

Wilhelm Burger • Mark James Bürge

Digitale Bildverarbeitung

Eine Einführung mit Java und ImageJ

2., überarbeitete Auflage
Mit 255 Abbildungen und 16 Tabellen

4Q Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Crunching Pixels	1
1.1	Programmieren mit Bildern	2
1.2	Bildanalyse und „intelligente“ Verfahren	3
2	Digitale Bilder	5
2.1	Arten von digitalen Bildern	5
2.2	Bildaufnahme	5
2.2.1	Das Modell der Lochkamera	5
2.2.2	Die „dünne“ Linse	8
2.2.3	Übergang zum Digitalbild	9
2.2.4	Bildgröße und Auflösung	10
2.2.5	Bildkoordinaten	11
2.2.6	Pixelwerte	12
2.3	Dateiformate für Bilder	14
2.3.1	Raster- vs. Vektordaten	15
2.3.2	Tagged Image File Format (TIFF)	15
2.3.3	Graphics Interchange Format (GIF)	16
2.3.4	Portable Network Graphics (PNG)	17
2.3.5	JPEG	17
2.3.6	Windows Bitmap (BMP)	21
2.3.7	Portable Bitmap Format (PBM)	21
2.3.8	Weitere Dateiformate	22
2.3.9	Bits und Bytes	22
2.4	Aufgaben	24
3	ImageJ	27
3.1	Software für digitale Bilder	28
3.1.1	Software zur Bildbearbeitung	28
3.1.2	Software zur Bildverarbeitung	28

INHALTSVERZEICHNIS	3.2	Eigenschaften von ImageJ.	28
	3.2.1	Features.	29
	3.2.2	Fertige Werkzeuge.	30
	3.2.3	ImageJ-Plugins.	31
	3.2.4	Beispiel-Plugin: „inverter“.	32
	3.3	Weitere Informationen zu ImageJ und Java	35
	3.3.1	Ressourcen für ImageJ.	35
	3.3.2	Programmieren mit Java	35
	3.4	Aufgaben	36
4	Histogramme	39
4.1	Was ist ein Histogramm?	39	
4.2	Was ist aus Histogrammen abzulesen?	41	
4.2.1	Eigenschaften der Bildaufnahme.	41	
4.2.2	Bildfehler.	43	
4.3	Berechnung von Histogrammen.	46	
4.4	Histogramme für Bilder mit mehr als 8 Bit	48	
4.4.1	Binning.	48	
4.4.2	Beispiel.	48	
4.4.3	Implementierung.	49	
4.5	Histogramme von Farbbildern.	49	
4.5.1	Luminanzhistogramm.	49	
4.5.2	Histogramme der Farbkomponenten.	50	
4.5.3	Kombinierte Farbhistogramme.	50	
4.6	Das kumulative Histogramm.	52	
4.7	Aufgaben.	52	
5	Punktoperationen	55
5.1	Änderung der Bildintensität	56	
5.1.1	Kontrast und Helligkeit	56	
5.1.2	Beschränkung der Ergebniswerte (<i>clamping</i>).	56	
5.1.3	Invertieren von Bildern.	57	
5.1.4	Schwellwertoperation (<i>thresholding</i>).	57	
5.2	Punktoperationen und Histogramme.	58	
5.3	Automatische Kontrastanpassung.	59	
5.4	Linearer Histogrammausgleich.	61	
5.5	Histogrammanpassung	65	
5.5.1	Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten.	65	
5.5.2	Prinzip der Histogrammanpassung	66	
5.5.3	Stückweise lineare Referenzverteilung	67	
5.5.4	Anpassung an ein konkretes Histogramm.	68	
5.5.5	Beispiele.	70	
5.6	Gammakorrektur.	74	
5.6.1	Warum Gamma?	74	
5.6.2	Die Gammafunktion.	75	
5.6.3	Reale Gammawerte.	76	
5.6.4	Anwendung der Gammakorrektur.	77	

5.6.5	Implementierung	78
5.6.6	Modifizierte Gammafunktion	78
5.7	Punktoperationen in ImageJ	81
5.7.1	Punktoperationen mit Lookup-Tabellen	81
5.7.2	Arithmetische Standardoperationen	82
5.7.3	Punktoperationen mit mehreren Bildern	83
5.7.4	ImageJ-Plugins für mehrere Bilder	84
5.8	Aufgaben	85
Filter		
6.1	Was ist ein Filter?	89
6.2	Lineare Filter	91
6.2.1	Die Filtermatrix	91
6.2.2	Anwendung des Filters	92
6.2.3	Berechnung der Filteroperation	93
6.2.4	Beispiele für Filter-Plugins	94
6.2.5	Ganzzahlige Koeffizienten	95
6.2.6	Filter beliebiger Größe	97
6.2.7	Arten von linearen Filtern	98
6.3	Formale Eigenschaften linearer Filter	101
6.3.1	Lineare Faltung	101
6.3.2	Eigenschaften der linearen Faltung	102
6.3.3	Separierbarkeit von Filtern	103
6.3.4	Impulsantwort eines Filters	105
6.4	Nichtlineare Filter	106
6.4.1	Minimum- und Maximum-Filter	107
6.4.2	Medianfilter	108
6.4.3	Das gewichtete Medianfilter	109
6.4.4	Andere nichtlineare Filter	111
6.5	Implementierung von Filtern	112
6.5.1	Effizienz von Filterprogrammen	112
6.5.2	Behandlung der Bildränder	113
6.6	Filteroperationen in ImageJ	113
6.6.1	Lineare Filter	113
6.6.2	Gauß-Filter	115
6.6.3	Nichtlineare Filter	115
6.7	Aufgaben	115
Kanten und Konturen		
7.1	Wie entsteht eine Kante?	117
7.2	Gradienten-basierte Kantendetektion	118
7.2.1	Partielle Ableitung und Gradient	119
7.2.2	Ableitungsfiler	120
7.3	Filter zur Kantendetektion	120
7.3.1	Prewitt- und Sobel-Operator	120
7.3.2	Roberts-Operator	123
7.3.3	Kompass-Operatoren	124

7.3.4	Kantenoperatoren in ImageJ	125
7.4	Weitere Kantenoperatoren	125
7.4.1	Kantendetektion mit zweiten Ableitungen	125
7.4.2	Kanten auf verschiedenen Skalenebenen	126
7.4.3	Canny-Filter	126
7.5	Von Kanten zu Konturen	128
7.5.1	Konturen verfolgen	128
7.5.2	Kantenbilder	129
7.6	Kantenschärfung	129
7.6.1	Kantenschärfung mit dem Laplace-Filter	130
7.6.2	Unschärfe Maskierung (<i>unsharp masking</i>)	132
7.7	Aufgaben	136
8	Auffinden von Eckpunkten	139
8.1	„Points of interest“	139
8.2	Harris-Detektor	140
8.2.1	Lokale Strukturmatrix	140
8.2.2	<i>Corner Response Function</i> (CRF)	141
8.2.3	Bestimmung der Eckpunkte	142
8.2.4	Beispiele	142
8.3	Implementierung	142
8.3.1	Schritt 1 - Berechnung der <i>corner response function</i>	143
8.3.2	Schritt 2 - Bestimmung der Eckpunkte	148
8.3.3	Anzeigen der Eckpunkte	151
8.3.4	Zusammenfassung	152
8.4	Aufgaben	153
9	Detektion einfacher Kurven	155
9.1	Auffällige Strukturen	155
9.2	Hough-Transformation	156
9.2.1	Parameterraum	157
9.2.2	Akkumulator-Array	159
9.2.3	Eine bessere Geradenparametrisierung	159
9.3	Implementierung der Hough-Transformation	160
9.3.1	Füllen des Akkumulator-Arrays	161
9.3.2	Auswertung des Akkumulator-Arrays	163
9.3.3	Erweiterungen der Hough-Transformation	164
9.4	Hough-Transformation für Kreise und Ellipsen	167
9.4.1	Kreise und Kreisbögen	167
9.4.2	Ellipsen	168
9.5	Aufgaben	169

10 Morphologische Filter	171
10.1 Schrumpfen und wachsen lassen	172
10.1.1 Nachbarschaft von Bildelementen	173
10.2 Morphologische Grundoperationen	174
10.2.1 Das Strukturelement	174
10.2.2 Punktmengen	174
10.2.3 Dilation	175
10.2.4 Erosion	176
10.2.5 Eigenschaften von Dilation und Erosion	176
10.2.6 Design morphologischer Filter	177
10.2.7 Anwendungsbeispiel: <i>Outline</i>	178
10.3 Zusammengesetzte Operationen	179
10.3.1 Opening	179
10.3.2 Closing	182
10.3.3 Eigenschaften von Opening und Closing	182
10.4 Morphologische Filter für Grauwert- und Farbbilder	182
10.4.1 Strukturelemente	183
10.4.2 Grauwert-Dilation und -Erosion	184
10.4.3 Grauwert-Opening und -Closing	185
10.5 Implementierung morphologischer Filter	186
10.5.1 Binäre Bilder in ImageJ	186
10.5.2 Dilation und Erosion	187
10.5.3 Opening und Closing	189
10.5.4 <i>Outline</i>	190
10.5.5 Morphologische Operationen in ImageJ	190
10.6 Aufgaben	192
11 Regionen in Binärbildern	195
11.1 Auffinden von Bildregionen	196
11.1.1 Regionenmarkierung durch <i>Flood Filling</i>	196
11.1.2 Sequentielle Regionenmarkierung	200
11.1.3 Regionenmarkierung - Zusammenfassung	206
11.2 Konturen von Regionen	206
11.2.1 Äußere und innere Konturen	206
11.2.2 Kombinierte Regionenmarkierung und Konturfindung	208
11.2.3 Implementierung	209
11.2.4 Beispiele	212
11.3 Repräsentation von Bildregionen	214
11.3.1 Matrix-Repräsentation	214
11.3.2 Lauflängenkodierung	214
11.3.3 <i>Chain Codes</i>	215
11.4 Eigenschaften binärer Bildregionen	218
11.4.1 Formmerkmale [<i>Features</i>]	218
11.4.2 Geometrische Eigenschaften	219
11.4.3 Statistische Formeigenschaften	222
11.4.4 Momentenbasierte geometrische Merkmale	224

11.4.5	Projektionen	228
11.4.6	Topologische Merkmale	229
11.5	Aufgaben	229
12	Farbbilder	233
12.1	RGB-Farbbilder	233
12.1.1	Aufbau von Farbbildern	235
12.1.2	Farbbilder in ImageJ	237
12.2	Farbräume und Farbkonversion	248
12.2.1	Umwandlung in Grauwertbilder	249
12.2.2	Desaturierung von Farbbildern	251
12.2.3	HSV/HSB- und HLS-Farbraum	253
12.2.4	TV-Komponentenfarbräume - YUV, YIQ und $YCbCr$	262
12.2.5	Farbräume für den Druck - CMY und CMYK	266
12.3	Colorimetrische Farbräume	270
12.3.1	CIE-Farbräume	271
12.3.2	CIE $L^*a^*b^*$	276
12.3.3	sRGB	278
12.3.4	Adobe RGB	282
12.3.5	Farben und Farbräume in Java	283
12.4	Statistiken von Farbbildern	288
12.4.1	Wie viele Farben enthält ein Bild?	288
12.4.2	Histogramme	288
12.5	Farbquantisierung	289
12.5.1	Skalare Farbquantisierung	292
12.5.2	Vektorquantisierung	293
12.6	Aufgaben	297
13	Einführung in Spektraltechniken	299
13.1	Die Fouriertransformation	300
13.1.1	Sinus- und Kosinusfunktionen	300
13.1.2	Fourierreihen als Darstellung periodischer Funktionen	303
13.1.3	Fourierintegral	304
13.1.4	Fourierspektrum und -transformation	305
13.1.5	Fourier-Transformationspaare	306
13.1.6	Wichtige Eigenschaften der Fouriertransformation	307
13.2	Übergang zu diskreten Signalen	311
13.2.1	Abtastung	311
13.2.2	Diskrete und periodische Funktionen	317
13.3	Die diskrete Fouriertransformation (DFT)	317
13.3.1	Definition der DFT	319
13.3.2	Diskrete Basisfunktionen	320
13.3.3	Schon wieder Aliasing!	321
13.3.4	Einheiten im Orts- und Spektralraum	324
13.3.5	Das Leistungsspektrum	326

13.4	Implementierung der DFT	326	INHALTSVERZEICHNIS
13.4.1	Direkte Implementierung	326	
13.4.2	Fast Fourier Transform (FFT)	328	
13.5	Aufgaben	329	
14	Diskrete Fouriertransformation in 2D	331	
14.1	Definition der 2D-DFT	331	
14.1.1	2D-Basisfunktionen	332	
14.1.2	Implementierung der zweidimensionalen DFT	332	
14.2	Darstellung der Fouriertransformierten in 2D	333	
14.2.1	Wertebereich	333	
14.2.2	Zentrierte Darstellung	336	
14.3	Frequenzen und Orientierung in 2D	337	
14.3.1	Effektive Frequenz	337	
14.3.2	Frequenzlimits und Aliasing in 2D	338	
14.3.3	Orientierung	338	
14.3.4	Geometrische Korrektur des 2D-Spektrums	339	
14.3.5	Auswirkungen der Periodizität	340	
14.3.6	<i>Windowing</i>	340	
14.3.7	Fensterfunktionen	342	
14.4	Beispiele für Fouriertransformierte in 2D	347	
14.4.1	Skalierung	347	
14.4.2	Periodische Bildmuster	347	
14.4.3	Drehung	347	
14.4.4	Gerichtete, längliche Strukturen	347	
14.4.5	Natürliche Bilder	347	
14.4.6	Druckraster	347	
14.5	Anwendungen der DFT	351	
14.5.1	Lineare Filteroperationen im Spektralraum	351	
14.5.2	Lineare Faltung und Korrelation	352	
14.5.3	Inverse Filter	353	
14.6	Aufgaben	354	
15	Die diskrete Kosinustransformation (DCT)	355	
15.1	Eindimensionale DCT	355	
15.1.1	Basisfunktionen der DCT	356	
15.1.2	Implementierung der eindimensionalen DCT	356	
15.2	Zweidimensionale DCT	358	
15.2.1	Separierbarkeit	359	
15.2.2	Beispiele	359	
15.3	Andere Spektraltransformationen	359	
15.4	Aufgaben	361	

INHALTSVERZEICHNIS	16 Geometrische Bildoperationen	363
	16.1 2D-Koordinatentransformation	364
	16.1.1 Einfache Abbildungen	365
	16.1.2 Homogene Koordinaten	365
	16.1.3 Affine Abbildung (Dreipunkt-Abbildung)	366
	16.1.4 Projektive Abbildung (Vierpunkt-Abbildung)	367
	16.1.5 Bilineare Abbildung	372
	16.1.6 Weitere nichtlineare Bildverzerrungen	373
	16.1.7 Lokale Transformationen	376
	16.2 Resampling	377
	16.2.1 <i>Source-to-Target Mapping</i>	378
	16.2.2 <i>Target-to-Source Mapping</i>	378
	16.3 Interpolation	379
	16.3.1 Einfache Interpolationsverfahren	380
	16.3.2 Ideale Interpolation	380
	16.3.3 Interpolation durch Faltung	383
	16.3.4 Kubische Interpolation	383
	16.3.5 Lanczos-Interpolation	385
	16.3.6 Interpolation in 2D	386
	16.3.7 Aliasing	392
	16.4 Java-Implementierung	395
	16.4.1 Geometrische Abbildungen	396
	16.4.2 Pixel-Interpolation	405
	16.4.3 Anwendungsbeispiele	408
	16.5 Aufgaben	410
	17 Bildvergleich	411
	17.1 Template Matching in Intensitätsbildern	412
	17.1.1 Abstand zwischen Bildmustern	413
	17.1.2 Umgang mit Drehungen und Größenänderungen	420
	17.1.3 Implementierung	420
	17.2 Vergleich von Binärbildern	420
	17.2.1 Direkter Vergleich von Binärbildern	421
	17.2.2 Die Distanztransformation	423
	17.2.3 <i>Chamfer Matching</i>	426
	17.3 Aufgaben	430
	A Mathematische Notation	431
	A.1 Häufig verwendete Symbole	431
	A.2 Komplexe Zahlen C	433
	A.3 Algorithmische Komplexität und O-Notation	434
	B Java-Notizen	435
	B.1 Arithmetik	435
	B.1.1 Ganzzahlige Division	435
	B.1.2 Modulo-Operator	437
	B.1.3 Unsigned Bytes	437

B.1.4	Mathematische Funktionen (Math-Klasse)	438
B.1.5	Runden	439
B.1.6	Inverse Tangensfunktion	439
B.1.7	Float und Double (Klassen)	439
B.2	Arrays in Java	440
B.2.1	Arrays erzeugen	440
B.2.2	Größe von Arrays	440
B.2.3	Zugriff auf Array-Elemente	441
B.2.4	Zweidimensionale Arrays	441
ImageJ-Kurzreferenz		445
C.1	Installation und Setup	445
C.2	ImageJ-API	447
C.2.1	Bilder	447
C.2.2	Bildprozessoren	447
C.2.3	Plugins	448
C.2.4	GUI-Klassen	449
C.2.5	Window-Management	450
C.2.6	Utility-Klassen	450
C.2.7	Input-Output	450
C.3	Bilder und Bildfolgen erzeugen	450
C.3.1	ImagePlus (Klasse)	450
C.3.2	ImageStack (Klasse)	451
C.3.3	NewImage (Klasse)	451
C.3.4	ImageProcessor (Klasse)	452
C.4	Bildprozessoren erzeugen	452
C.4.1	ImageProcessor (Klasse)	452
C.4.2	ByteProcessor (Klasse)	452
C.4.3	ColorProcessor (Klasse)	452
C.4.4	FloatProcessor (Klasse)	453
C.4.5	ShortProcessor (Klasse)	453
C.5	Bildparameter	454
C.5.1	ImageProcessor (Klasse)	454
C.6	Zugriff auf Pixel	454
C.6.1	ImageProcessor (Klasse)	454
C.7	Konvertieren von Bildern	457
C.7.1	ImageProcessor (Klasse)	457
C.7.2	ImagePlus, ImageConverter (Klassen)	458
C.8	Histogramme und Bildstatistiken	458
C.8.1	ImageProcessor (Klasse)	458
C.9	Punktoperationen	459
C.9.1	ImageProcessor (Klasse)	459
C.9.2	Blitter (Interface)	460
CIO Filter		461
C.10.1	ImageProcessor (Klasse)	461
C.11 Geometrische Operationen		461
C.11.1	ImageProcessor (Klasse)	461

C.12 Grafische Operationen in Bildern	462
C.12.1 ImageProcessor (Klasse)	462
C.13 Bilder darstellen	463
C.13.1 ImagePlus (Klasse)	463
C.14 Operationen auf Bildfolgen (Stacks)	464
C.14.1 ImagePlus (Klasse)	464
C.14.2 ImageStack (Klasse)	464
C.14.3 Stack-Beispiel	465
C.15 <i>Region of Interest</i> (ROI)	469
C.15.1 ImageProcessor (Klasse)	469
C.15.2 ImageStack (Klasse)	469
C.15.3 ImagePlus (Klasse)	470
C.15.4 Roi, Line, OvalRoi, PolygonRoi (Klassen)	470
C.16 <i>Image Properties</i>	471
C.16.1 ImagePlus (Klasse)	471
C.17 Interaktion	471
C.17.1 IJ (Klasse)	471
C.17.2 ImageProcessor (Klasse)	473
C.17.3 GenericDialog (Klasse)	473
C.18 Plugins	474
C.18.1 Plugin (Interface)	474
C.18.2 PlugInFilter (Interface)	474
C.18.3 Plugins ausführen - IJ (Klasse)	476
C.19 Window-Management	476
C.19.1 WindowManager (Klasse)	476
C.20 Weitere Funktionen	477
C.20.1 ImagePlus (Klasse)	477
C.20.2 IJ (Klasse)	477
D Source Code	479
D.1 Harris Corner Detector	480
D.1.1 File Corner.java	480
D.1.2 File HarrisCornerDetector.java	481
D.1.3 File HarrisCornerPlugin_.java	485
D.2 Kombinierte Regionenmarkierung-Konturverfolgung	487
D.2.1 File ContourTracingPlugin_.java	487
D.2.2 File Node.java	488
D.2.3 File Contour.java	488
D.2.4 File OuterContour.java	489
D.2.5 File InnerContour.java	490
D.2.6 File ContourSet.java	490
D.2.7 File ContourTracer.java	492
D.2.8 File ContourOverlay.java	495
Literaturverzeichnis	497
Sachverzeichnis	503