.3 Bikubische und Spline-Interpolation in 2D . . . . .	584
22.6.4 Lanczos-Interpolation in 2D . . . . .	586
22.6.5 Beispiele und Diskussion . . . . .	587
22.7 Aliasing . . . . .	588
22.7.1 Abtastung der rekonstruierten Bildfunktion . . . . .	589
22.7.2 Tiefpassfilter . . . . .	591
22.8 Java-Implementierung . . . . .	592
22.9 Aufgaben . . . . .	594

<b>23</b>	<b>Bildvergleich</b>	597
23.1	Template Matching in Intensitätsbildern	598
23.1.1	Abstand zwischen Bildmustern	599
23.1.2	Umgang mit Drehungen und Größenänderungen	607
23.1.3	Implementierung	607
23.2	Vergleich von Binärbildern	607
23.2.1	Direkter Vergleich von Binärbildern	609
23.2.2	Die Distanztransformation	610
23.2.3	<i>Chamfer Matching</i>	613
23.2.4	Implementierung	617
23.3	Aufgaben	617
<b>24</b>	<b>Elastischer Bildvergleich</b>	619
24.1	Das Lucas-Kanade-Verfahren	619
24.1.1	Registrierung in 1D	620
24.1.2	Erweiterung auf mehrdimensionale Funktionen	621
24.2	Lucas-Kanade-Algorithmus	622
24.2.1	Zusammenfassung des Algorithmus	626
24.3	<i>Inverse-Compositional</i> -Algorithmus	627
24.4	Parametereinstellungen für verschiedene lineare Transformationen	630
24.4.1	Translation	630
24.4.2	Affine Transformation	633
24.4.3	Projektive Transformation	634
24.4.4	Verkettung linearer Transformationen	635
24.5	Beispiel	636
24.6	Java-Implementierung	637
24.6.1	Anwendungsbeispiel	640
24.7	Aufgaben	640
<b>25</b>	<b>Skaleninvariante Bildmerkmale (SIFT)</b>	643
25.1	Merkmalspunkte auf verschiedenen Skalenebenen	644
25.1.1	Das Laplace-Gauß-Filter (LoG)	645
25.1.2	Approximation der LoG-Funktion durch die Differenz zweier Gaußfunktionen (DoG)	648
25.1.3	Der Gauß-Skalenraum	650
25.1.4	LoG/DoG-Skalenraum	655
25.1.5	Hierarchischer Skalenraum	656
25.1.6	Der Skalenraum im SIFT-Verfahren	662
25.2	Lokalisierung von Merkmalspunkten	664
25.2.1	Detektion von Extremwerten im DoG-Skalenraum	666
25.2.2	Verfeinerung der Position	670
25.2.3	Unterdrückung kantenartiger Bildstrukturen	673
25.3	Berechnung der lokalen Deskriptoren	675
25.3.1	Bestimmung der dominanten Orientierungen	675
25.3.2	Konstruktion des SIFT-Descriptors	680
25.4	SIFT-Algorithmus – Zusammenfassung	688

25.5	Vergleich von SIFT-Merkmalen . . . . .	698
25.5.1	Bestimmung der Ähnlichkeit von Merkmalen . . . . .	698
25.5.2	Beispiele . . . . .	699
25.6	Effiziente Zuordnung von Merkmalen . . . . .	704
25.7	SIFT-Implementierung in Java . . . . .	706
25.7.1	Detektion von SIFT-Merkmalen . . . . .	706
25.7.2	Zuordnung von SIFT-Merkmalen . . . . .	707
25.8	Aufgaben . . . . .	708
<b>A</b>	<b>Mathematische Notation . . . . .</b>	711
A.1	Symbole . . . . .	711
A.2	Operatoren für Mengen . . . . .	715
A.3	Komplexe Zahlen . . . . .	716
A.4	Algorithmische Komplexität und $\mathcal{O}$ -Notation . . . . .	717
<b>B</b>	<b>Ergänzungen zur Algebra . . . . .</b>	719
B.1	Vektoren und Matrizen . . . . .	719
B.1.1	Spalten- und Zeilenvektoren . . . . .	720
B.1.2	Länge (Norm) eines Vektors . . . . .	720
B.2	Matrix-Multiplikation . . . . .	721
B.2.1	Multiplikation mit einem Skalarwert . . . . .	721
B.2.2	Produkt zweier Matrizen . . . . .	721
B.2.3	Matrix-Vektor-Produkt . . . . .	721
B.3	Vektor-Produkte . . . . .	722
B.3.1	Skalarprodukt . . . . .	722
B.3.2	Äußeres Product . . . . .	723
B.3.3	Kreuzprodukt . . . . .	723
B.4	Eigenvektoren und Eigenwerte . . . . .	724
B.4.1	Berechnung von Eigenwerten . . . . .	725
<b>C</b>	<b>Ergänzungen zur Analysis . . . . .</b>	729
C.1	Quadratische Interpolation (1D) . . . . .	729
C.1.1	Parabolische Funktion durch drei Stützstellen . . . . .	729
C.1.2	Extrempunkte durch quadratische Interpolation . . . . .	730
C.2	Skalar- und Vektorfelder . . . . .	732
C.2.1	Jacobi-Matrix . . . . .	732
C.2.2	Gradient . . . . .	733
C.2.3	Divergenz . . . . .	734
C.2.4	Laplace-Operator . . . . .	734
C.2.5	Hesse-Matrix . . . . .	735
C.3	Operationen auf mehrdimensionale, skalarwertige Funktionen (skalare Felder) . . . . .	736
C.3.1	Ableitungen einer diskreten Funktion . . . . .	736
C.3.2	Taylorentwicklung von Funktionen . . . . .	737
C.3.3	Bestimmung lokaler Extrema von mehrdimensionalen Funktionen . . . . .	741

<b>D</b>	<b>Ergänzungen zur Statistik</b>	747
D.1	Mittelwert, Varianz und Kovarianz	747
D.2	Kovarianzmatrix	748
D.3	Die Normal- oder Gaußverteilung	750
D.3.1	Maximum-Likelihood-Schätzung	751
D.3.2	Gaußsche Mischmodelle	752
D.3.3	Erzeugung von gaußverteiltem Rauschen	753
<b>E</b>	<b>Gaußfilter</b>	755
E.1	Kaskadierung von Gaußfiltern	755
E.2	Gaußfilter und Skalenraum	756
E.3	Auswirkungen des Gaußfilters im Spektralraum	756
E.4	LoG/DoG-Approximation	757
<b>F</b>	<b>Java-Notizen</b>	759
F.1	Arithmetik	759
F.1.1	Ganzzahlige Division	759
F.1.2	Modulo-Operator	761
F.1.3	Unsigned Bytes	761
F.1.4	Mathematische Funktionen (Math-Klasse)	762
F.1.5	Numerisches Runden	763
F.1.6	Inverse Tangensfunktion	764
F.1.7	Float und Double (Klassen)	764
F.2	Arrays in Java	764
F.2.1	Arrays erzeugen	764
F.2.2	Größe von Arrays	765
F.2.3	Zugriff auf Array-Elemente	765
F.2.4	Zweidimensionale Arrays	766
F.2.5	Arrays von Objekten	769
F.2.6	Sortieren von Arrays	769
	<b>Literaturverzeichnis</b>	771
	<b>Sachverzeichnis</b>	785