
Inhaltsverzeichnis

Teil I 2D-Bildverarbeitung

1	Elementare Grundlagen	3
1.1	Abtastung	3
1.2	Diskrete Natur von digitalen Bildern	6
1.2.1	Gittertypen	7
1.2.2	Kuriositäten im Quadratgitter	10
1.2.3	Digitale Konvexität	10
1.2.4	Silhouetten	12
1.2.5	Perkolation	16
1.3	Bildmodelle	17
1.4	Bildtransformationen	18
1.4.1	„Reine“ Grauertransformationen	18
1.4.2	Polar- und Log-Polar-Darstellungen	20
1.4.3	Globale geometrische Transformationen	21
1.4.4	Praktische Durchführung der Transformationen	23
1.4.5	Beispiel OCR	24
2	Die Operationen Faltung und Korrelation	27
2.1	Faltung und Korrelation	27
2.1.1	Faltung	27
2.1.2	Korrelation	31
2.1.3	Ableitungen der Faltung	36
2.1.4	<i>Wrap-around effect</i> und <i>zero padding</i>	37
2.2	Zirkularmatrizen	38
2.2.1	Elementare Eigenschaften	38
2.2.2	Normabschätzungen und Stabilität	41
2.3	LSI-Operatoren	43
2.4	Faltungsgleichungen im Ortsraum	48
2.4.1	Iterative Entfaltung	48
2.4.2	Beschränkte Entfaltungskerne	49

2.5	FIR und IIR Filter	49
2.6	Schnelle Faltungen im Ortsraum	51
3	Bildtransformationen	53
3.1	Grundlagen und Basissysteme	53
3.2	Analoge Fouriertransformation im endlichen Intervall (AFT)	57
3.3	Die endliche diskrete Fouriertransformation (DFT)	60
3.4	Die Fourier-Integraltransformation (IFT)	62
3.4.1	Integraltransformation als Grenzwert	62
3.4.2	Integraltransformation mit stetigen Basen	64
3.5	Die unendliche diskrete Fouriertransformation (UDFT)	65
3.6	Fourier-Mellin-Transformation (FMT)	66
3.7	Hilbert-Transformation (HIT)	67
4	Grundlegende Eigenschaften der Fouriertransformation	71
4.1	Bezeichnungen	71
4.2	Nullter Fourierreduktionsfaktor, Gleichanteil	72
4.3	Konvergenzverhalten, Gibbssches Phänomen	72
4.4	Linearität der Fouriertransformation	74
4.5	Periodizität der Fourierreduktionsfaktoren	75
4.6	Spektrum reeller Funktionen	77
4.7	Parsevalsche Gleichung	77
4.8	Faltungstheorem	78
4.9	Spektrum der Korrelationsfunktion	80
4.10	Kohärenz	80
4.11	Eigenwerte und Eigenfunktionen bezüglich der Faltung	81
4.12	Normabschätzungen und Kondition	82
4.13	Faltungs-Iterationen	83
4.14	Reelle diskrete Fouriertransformation – Hartleytransformation	84
4.15	Separierbarkeit der mehrdimensionalen Fouriertransformation	86
4.16	Implementierung der inversen Fouriertransformation	86
4.17	Verschiebungstheorem	87
4.18	Fouriertransformierte spezieller Funktionen	88
4.19	Spektrum der Ableitungen	93
4.20	Periodische Bilder	94
4.21	Fouriertransformation für komplexe Funktionen	96
4.21.1	Blockmatching	96
4.21.2	Trigonometrische Interpolation	97
4.21.3	Trigonometrische Approximation	98
4.21.4	Trigonometrisches Ellipsenfitting	99
4.21.5	Normalisierung von Punktmengen	101
4.21.6	Fourierdeskriptoren und Translationen	104

4.21.7	Fourierdeskriptoren und isotrope Skalierungen	104
4.21.8	Fourierdeskriptoren für Rotation und Startpunktwahl	105
4.21.9	Fourierdeskriptoren in der Praxis	107
4.22	Cepstrum	109
4.23	Modifizierte diskrete Fouriertransformationen (MDFT)	110
4.24	Diskrete Kosinus Transformation (DCT)	112
4.25	Unschärferelation	115
4.26	Affine Transformationen	116
4.27	Lokales Energiemodell	118
4.27.1	Lokale Energie	118
4.27.2	Phasenkongruenz	119
4.27.3	Funktionen mit hoher Phasenkongruenz	121
5	Abtasttheoreme	123
5.1	Abtasttheorem im endlichen Intervall	123
5.2	Abtasttheorem für das unendliche Bildmodell	129
5.3	Abtasttheorem für 2D-Signale	133
5.4	Anwendungen des Abtasttheorems	134
5.4.1	Verkleinern von Bildern (Shrinking)	134
5.4.2	Vergrößern von Bildern (Zooming, Superresolution)	134
5.4.3	Superresolution und Bildrestaurierung	139
5.4.4	Bemerkungen zum Abtasttheorem	142
5.4.5	Pyramiden	145
6	Orts-Frequenz-Darstellungen	147
6.1	Der Leck-Effekt (Leakage effect)	147
6.2	Das komplexe Spektrogramm	148
6.3	Wigner-Ville-Orts-Frequenz-Darstellung	151
6.4	Gabor-Filter	152
6.5	Quadratur-Filter (Energie-Filter)	153
7	Filterentwurf im Frequenzraum	155
7.1	Tiefpassfilter	155
7.2	Unscharfe Maskierung (Unsharp Masking)	156
7.3	Pruning-Filter	158
7.4	Homorphe Filter	158
7.5	DoB-Filter	158
7.6	Scharfe Bilder (Fokussierung)	161
8	Filter im Ortsraum	165
8.1	Lineare und verschiebungsinvariante Filter	165
8.1.1	Berechnung der Filterkoeffizienten	165
8.1.2	Implementierung von LSI-Filtern	169

8.2	Nichtlineare Filter	170
8.2.1	Funktionen von LSI-Filtern	171
8.2.2	Richtungsfilter	174
8.2.3	Relaxationsfilter	176
8.2.4	Morphologische Filter	176
8.2.5	Rangordnungsfilter	180
9	Stochastische Bildsignale	183
9.1	Grundbegriffe der Informationstheorie	183
9.2	Statistiken n -ter Ordnung	189
9.3	Rauschmodelle	190
9.3.1	Rauschminderung mit mehreren Aufnahmen	192
9.3.2	Rauschen und Bilddatenkompression	193
9.4	Energiefunktionen	193
9.5	Bildrestaurierung	195
9.5.1	Invers-Filter	196
9.5.2	Restaurierung unter Zwang	196
9.5.3	Wiener-Hellstrom-Optimal-Filter	199
9.5.4	Richardson-Lucy-Algorithmus	202
9.5.5	Bewegungsunschärfe (<i>motion blur</i>)	203
9.5.6	Wellenfront Kodierung (<i>wavefront coding</i>)	209
9.5.7	Kodierte Apertur (<i>coded aperture imaging</i>)	209
10	Bildsegmentierung	211
10.1	Thresholding	212
10.2	Konturfolgeverfahren bei binärer Quantisierung	213
10.3	Konturfolgeverfahren bei lokaler ternärer Quantisierung	215
10.4	Konturfolgeverfahren bei beliebigen Punktmengen	218
10.5	<i>Seeded region growing</i>	220
10.6	Anwendung in der Biofilmanalyse	221
10.7	Liniendetektion	222
10.7.1	Dynamische Programmierung	222
10.7.2	Dijkstras Algorithmus	226
10.7.3	Graphbasierte Methoden	229
10.8	Akkumulations- oder Votingmethoden	231
10.8.1	Primale Voting-Methode zur Detektion von Geraden	231
10.8.2	Duale Voting-Methode: Hough-Transformation	233
10.8.3	Zeit- und Speicher-Effizienz	234
10.8.4	Hough-Transformation und Konvexgeometrie	235
10.8.5	Verallgemeinerungen	237

11	Farbbildverarbeitung	241
11.1	Spektrale Farben	242
11.2	Visuelle Farbwahrnehmung	243
11.3	Farbtafeln	244
11.4	Farbmodelle	246
11.4.1	Technikorientierte Farbmodelle	246
11.4.2	Wahrnehmungsorientierte Farbmodelle	249
11.5	Operationen auf Farbbildern	250
12	Texturen	253
12.1	Einführung	253
12.2	Elementare statistische Merkmale	255
12.3	Autoregressive Prozesse (AR)	256

Teil II 3D-Bildverarbeitung

13	3D-Geometrie	261
13.1	Geometrische Transformationen und homogene Koordinaten	261
13.1.1	Geometrische Transformationen in der Ebene	261
13.1.2	Homogene Koordinaten	263
13.2	Beschreibung von 3D-Rotationen	269
13.2.1	Beschreibung durch Rotationsmatrizen	269
13.2.2	Bestimmung der Drehachse und des Drehwinkels	272
13.2.3	Drehmatrix aus Drehachse und Drehwinkel	273
13.2.4	Beschreibung von 3D-Rotationen durch Quaternionen	273
13.2.5	Exponentielle Form einer Quaternion	279
13.2.6	Quaternionen über komplexen Zahlen	280
13.2.7	Dot-Produkte	281
13.2.8	Beispiele	281
13.2.9	Kanonisch exponentielle Darstellung einer Drehmatrix	283
13.2.10	Vor- und Nachteile	286
13.2.11	Eine Anwendung zur Bestimmung einer Rotation	286
13.2.12	Duale Zahlen, Duplex-Zahlen	288
13.2.13	Duale Quaternionen	289
13.2.14	Euklidische Transformationen und duale Quaternionen	290
14	Geometrie der Abbildungsprozesse	293
14.1	Kameramodelle	293
14.1.1	Orthografische Projektion	294
14.1.2	Skalierte orthografische Projektion	294
14.1.3	Anisotrop skalierte orthografische Projektion	295
14.1.4	Affine Kamera	296

14.1.5	Spezielle affine Kameras	296
14.1.6	Pinhole camera	296
14.1.7	Pinhole camera – Erweiterung 1	302
14.1.8	Pinhole camera – allgemeiner Fall	302
14.1.9	Normalisierte Koordinaten	303
14.1.10	Homographien	304
14.1.11	Kamerainvarianten	304
14.1.12	Homogene Koordinaten via Kartesische Koordinaten	308
14.2	Bewegung der Kamera	310
14.3	Invarianten	312
14.3.1	Punktinvarianten	312
14.3.2	Flächeninvarianten	317
14.3.3	Invarianten von Punkten, Geraden, Kurven	319
14.4	Epipolargeometrie	322
14.4.1	Zusammenhang über die Projektionsmatrizen	324
14.4.2	Zusammenhang über die Epipolartransformation	326
14.4.3	Zusammenhang über die <i>Essential Matrix</i>	328
14.4.4	Spezialfall: 3D-Punkte liegen in einer Ebene	334
14.4.5	Berechnung der Fundamentalmatrix	335
15	Kamerakalibrierung	339
15.1	Direkte Kalibrierung	339
15.2	Selbstkalibrierung	343
15.2.1	Allgemeines	343
15.2.2	Planare Kalibrierung nach Zhang	347
15.2.3	Tomasi und Kanade: Schwache Perspektive	352
15.2.4	Tomasi und Kanade: Perspektive	355
15.3	Kalibrierung mit der E-Matrix	356
15.4	Kameraparameter aus der Projektionsmatrix	356
15.5	Verzeichnungen	357
16	3D-Rekonstruktion	363
16.1	Rekonstruktion aus Projektionen	363
16.2	Rekonstruktion der 3D-Struktur von polyedrischen Objekten	367
16.2.1	<i>Weak perspective camera</i>	367
16.2.2	Affine Kamera	369
16.2.3	<i>Pinhole camera</i>	370
16.3	Triangulation von Raumpunkten	376
16.4	Bestimmung der Punktcorrespondenzen	378
16.5	Eine einfache, praktische 3D-Vermessungsaufgabe	380
16.6	Aktives Sehen	383
16.6.1	Projektion von Lichtstrahlen	383

16.6.2	Projektion mit Lichtebenen	383
16.6.3	Codierter Lichtansatz (Coded Light Approach)	384
16.6.4	Moire-Technik	387
16.6.5	Phasenshift-Verfahren	390
16.6.6	Profilometrie	393
16.6.7	Statistische Muster	394
16.6.8	Shape from focus/defocus	395
16.7	Photometrische Methoden der Rekonstruktion	398
16.7.1	Beleuchtung und Reflexion	398
16.7.2	Shape from Shading	400
16.8	Monokulare Rekonstruktion	403
16.8.1	Siebanalyse	403
16.8.2	Planare Vierecke	406
16.8.3	Rechtecke	408
16.8.4	Kugeln	410
16.8.5	Kreisscheiben	411
17	Tensoren in der Bildverarbeitung	415
17.1	Grundbegriffe der Tensoralgebra	415
17.1.1	Vektorraum V	415
17.1.2	Einstiessche Summenschreibweise	416
17.1.3	Dualer Vektorraum V^*	416
17.1.4	Multilineare Vektorfunktionen	417
17.1.5	Multilineare Vektorabbildungen	418
17.1.6	Wechsel des Koordinatensystems	419
17.1.7	Tensoren	420
17.2	Allgemeine Tensoren	423
17.2.1	Tensoralgebra	423
17.2.2	m -Vektoren	432
17.2.3	Rang von Tensoren	433
17.2.4	Zerlegung von Tensoren	435
17.3	Der Euklidische Raum	436
17.4	Tensorfelder	438
17.5	Anwendungen in der Bildverarbeitung	440
17.5.1	Der trifokale Tensor	440
17.5.2	Der Strukturtensor	443
Teil III	Objekterkennung	
18	Maschinelles Lernen	449
18.1	Grundprinzipien des maschinellen Lernens	449
18.1.1	Funktionale Modellierung	451

18.1.2	Stochastische Modellierung	451
18.1.3	Diskriminative und generative Klassifikatoren	452
18.2	Herausforderungen des Maschinellen Lernens	454
18.2.1	Modellkomplexität, Überanpassung und Generalisierung	454
18.2.2	Lernen mit wenigen Beispielen	455
18.3	Statistische Schätzer	456
18.3.1	Maximum-Likelihood und Maximum-A-Posteriori-Schätzung	456
18.3.2	Bayes-Ansätze und Marginalisierung	458
18.3.3	MMSE-Schätzer	459
18.3.4	Kombination von Modellen mit Bagging	460
18.4	Klassifikatoren	461
18.4.1	Nächster-Nachbar-Klassifikator	462
18.4.2	Normalverteilungsklassifikator	464
18.4.3	Entscheidungsbäume	466
18.4.4	Randomisierte Entscheidungsbäume	468
18.4.5	Boosting	470
18.4.6	Support-Vektor-Klassifikator	473
18.5	Kernelbasierte Klassifikation	478
18.5.1	Kernelfunktionen und nichtlineare Klassifikation	478
18.5.2	Mercer-Bedingung und Konstruktion von Kernelfunktionen .	481
18.5.3	Kerneldichteschätzung und Parzen-Klassifikator	484
18.5.4	Support-Vektor-Klassifikator mit Kernelfunktionen	486
18.5.5	Modellierung mit Gauß-Prozessen	490
18.5.6	Gauß-Prozess-Regression	495
18.5.7	Klassifikation mit Gauß-Prozessen	498
18.5.8	Laplace-Approximation	499
18.5.9	Zusammenhang zum SVM Ansatz	500
18.5.10	Mehrklassen-Klassifikation	502
18.5.11	Hyperparameter-Schätzung	503
18.6	Bewertung von Klassifikatoren	504
18.6.1	Wahl der Testbeispiele	504
18.6.2	Erkennungsraten bei mehreren Klassen	505
18.6.3	Bewertung von binären Klassifikatoren	506
18.7	Unüberwachte Verfahren und Gruppierung	508
18.7.1	Gruppierung mit k -Means	509
18.7.2	Schätzung von Mischverteilungen	510
19	Momente, Matching und Merkmale	515
19.1	Momente	515
19.2	Transformation der Momente	520
19.3	Normalisierung der Momente	522
19.4	Kovariante Merkmale, Verfahren und Umgebungen	524

19.5	Invarianten und Momente	527
19.5.1	Erweiterte Hu-Invarianten (Rotationen)	527
19.5.2	Invarianten für Euklidische Transformationen	528
19.5.3	Invarianten für Ähnlichkeitstransformationen	529
19.5.4	Invarianten für affine Transformationen	529
19.6	Gestaltsanalyse mit momentenbasiertem Fitting	530
19.7	Effiziente Berechnung von Konturmerkmalen	535
19.7.1	Elementare Konturmerkmale	535
19.7.2	Berechnung der Momente	539
19.8	Matching	541
19.8.1	Matchingmaße	542
19.8.2	Histogrammbasierte Matchingmaße	544
19.8.3	Signaturen	546
19.8.4	Matching und Registrierung	547
19.9	Lokale Merkmale und Häufigkeitshistogramme	571
19.9.1	Detektor nach Kadir und Brady	572
19.9.2	SIFT-Merkmale	572
19.9.3	HOG-Merkmale	575
19.9.4	Local Binary Patterns (LBP)	576
19.9.5	Statistiken von lokalen Merkmalen	577
19.9.6	Schnelle Berechnungen mit Integralbildern	579
19.10	Transformation von Merkmalen	580
19.10.1	<i>Principal Component Analysis (PCA)</i>	580
	19.10.2 Faktorenanalyse	585
20	Visuelle Erkennungsaufgaben	589
20.1	Herausforderungen der visuellen Objekterkennung	589
20.2	Bildklassifikation	591
20.2.1	Kategorisierung mit globalen Merkmalen	591
20.2.2	Kernelbasierte Kombination von mehreren Merkmalen	595
20.2.3	Kombinierte Merkmalsberechnung und Klassifikation	596
20.2.4	Erkennung auf Instanzebene	597
20.3	Objektklassifikation	598
20.3.1	Sliding-Window Klassifikation	599
20.3.2	Viola-und-Jones-Verfahren	600
20.3.3	Fusion von Objekthypothesen	604
20.3.4	HOG Detektor	605
20.3.5	Teilebasierte Verfahren	606
20.4	Semantische Segmentierung	607
20.4.1	Klassifikation lokaler Deskriptoren	607
20.4.2	Klassifikation mit effizienten Pixelmerkmalen	609
20.4.3	Iterative Verwendung von Kontextmerkmalen	611

Teil IV Mathematische Hilfsmittel

21	Ausgleichsrechnung	617
21.1	Quadratische Formen und Eigenwertprobleme	617
21.2	Ausgleichsrechnung	620
21.2.1	Lineare Ausgleichsrechnung	620
21.2.2	Nichtlineare Ausgleichsrechnung	625
21.2.3	Kovariantes Fitting	630
21.2.4	Ausreißer-Probleme (Outlier)	633
21.2.5	Andere Schätzer (LAD)	636
22	Lineare Algebra und Stochastik	639
22.1	Pseudoinverse	639
22.2	Regularisierung nach Tichonov und Arsenin	644
22.3	Singulärwertzerlegung (SVD)	645
22.3.1	Grundlagen	645
22.3.2	Anwendungen	647
22.4	Blockmatrizen	649
22.5	Normalverteilungen	651
Literatur	653	
Sachverzeichnis	659	