

Inhaltsverzeichnis

- 1 EINLEITUNG 1**
 - 1.1 Entwicklung der Medizinischen Bildverarbeitung 1
 - 1.2 Struktur des Buches..... 2
 - 1.3 Bilddaten und Software..... 5

- 2 MEDIZINISCHE BILDER UND IHRE ERZEUGUNG 7**
 - 2.1 Bildgebende Verfahren in der Medizin..... 7**
 - 2.1.1 Sonographie..... 8
 - 2.1.1.1 A-Scan-Verfahren 8
 - 2.1.1.2 B-Scan-Verfahren..... 8
 - 2.1.1.3 Doppler-Sonographie 9
 - 2.1.2 Röntgentechnik..... 10
 - 2.1.2.1 Digitale Radiographie..... 11
 - 2.1.2.2 Digitale Subtraktionsangiographie 11
 - 2.1.3 Computertomographie 12
 - 2.1.3.1 Bilderzeugung 12
 - 2.1.3.2 Hounsfield-Skala 13
 - 2.1.4 Magnetresonanztomographie..... 14
 - 2.1.4.1 Physikalische Grundlagen 15
 - 2.1.4.2 Relaxationsprozesse 19
 - 2.1.4.3 Gewichtete MR-Bilder 22
 - 2.1.4.4 Magnetresonanztomographie..... 24
 - 2.1.4.5 Relaxometrie..... 25
 - 2.1.4.6 Funktionelle Magnetresonanztomographie 29
 - 2.1.4.6.1 FMR-Bildgebung..... 29
 - 2.1.4.6.2 Subtraktionsmethode 31
 - 2.1.4.6.3 Korrelationsanalyseverfahren 31
 - 2.1.5 Nuklearmedizinische Bildgebung..... 32
 - 2.1.5.1 Szintigraphie..... 33
 - 2.1.5.2 Positronen-Emissions-Tomographie 33
 - 2.1.6 Digitale Fotografien..... 34

2.2	Struktur und Formate medizinischer Bilddaten.....	36
2.2.1	DICOM-Bilder	37
2.2.2	Farbbilder	38
2.3	Typisierung medizinischer Bilddaten.....	41
2.3.1	2D-Bilder.....	41
2.3.2	Multispektrale 2D-Bilddaten	41
2.3.2.1	Multispektrale MR-Bilddaten.....	42
2.3.2.2	Farbbilder	42
2.3.2.3	Multispektrale Parameterbilddaten.....	43
2.3.3	Bewegtbildfolgen	43
2.3.4	3D-Bildfolgen.....	44
2.3.5	Multispektrale 3D-Bilddaten	45
2.3.6	4D-Bilddaten	46

3 GRUNDLAGEN DIAGNOSE- UND THERAPIE- UNTERSTÜTZENDER BILDVERARBEITUNGSSYSTEME 49

3.1	Typische Phasen bei der Verarbeitung medizinischer Bilddaten.....	50
3.1.1	Bildvorverarbeitung.....	52
3.1.1.1	Lokale Operatoren	52
3.1.1.2	Glättungsfilter.....	54
3.1.1.2.1	Mittelwertfilter.....	54
3.1.1.2.2	Gauß- und Binomialfilter.....	55
3.1.1.2.3	Medianfilter	56
3.1.1.3	Kantenfilter.....	57
3.1.1.3.1	Differenzoperatoren.....	58
3.1.1.3.2	Sobel- und Prewitt-Operator.....	59
3.1.1.3.3	Laplace-Operator	61
3.1.2	Segmentierung	63
3.1.3	Quantitative Bildanalyse.....	63
3.1.4	Visualisierung	64
3.1.5	Bilderkennung und Klassifikation	64
3.2	Erstellung diagnoseunterstützender Erkennungssysteme.....	65
3.2.1	Aufbau von Lernstichproben	66
3.2.2	Training eines Klassifikators	68
3.2.3	Erkennung von Bildobjekten	68

4 REGISTRIERUNG MEDIZINISCHER BILDDATEN 71

4.1	Grundlagen.....	71
4.2	Starre, affine und perspektivische Transformationen.....	72

4.3	Landmarkenbasierte Registrierung	74
4.3.1	Methode	74
4.3.2	Anwendungsbeispiel	75
4.4	Kurven- und oberflächenbasierte Registrierung	76
4.4.1	Iterative-Closest-Point-Algorithmus	76
4.4.2	Anwendungsbeispiel	77
4.4.3	Registrierung durch atlasbasierte Bildsegmentierung	78
4.5	Voxelbasierte Registrierung	79
4.5.1	Ähnlichkeitsmaße	79
4.5.1.1	Summe der quadratischen Intensitätsdifferenzen	79
4.5.1.2	Varianz der Intensitätsverhältnisse	80
4.5.1.3	Mutual Information	80
4.5.2	Nicht-lineare voxelbasierte Registrierung	83
4.5.2.1	Mathematische Grundlagen	83
4.5.2.2	Elastische Registrierung	84
4.5.2.3	Fluidale Registrierung	85
4.5.2.4	Diffusive Registrierung	85
4.5.2.5	Dämonenbasierte Registrierung	86
4.5.3	Anwendungen voxelbasierter Registrierungsverfahren	88
4.5.3.1	Bildfusion und Bewegungskorrektur	88
4.5.3.2	Strukturerhaltende Interpolation	89
4.5.3.3	Bewegungsfeldschätzung in 4D-Bilddaten	92
4.6	Evaluation von Registrierungsverfahren	94

5 SEGMENTIERUNG MEDIZINISCHER BILDDATEN 95

5.1	Schwelwertverfahren	96
5.2	ROI-basierte Pixelklassifikation	97
5.2.1	Intervallkriterium	97
5.2.2	Abstandsmaße	98
5.2.3	Eigenschaften	99
5.3	Bereichs- und Volumenwachstumsverfahren	100
5.3.1	Algorithmus	100
5.3.2	Volumenwachstumsverfahren	102
5.3.3	Algorithmische Erweiterungen und Varianten	103
5.4	Clusteranalyse multispektraler Bilddaten	106
5.4.1	Iterative partitionierende Clusteranalyseverfahren	107
5.4.2	Histogrammbasierte Clusteranalyse	110
5.4.2.1	Basialgorithmus	111
5.4.2.2	Konfliktbehandlung	113
5.4.2.3	Histogrammpyramiden	114

5.5 Live-Wire-Segmentierung	116
5.5.1 Kontursegmentierung als graphentheoretisches Optimierungsproblem	117
5.5.2 Kostendefinition	117
5.5.3 Berechnung des Pfadgraphen nach Dijkstra.....	120
5.5.4 Anwendung des Live-Wire-Verfahrens.....	122
5.5.5 Methodische Erweiterungen.....	123
5.5.5.1 Vereinfachte Saatpunktselektion auf der Kontur.....	123
5.5.5.2 Kostentraining	124
5.5.5.3 Erweiterung zur atlasbasierten Segmentierung von Bildfolgen	124
5.6 Aktive Konturmodelle und deformierbare Modelle	127
5.6.1 Kontursuche als Optimierungsproblem	127
5.6.1.1 Innere Energie	128
5.6.1.2 Äußere Energie.....	129
5.6.1.3 Energieminimierung.....	130
5.6.2 Aktive Konturmodelle in der Anwendung	131
5.7 Level-Set-Segmentierung	133
5.7.1 Level-Set-Modellierung.....	133
5.7.2 Anpassungsprozess und Speed-Funktion	134
5.8 Modellbasierte Segmentierung mit statistischen Formmodellen	137
5.8.1 Formrepräsentationen und -modelle	137
5.8.1.1 M-reps	137
5.8.1.2 Point Distribution Model.....	141
5.8.2 Generierung statistischer Formmodelle mit dem Point Distribution Model..	141
5.8.3 Evaluation von statistischen Formmodellen	145
5.8.4 Segmentierung mit aktiven Formmodellen.....	145
5.8.5 Segmentierung mit aktiven Erscheinungsmodellen.....	147
5.8.5.1 Lokale statistische Erscheinungsmodelle	147
5.8.5.2 Regionenbasierte statistische Erscheinungsmodelle.....	148
5.9 Atlasbasierte Segmentierung durch nicht-lineare Registrierung	149
5.9.1 Methode.....	149
5.9.2 Anwendungsbeispiel.....	150
5.10 Evaluation von Segmentierungsergebnissen	152
5.10.1 Mittlerer Kontur- und Oberflächenabstand	152
5.10.2 Hausdorff-Distanzen.....	153
5.10.3 Dice- und Jaccard-Koeffizienten	154
5.10.4 Flächenüberdeckung.....	154
5.10.5 Phantome	155

6 QUANTITATIVE BILDANALYSE 157

6.1 Elementare Bildanalysefunktionen	157
6.1.1 Abstandsmessung	158
6.1.2 Winkelmessung	159
6.1.3 Flächenmessung und Volumetrie	160
6.1.4 Quantitative Analyse in Regions of Interest	160
6.2 Texturanalyse.....	162
6.2.1 Haralick'sche Texturmerkmale	165
6.2.2 Texturenergien nach Laws.....	169
6.2.3 Texturmerkmale aus dem Powerspektrum	172
6.3 Fraktale Bildanalyse.....	176
6.3.1 Ähnlichkeitsdimension	178
6.3.2 Hausdorff-Dimension	178
6.3.3 Fraktale Kästchendimension.....	180
6.3.4 Bestimmung der fraktalen Kästchendimension digitaler Bildmuster	181
6.3.5 Fraktale Dimension gebrochener Brownscher Flächen	185
6.3.5.1 Gebrochene Brownsche Bewegung.....	187
6.3.5.2 Gebrochene Brownsche Flächen	188
6.3.5.3 Bestimmung der fraktalen Dimension und des Parameters H	190
6.4 Morphologische Bildanalyse	192
6.4.1 Momente einer Kontur.....	193
6.4.2 Normalisierte radiale Distanzen und Rauigkeit	196
6.4.3 Fourier-Deskriptoren	197
6.4.4 Kompaktheit und Rundheit.....	199
6.4.5 Elongiertheit	200

7 KLASSIFIKATION UND BILDERKENNUNG..... 201

7.1 Mathematische Grundlagen.....	202
7.1.1 Klassifikation als Optimierungsproblem	202
7.1.2 Bayes-Strategie	203
7.1.3 Minimax- und Neyman-Pearson-Strategie	206
7.2 Statistische Klassifikatoren.....	206
7.2.1 Bayes-Klassifikator unter Normalverteilungsannahme	206
7.2.2 Maximum-Likelihood-Klassifikator	209
7.2.3 Minimum-Distanz-Klassifikatoren	211
7.2.3.1 Mahalanobis-Klassifikator.....	211
7.2.3.2 Euklidischer Klassifikator	212
7.2.4 Segmentierung multispektraler Bilddaten mit statistischen Klassifikatoren..	213

7.3 Nicht-parametrische Klassifikationsverfahren	214
7.3.1 K-Nächste-Nachbarn-Klassifikator	214
7.3.2 Nächster-Nachbar-Klassifikator	217
7.4 Neuronale Netze	220
7.4.1 Neuronenmodell	221
7.4.2 Perzeptrons	224
7.4.3 Multilayer-Perzeptrons	226
7.4.3.1 Lernen durch Back-Propagation	227
7.4.3.2 Multilayer-Perzeptrons als Klassifikatoren	229
7.4.3.3 Topologieoptimierung durch Ausdünnung	232
7.4.3.4 Segmentierung multispektraler Bilddaten mit Multilayer-Perzeptrons	233
7.4.4 Topologische Merkmalskarten	235
7.4.4.1 Netzwerktopologie	237
7.4.4.2 Lernprozess	238
7.4.4.3 Kontrolle des Lernprozesses	241
7.4.4.4 Clusteranalyse und Segmentierung mit topologischen Merkmalskarten	242
7.4.4.5 Topologische Karten als Klassifikatoren	246
7.4.5 Restricted-Coulomb-Energy-Klassifikator	247
7.5 Evaluation von Mustererkennungssystemen	250
7.5.1 Hold-out-Methode	253
7.5.2 Leaving-one-out-Methode	253

8 AUSWAHL UND TRANSFORMATION VON MERKMALEN

8.1 Auswahl von Merkmalen	256
8.1.1 Bewertung von Merkmalen	259
8.1.2 Heuristische Strategien und Greedy-Algorithmen	260
8.1.3 Genetische Algorithmen	263
8.1.3.1 Grundlagen	263
8.1.3.2 Selektionsverfahren	265
8.1.3.3 Rekombination	266
8.1.3.4 Mutation	267
8.1.3.5 Steuerung der Populationsentwicklung	268
8.1.3.6 Optimierung genetischer Algorithmen für die Merkmalsauswahl... ..	269
8.2 Transformation von Merkmalen	274
8.2.1 Hauptkomponentenanalyse	274
8.2.1.1 Mathematische Grundlagen	274
8.2.1.2 Reduktion der Merkmalsanzahl	277
8.2.1.3 Anwendungen in der Medizinischen Bildverarbeitung	279
8.2.2 Merkmalstransformation unter Berücksichtigung der Interklassen- und der gepoolten Intraklassen-Streuungsmatrix	281

9 VISUALISIERUNG MEDIZINISCHER BILDDATEN..... 283

9.1 Visualisierung und Transformation von Grauwertbildern.....	285
9.1.1 Fensterung	285
9.1.2 Grauwerttransformationen.....	286
9.1.2.1 Lineare Skalierung der Grauwerte	287
9.1.2.2 Logarithmische und exponentielle Skalierung der Grauwerte	288
9.1.3 Zoom-Operation	289
9.1.4 Bildinterpolation.....	289
9.2 Visualisierung und Transformation von Farbbildern.....	291
9.2.1 Farbmodelle und Farbräume.....	291
9.2.1.1 RGB-Farbraum und XYZ-Farbmodell	291
9.2.1.2 HSV-Farbraum	293
9.2.1.3 HLS-Farbraum.....	294
9.2.2 Farbraumtransformationen	295
9.2.3 Farbdarstellung von Segmentierungsergebnissen.....	296
9.3 3D-Visualisierung.....	299
9.3.1 Basistechniken zur Visualisierung von 3D-Bildfolgen	299
9.3.2 3D-Visualisierung in der medizinischen Anwendung.....	301
9.3.3 Oberflächen- versus voxelbasierte 3D-Visualisierung	302
9.3.4 Generierung von Oberflächenmodellen.....	304
9.3.4.1 Konturbasierte Triangulation.....	304
9.3.4.2 Marching-Cubes-Algorithmus.....	305
9.3.5 Beleuchtung, Schattierung und Transparenz	309
9.3.5.1 Phong'sches Beleuchtungsmodell	309
9.3.5.2 Schattierung.....	311
9.3.5.2.1 Konstante Schattierung.....	311
9.3.5.2.2 Gouraud-Schattierung.....	312
9.3.5.2.3 Phong-Schattierung	312
9.3.5.3 Transparenz	314
9.3.6 Direktes Volumenrendering	315
9.3.6.1 Ray Tracing und optische Modelle.....	315
9.3.6.2 Volumenrenderingintegral.....	317
9.3.6.3 Auswertung des Volumenrenderingintegrals	318
9.3.6.4 Approximation der Normalen im Voxellmodell.....	322
9.3.6.5 Integralschattierung	323
9.3.6.6 Maximumsprojektion.....	324
9.3.6.7 Voxelbasiertes Oberflächenrendering	325
9.3.7 3D-Interaktionen.....	329

10.4 Computergestützte 3D-Planung und Simulation von Hüftoperationen.....	374
10.4.1 Medizinischer Hintergrund.....	374
10.4.2 Vorverarbeitung der Bilddaten	376
10.4.3 Techniken für die computergestützte Operationsplanung	379
10.4.4 Simulation der Operation und computergestütztes Prothesendesign.....	381
10.5 Virtual-Reality-Simulator für das Training von Punktionen	384
10.5.1 Medizinischer Hintergrund.....	384
10.5.2 Vorverarbeitung.....	384
10.5.3 Visualisierungskomponente.....	385
10.5.4 Haptische Komponente.....	387
10.5.5 VR-Training von Lumbalpunktionen	388
11 ANHANG.....	391
11.1 Texturmerkmale nach Haralick	391
11.2 Algorithmen zur Farbraumtransformation	394
12 LITERATURVERZEICHNIS	397
13 STICHWORTVERZEICHNIS.....	421