

X.media.press

Digitale Bildverarbeitung

Eine algorithmische Einführung mit Java

Bearbeitet von
Wilhelm Burger, Mark James Burge

3., überarbeitete und erweiterte Auflage 2015. Buch. XXIII, 803 S. Gebunden
ISBN 978 3 642 04603 2

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Digitale Bilder | 1 |
| 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 |
| 2 | ImageJ | 25 |
| 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 |
| 3 | Histogramme | 41 |
| 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 |
| 4 | Punktoperationen | 59 |
| 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 |
| 5 | Filter | 93 |
| 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 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 6 | Kanten und Konturen | 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 |
| 7 | Auffinden von Eckpunkten | 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 |
| 8 | Detektion einfacher Kurven | 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 |
| 9 | Morphologische Filter | 191 |
| 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 | Punkt <i>mengen</i> | 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 |
| 10 | Regionen in Binärbildern | 223 |
| 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 |
| 11 | Auto­ma­tische Schwell­wert­ope­ra­tionen | 267 |
| 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 |
| 12 | Farbbilder | 309 |
| 12.1 | RGB-Farbbilder | 309 |
| 12.1.1 | Aufbau von Farbbildern | 311 |
| 12.1.2 | Farbbilder in ImageJ | 314 |
| 12.2 | Farbräume und Farbkonversion | 322 |
| 12.2.1 | Umwandlung in Grauwertbilder | 323 |
| 12.2.2 | HSV/HSB- und HLS-Farbraum | 325 |
| 12.2.3 | TV-Komponentenfarbräume: YUV, YIQ und $Y C_b C_r$ | 337 |
| 12.2.4 | Farbräume 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 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 13 | Farbquantisierung | 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 |
| 14 | Colorimetrische Farbräume | 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 |
| 15 | Filter für Farbbilder | 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 |
| 16 | Kanten in Farbbildern | 417 |
| 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 |
| 17 | Kantenerhaltende Glättungsfilter | 441 |
| 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 |
| 18 | Einführung in Spektraltechniken | 479 |
| 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 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 18.3 | Die diskrete Fouriertransformation (DFT) | 498 |
| 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 |
| 18.4 | Implementierung der DFT | 507 |
| 18.4.1 | Direkte Implementierung | 507 |
| 18.4.2 | Fast Fourier Transform (FFT) | 509 |
| 18.5 | Aufgaben | 509 |
| 19 | Diskrete Fouriertransformation in 2D | 511 |
| 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 |
| 20 | Diskrete Kosinustransformation (DCT) | 535 |
| 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 |
| 21 | Geometrische Bildoperationen | 545 |
| 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 |
| 22 | Interpolation | 569 |
| 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 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 23 | Bildvergleich | 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 |
| 24 | Elastischer Bildvergleich | 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 |
| 25 | Skaleninvariante Bildmerkmale (SIFT) | 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 |
| A | Mathematische Notation | 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 | Ergänzungen zur Algebra | 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 |
| C | Ergänzungen zur Analysis | 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 |

| | | |
|----------|---|-----|
| D | Ergänzungen zur Statistik | 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 gaußverteiletem Rauschen | 753 |
| E | Gaußfilter | 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 |
| F | Java-Notizen | 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 (<code>Math</code> -Klasse) | 762 |
| F.1.5 | Numerisches Runden | 763 |
| F.1.6 | Inverse Tangensfunktion | 764 |
| F.1.7 | <code>Float</code> und <code>Double</code> (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 |
| | Literaturverzeichnis | 771 |
| | Sachverzeichnis | 785 |



<http://www.springer.com/978-3-642-04603-2>

Digitale Bildverarbeitung

Eine algorithmische Einführung mit Java

Burger, W.; Burge, M.J.

2015, XXIII, 803 S. 375 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-642-04603-2