

Besonderer Dank gilt schließlich unseren Lebenspartnerinnen, die viel Verständnis hatten, wenn es „wieder einmal später“ wurde.

Aachen, im August 1997

Thomas Lehmann

Walter Oberschelp

Erich Pelikan

Rudolf Repges



Inhaltsübersicht

Grundlagen

1. Medizinische Fragestellungen (*Erich Pelikan*)5
2. Technik der Bilderzeugung (*Thomas Lehmann*)21
3. Bildwahrnehmung (*Erich Pelikan*) 65

Modelle

4. Das Bild als diskrete Ortsbereichsfunktion (*Walter Oberschelp*)97
5. Das Bild als gestörtes Signal (*Thomas Lehmann*) 123
6. Das Bild als stochastischer Prozeß (*Rudolf Reppes*)157

Methoden

7. Selbsttransformationen des Ortsraumes (*Walter Oberschelp*)193
Morphologische Bildverarbeitung (*Thomas Lehmann*) 218
8. Die diskrete Fourier-Transformation (*Walter Oberschelp*) 233
9. Die Wavelet-Transformation (*Erich Pelikan* und *Ingrid Scholl*) 253
10. Die Radon-Transformation (*Rudolf Reppes*) 283
11. Die Karhunen-Loève-Transformation (*Rudolf Reppes*)295
12. Die Hough-Transformation (*Thomas Lehmann*) 309

Anwendungen

13. Bildkorrektur und Bildverbesserung (*Thomas Lehmann*) 321
14. Segmentierung (*Erich Pelikan*)359
15. Klassifikation und Mustererkennung (*Erich Pelikan*) 395

Inhaltsverzeichnis

Schreibweisen und Notationen	1
1. Medizinische Fragestellungen für den Einsatz bildgebender Verfahren	5
1.1 Grundlagen statistischer Bewertungsverfahren in der Medizin .	6
1.2 Einsatzgebiete bildgebender Diagnostik	9
1.2.1 Radiologische Skelettdiagnostik	11
1.2.2 Thorax-Untersuchung	15
1.2.3 Untersuchung des Abdomen	16
1.3 Abschlußbemerkung	18
2. Technik der Bilderzeugung in der medizinischen Diagnostik	21
2.1 Physikalische Grundlagen der bildgebenden Verfahren	21
2.1.1 Das Bohrsche Atommodell	21
2.1.2 Strahlung	24
2.1.3 Elektromagnetische Wellen	26
2.1.4 Röntgenstrahlung	27
2.1.5 Lumineszenz	31
2.1.6 Kernspin	32
2.1.7 Schallwellen	36
2.2 Technische Realisierungen der bildgebenden Verfahren	40
2.2.1 Röntgenaufnahme	40
2.2.2 Durchleuchtung	45
2.2.3 Mammographie	45
2.2.4 Angiographie	46
2.2.5 Röntgentomographie	47
2.2.6 Computertomographie	49
2.2.7 Szintigraphie	52
2.2.8 Kernspintomographie (MR)	56
2.2.9 Sonographie	59
3. Physiologische und psychologische Grundlagen der Bildwahrnehmung	65
3.1 Aufbau und Funktion des Sehapparates	65

3.1.1	Das Auge	66
3.1.2	Nervenverbindungen	70
3.1.3	Das Sehzentrum	71
3.2	Rezeption	75
3.2.1	Intensität	75
3.2.2	Kontrastwahrnehmung	78
3.2.3	Farbwahrnehmung	78
3.2.4	Farbräume	80
3.2.5	Raumwahrnehmung	86
3.2.6	Adaptation und Akkommodation	87
3.3	Perzeption	88
3.3.1	Gestalterkennung	89
3.3.2	Formerkennung	93
3.3.3	Visuelle Suche	94
3.4	Zusammenfassung	95
4.	Das Bild als diskrete Ortsbereichsfunktion	97
4.1	Das Bild als Ortsbereichsfunktion	97
4.1.1	Das kontinuierliche Idealbild und das Problem der Diskretisierung	98
4.1.2	Das diskrete Bild und die Pixelebene	99
4.1.3	Koordinaten und Abbildungen	101
4.2	Grundlagen der Verarbeitung diskreter Bilder	104
4.2.1	Standardcodierung von diskreten Farbbildern und die Technik der Bildspeicherung	104
4.2.2	Ortsbereich und Frequenzbereich	106
4.2.3	Das Hexelraster als Alternative zum Pixelraster	106
4.2.4	Zur Axiomatik der diskreten Pixelgeometrie	108
4.3	Globale Kenngrößen von Bildern und Bildregionen	108
4.3.1	Histogramm, mittlerer Grauwert und globaler Kontrast	108
4.3.2	Entropie	110
4.4	Codierung von Bildern	110
4.4.1	Präfixfreie Codes	110
4.4.2	Bildcodierung bei speziellem Kontextwissen	111
4.4.3	Der Quad-Tree als Code für Binärbilder	112
4.5	Topologie der Pixelebene	113
4.5.1	Nachbarschaftskonzepte und Pfade	113
4.5.2	Zusammenhangskonzepte, Löcher, Objekte und Animals	114
4.5.3	Kontur und Rand	115
4.5.4	Zur Topologie beliebiger Grauwertbilder	116
4.6	Objekte in Binärbildern und Morphologie	117
4.6.1	Konturcharakterisierung von Objekten, Kettencode und Länge der Kontur	117

4.6.2	Flächencharakterisierung von Objekten und Flächeninhalt	118
4.6.3	Schwerpunkt und Hauptträgheitsachse	119
4.6.4	Morphologie	120
5.	Das Bild als gestörtes Signal	123
5.1	Signaltheoretische Grundlagen	123
5.1.1	Signale	124
5.1.2	Systeme	125
5.1.3	Signalübertragung auf LTI-Systemen	127
5.1.4	Stoßantwort eines LTI-Systems	131
5.1.5	Übertragungsfunktion eines LTI-Systems	132
5.1.6	Fourier-Analyse von LTI-Systemen	132
5.1.7	Zusammenfassung	141
5.2	Signaltheoretische Beschreibung der Bildaufnahme	141
5.2.1	Die optische Übertragungsfunktion der Bildgewinnung ..	142
5.2.2	Endlicher Bildausschnitt	145
5.2.3	Signalumsetzung	147
5.2.4	Abtastung	148
5.2.5	Quantisierung	152
5.2.6	Resultierende Übertragungsfunktion	153
5.3	Weitere Störungen durch die Bildaufnahme	154
5.3.1	Verzeichnungen	154
5.3.2	Kratzer und Linsenfehler	155
5.3.3	Fehler beim Auslesen des Sensors	155
5.3.4	Verwackeln und Artefakte durch Objektbewegungen...	156
6.	Das Bild als stochastischer Prozeß	157
6.1	Stochastische Grundbegriffe	157
6.1.1	Statistiken erster Ordnung	158
6.1.2	Einige Eigenschaften dieser Statistiken	160
6.1.3	Statistiken zweiter Ordnung	162
6.1.4	Bedingte Verteilungen	164
6.1.5	Bedingte Erwartungswerte	165
6.2	Homogene Felder	165
6.2.1	Stationäre Felder	166
6.2.2	Ergodische Felder	166
6.2.3	Cooccurrence-Matrizen	167
6.3	Lineare Transformationen von Zufallsfeldern	169
6.3.1	Statistiken transformierter Felder	169
6.3.2	Transformationen homogener Felder	171
6.3.3	Die spektrale Leistungsdichte	172
6.3.4	Kreuzkorrelation	173
6.4	Stochastische Bildmodelle	174
6.4.1	Verteilungen erster Ordnung	174

6.4.2	Produktverteilungen (Weißes Rauschen)	176
6.4.3	Farbiges Rauschen	178
6.4.4	Die Gibbs-Verteilung	178
6.4.5	Beispiel für eine Gibbs-Verteilung	180
6.5	Stochastische Prozesse	181
6.5.1	Einfache Beispiele stochastischer Prozesse	181
6.5.2	Markoffscher Gitterprozeß mit Gibbs-Verteilung	183
6.5.3	Konstruktion eines Markoff-Feldes	186
6.5.4	Simulated-Annealing	188
6.5.5	Konstruktion eines Markoff-Feldes nach Metropolis ...	190
6.6	Bemerkungen zum Texturbegriff	191
7.	Selbsttransformationen des Ortsraumes	
	durch lokale Operatoren	193
7.1	Punktoperatoren	195
7.1.1	Grauwerttransformationen	195
7.1.2	Allgemeine Grauwerttransformation	197
7.1.3	Histogrammäqualisation	199
7.1.4	Schwellwertverfahren (Thresholding)	201
7.2	Lokale Operatoren auf der Basis von Masken	202
7.2.1	Templates (Masken) als lineare lokale Operatoren	202
7.2.2	Das Medianfilter als nichtlineares Filter	207
7.2.3	Parallelisierung und Speicherbedarf sequentieller Filter	209
7.3	Lineare Filter für spezielle Anwendungen	210
7.3.1	Kantendetektion durch Differenzfilter	210
7.3.2	Kombination von Kantendetektion und Rauschunterdrückung	212
7.3.3	Das Problem der Rotationsinvarianz	213
7.4	Reduktion des Rechenaufwandes durch separable Filter	215
7.5	Morphologische Operatoren auf der Basis von Templates	218
7.5.1	Grundlagen morphologischer Bildverarbeitung	218
7.5.2	Erosion und Dilatation	220
7.5.3	Opening und Closing	222
7.5.4	Die Hit-and-Miss-Transformation	223
7.5.5	Skelettierung	223
7.5.6	Labeling	226
7.5.7	Anwendungsbeispiel	228
7.5.8	Grauwertmorphologie	231
8.	Die diskrete Fourier-Transformation	233
8.1	Die Idee von Transformation und Rücktransformation	233
8.2	Der Zusammenhang zwischen der diskreten und der kontinuierlichen Fourier-Transformation	234

8.2.1	Fourier-Entwicklung von kontinuierlichen periodischen Funktionen	235
8.2.2	Beispiele zur Berechnung der Fourier-Koeffizienten	236
8.2.3	Fourier-Reihen als Exponentialreihen mit komplexen Koeffizienten	237
8.2.4	Das Spektrum einer periodischen Funktion und das kontinuierliche Spektrum	239
8.3	Die diskrete Fourier-Transformation (DFT)	240
8.3.1	Periodische diskrete Funktionen	240
8.3.2	Die DFT als endliche Exponentialsumme	241
8.3.3	Das Spektrum der DFT – Berechnungskomplexität und die schnelle Fourier-Transformation (FFT)	242
8.4	Anwendungen der DFT	243
8.4.1	Faltung	243
8.4.2	Filterung	245
8.5	Zweidimensionale Fourier-Transformation	249
8.5.1	Definitionen und Separierbarkeit	249
8.5.2	Die zweidimensionale Faltung	250
8.5.3	Zweidimensionale Paßfilter	251
8.6	Fensterfunktionen	251
9.	Die Wavelet-Transformation	253
9.1	Die Fenster-Fourier-Transformation	255
9.1.1	Mathematische Grundlagen	255
9.1.2	Definition	256
9.1.3	Zeit- und Frequenzanalyse	258
9.1.4	Nachteile der Fenster-Fourier-Transformation und Motivation der Wavelet-Transformation	260
9.2	Herleitung der Wavelet-Transformation	262
9.2.1	Die kontinuierliche Wavelet-Transformation	262
9.2.2	Zeit- und Frequenzanalyse	263
9.2.3	Die diskrete Wavelet-Transformation	264
9.2.4	Beispiel zur Wavelet-Transformation	266
9.3	Multiresolution-Analysis zur Konstruktion der Basis	269
9.3.1	Einführung	269
9.3.2	Multiresolution-Analysis für eindimensionale Funktionen	270
9.4	Berechnung der Wavelet-Transformation	273
9.4.1	Konstruktion der Filterkoeffizienten	273
9.4.2	Pyramidenalgorithmus der Wavelet-Transformation ...	274
9.4.3	Aufwandsabschätzung	279
9.4.4	Schlußbemerkung	281

10. Die Radon-Transformation	283
10.1 Die zweidimensionale Radon-Transformation	284
10.2 Die Radonsche Umkehrformel	286
10.2.1 Das Fourier-Slice-Theorem	286
10.2.2 Die gefilterte Rückprojektion	288
10.3 Die diskrete Radon-Transformation	289
10.3.1 Diskretisierung der Projektionen	289
10.3.2 Diskretisierung des Filters	290
10.3.3 Modifikation der Filterfunktion	291
10.3.4 Diskretisierung der Rückprojektion	291
10.4 Die Radonsche Resolvente	293
10.5 Der algebraische Ansatz	294
11. Die Karhunen-Loève-Transformation	295
11.1 Orthogonale Regression	296
11.1.1 Beispiel	298
11.2 Geometrische Interpretation	299
11.3 Reduktion hochdimensionaler Merkmalsvektoren	299
11.3.1 Zusammenhang mit der orthogonalen Regression	299
11.3.2 Reduktion auf eindimensionale Räume	300
11.3.3 Reduktion auf niedrigdimensionale Räume	302
11.3.4 Festlegung der minimalen Dimension des Merkmalsraumes	303
11.4 Beispiele	305
11.4.1 Bilddrehung	305
11.4.2 Dimensionsreduktion multispektraler Bilder	306
11.4.3 Elektrokardiogramme	306
12. Die Hough-Transformation	309
12.1 Das Prinzip der Hough-Transformation	309
12.2 Die Hough-Transformation für Geraden	309
12.2.1 Geradendarstellung als Geradengleichung	310
12.2.2 Geradendarstellung in Hessescher Normalform	311
12.2.3 Die Hough- und die Radon-Transformation	312
12.3 Die Hough-Transformation für beliebige Kurven	313
12.4 Die diskrete Hough-Transformation	313
12.5 Erweiterungen für geschlossene Randkurven	315
12.5.1 Berücksichtigung der Gradientenrichtung	316
12.5.2 Berücksichtigung der Gradientenamplitude	317
12.5.3 Gütekriterium für die Hough-Transformation	317
12.6 Anwendungsbeispiel	318

13. Bildkorrektur und Bildverbesserung	321
13.1 Geometrische Entzerrung	322
13.1.1 Allgemeine Abbildung	323
13.1.2 Zentralperspektivische Abbildung	324
13.1.3 Affine Abbildung	326
13.1.4 Fourier-basierte RST-Invariante	329
13.1.5 Interpolation	332
13.2 Bildkorrektur mit dem deterministischen Signalmodell	338
13.3 Bildrestauration mit dem stochastischen Modell	339
13.3.1 Beispiel zum Wiener-Filter	340
13.4 Lineare Verfahren zur Bildverbesserung	342
13.4.1 Kontrastverbesserung	342
13.4.2 Kontrastangleich zwischen zwei Bildern	344
13.4.3 Rauschunterdrückung	346
13.4.4 Bildverschärfung	347
13.5 Nichtlineare Verfahren zur Bildverbesserung	349
13.6 Adaptive Bildverbesserung	351
13.7 Bildverbesserung durch Farbe	354
13.7.1 Falschfarbendarstellung	355
13.7.2 Pseudokolorierung	356
14. Bildsegmentierung	359
14.1 Punktorientierte Verfahren	361
14.1.1 Globales Schwellwertverfahren	362
14.1.2 Verfahren von Otsu	364
14.1.3 Lokales Schwellwertverfahren	365
14.1.4 Dynamisches Schwellwertverfahren	366
14.1.5 Shading-Korrektur	366
14.2 Kanten- bzw. konturorientierte Verfahren	367
14.2.1 Parallele Kantenextraktion	370
14.2.2 Sequentielle Kantenextraktion (Linienverfolgung)	371
14.2.3 Wasserscheidentransformation	373
14.3 Regionenorientierte Verfahren	375
14.3.1 Distanz- und Ähnlichkeitsmaße	375
14.3.2 Kontrollstrukturen	377
14.3.3 Agglomerative Verfahren	378
14.3.4 Divisive Verfahren	379
14.3.5 Hierarchische regionenbasierende Segmentierung	379
14.3.6 Der Scale-Space-Ansatz	382
14.4 Texturorientierte Ansätze zur Bildsegmentierung	383
14.4.1 Der Begriff Textur	383
14.4.2 Definition der Textur	385
14.4.3 Berechnung von Texturmerkmalen	386

15. Klassifikation und Mustererkennung	395
15.1 Entwurfskriterien für Mustererkennungssysteme	395
15.1.1 Grundlagen und Terminologie	398
15.1.2 Postulate	402
15.2 Merkmalsextraktion	403
15.2.1 Allgemeine Ansätze	403
15.2.2 Heuristische Methoden	404
15.2.3 Analytische Methoden	406
15.2.4 Merkmalsbewertung und -auswahl	408
15.3 Klassifikationsverfahren	410
15.3.1 Strategien	410
15.3.2 Klassifikatoren	413
15.3.3 Topologische Karten	417
15.4 Qualitätsmaße	422
15.4.1 Kontingenztafel	423
15.4.2 Mathematische Definition der Qualitätsmaße	424
Literaturverzeichnis	431
Abkürzungen im Literaturverzeichnis	445
Index	446