

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Sichtprüfung	3
1.2	Optische Erfassung von Prüfbobjekten	9
1.3	Entstehung und Definition eines Bildes	11
1.4	Automatische Sichtprüfung	13
1.5	Praktische Durchführung von Sichtprüfungsprojekten	19
1.6	Literatur	19
I	Bildgewinnung	21
2	Licht	23
2.1	Phänomen Licht	27
2.1.1	Das elektromagnetische Spektrum	28
2.2	Licht als elektromagnetische Welle	28
2.2.1	Maxwell'sche Gleichungen	28
2.2.1.1	Wellengleichung des elektrischen Felds	31
2.2.2	Polarisation	37
2.2.2.1	Die Polarisationsellipse	38
2.2.2.2	Stokes-Vektoren	39
2.2.2.3	Die Poincaré-Kugel	43
2.2.2.4	Müller-Matrizen	44
2.2.2.5	Messung des Polarisationszustands	50
2.2.2.6	Jones-Kalkül	51
2.2.3	Huygens'sches Prinzip	53
2.2.4	Kohärenz	53
2.2.5	Interferenz	56
2.2.6	Beugung	59
2.2.6.1	Auflösung abbildender Systeme	71
2.2.7	Speckle	74
2.3	Licht als Quantenphänomen	76
2.4	Das Strahlenmodell der geometrischen Optik	81
2.5	Zusammenfassung	81
2.6	Wechselwirkung von Licht und Materie	82
2.6.1	Absorption	82
2.6.2	Reflexionsgesetz	83
2.6.3	Brechungsgesetz	84

2.6.4	Streuung	86
2.6.5	Die Fresnel'schen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten	88
2.6.6	Elektromagnetische Wellen in leitfähigen Medien	94
2.6.6.1	Der komplexe Brechungsindex	94
2.6.6.2	Reflexion an leitfähigen Medien	96
2.7	Lichtquellen	99
2.7.1	Temperaturstrahler	99
2.7.1.1	Physikalische Grundlagen	99
2.7.1.2	Glüh- und Halogenlampen	101
2.7.2	Gasentladungslampen	103
2.7.3	Leuchtdioden	108
2.7.4	Laser	111
2.7.5	Zusammenfassung	115
2.8	Literatur	117
3	Optische Abbildung	121
3.1	Einleitung	123
3.2	Abbildung mit einer Lochkamera, Zentralprojektion	125
3.3	Kameramodell und Kamerakalibrierung	128
3.4	Abbildung mit einer Linse (Objektiv)	132
3.4.1	Paraxiale Näherung und Gauß'sche Optik	133
3.4.2	Abbildungsgesetz	135
3.4.3	Bündelbegrenzung	142
3.4.4	Schärfentiefe	147
3.4.5	Telezentrische Abbildung	153
3.4.5.1	Abbildungsunschärfe bei der telezentrischen Optik	156
3.4.5.2	Beidseitige Telezentrie	157
3.4.6	Perspektive	158
3.4.7	Abbildung bei verkippten Ebenen	161
3.4.8	Abbildungsfehler	165
3.4.8.1	Seidel'sche Aberrationen sphärischer Linsen	166
3.4.8.2	Chromatische Aberration	170
3.5	Optische Instrumente mit mehreren Linsen	171
3.5.1	Projektionsapparat	171
3.5.2	Mikroskop	172
3.6	Literatur	175
4	Radiometrie	177
4.1	Radiometrische Größen	179

4.2	Das Lichtfeld eines Prüfobjekts	185
4.3	Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF)	188
4.3.1	BRDF und Streulicht	192
4.4	Bildwertentstehung bei der optischen Abbildung mit einer dünnen Linse	195
4.5	Literatur	198
5	Farbe	201
5.1	Photometrie	203
5.2	Farbwahrnehmung und Farbräume	205
5.2.1	Farbwahrnehmung des menschlichen Auges	206
5.2.2	Farbmischung	211
5.2.3	Die CIE-Farbräume	214
5.2.4	Spektralphotometrische Farbmessung und Farbabstands- bestimmung	229
5.2.5	Farbordnungssysteme	237
5.2.6	Weitere Farbräume	238
5.2.6.1	Gamma-Korrektur	238
5.2.6.2	RGB-Farbräume	239
5.2.6.3	HSI und HSV	242
5.2.6.4	YUV und $Y C_B C_R$	243
5.2.6.5	Farbdruck und CMYK	244
5.3	Filter	245
5.4	Aufnahme und Verarbeitung von Farbbildern	248
5.5	Literatur	250
6	Sensoren zur Bildgewinnung	253
6.1	Punkt-, Zeilen- und Flächensensoren	256
6.2	Röhrenkameras	256
6.3	Photomultiplier	256
6.3.1	Restlichtverstärker	257
6.4	Photodioden	258
6.5	PSD-Sensoren	261
6.6	CCD-Sensoren	263
6.7	CMOS-Sensoren	266
6.8	Zeilenkameras	267
6.9	Farbsensoren und Farbkameras	268
6.10	Infrarotkameras	269

6.10.1	Bolometer-Kameras	270
6.10.2	Infrarot-Quantendetektorkameras	271
6.11	Qualitätskriterien für Bildsensoren	272
6.12	Literatur	274
7	Bilddaufnahmeverfahren	277
7.1	Einleitung	281
7.2	Erfassung der optischen Eigenschaften	284
7.2.1	Messung des komplexen Brechungsindex	284
7.2.1.1	Reflektometrie	284
7.2.1.2	Ellipsometrie	289
7.2.2	Fluoreszenz	297
7.2.3	Verfahren zur Reflektanzerfassung	300
7.2.3.1	Diffuse Beleuchtung	300
7.2.3.2	Hellfeldbeleuchtung	302
7.2.3.3	Dunkelfeldbeleuchtung	302
7.2.3.4	Laserscanner	305
7.2.3.5	Flachbettscanner	307
7.2.4	Spektralsensoren	308
7.2.5	Streulichtverfahren und Prüfung der Oberflächenrauheit	310
7.3	Erfassung der räumlichen Gestalt (3D-Form)	314
7.3.1	Triangulation (punktweise Abtastung)	315
7.3.2	Lichtschnittverfahren (Linienabtastung)	320
7.3.3	Messunsicherheit der Triangulation	323
7.3.4	Strukturierte Beleuchtung (Flächenabtastung)	325
7.3.4.1	Streifenprojektion	326
7.3.5	Deflektometrie	332
7.3.5.1	Offene Forschungsfragen der Deflektometrie	342
7.3.6	Moiré-Verfahren	342
7.3.6.1	Der Moiré-Effekt	342
7.3.6.2	Mathematisches Modell des Moiré-Effekts	344
7.3.6.3	Telezentrische Streifenprojektion	345
7.3.6.4	Schattenmoiré	350
7.3.6.5	Projektionsmoiré	352
7.3.7	Schlussbetrachtung zur strukturierten Beleuchtung	353
7.3.8	Stereoaufnahmen	353
7.3.8.1	Herleitung der Fundamentalmatrix	354
7.3.8.2	Stereokorrespondenzalgorithmen	358
7.3.8.3	Stereorekonstruktion	359
7.3.8.4	Mehrkamerasysteme	360

7.3.8.5	Monokulares Stereo	360
7.3.9	Lichtfeldkamera	361
7.3.10	Silhouettenerfassung	366
7.3.10.1	Telezentrische Silhouettenerfassung	369
7.3.10.2	Beleuchtung für die telezentrische Abbildung	369
7.3.10.3	Retroreflektoren	373
7.3.11	Shape from Shading	373
7.3.12	Autofokussensoren	376
7.3.13	Konfokale Mikroskopie	378
7.3.14	Konfokale chromatische Triangulation	382
7.3.15	Lichtlaufzeitsensoren	383
7.3.16	Phasenbasierte Verfahren	383
7.3.16.1	Interferometrie	384
7.3.16.2	Speckleinterferometrie für die Materialprüfung	390
7.3.16.3	Scherographie	391
7.3.16.4	Holographie	393
7.4	Erfassung innerer Objektstrukturen	398
7.4.1	Thermographie	398
7.4.2	Bildgebung mit Röntgenstrahlung	404
7.4.3	Optische Kohärenztomographie	410
7.4.4	Schlierenmessverfahren und Schlierentomographie	412
7.4.5	Bildaufnahme mit Terahertz-Strahlung	413
7.4.6	Spannungsoptik	421
7.5	Spezielle Bildaufnahmeverfahren	429
7.5.1	Bildaufnahmesystem mit variabler Beleuchtungsrichtung	434
7.5.2	Endoskopie	435
7.6	Allgemeine Prinzipien	437
7.6.1	Fremdlichtunterdrückung	437
7.6.2	Inverse Beleuchtung	438
7.7	Zusammenfassung	443
7.8	Literatur	444

II Bildauswertung

457

8	Bildsignale	459
8.1	Mathematische Beschreibung von Bildsignalen	463
8.2	Systeme und Signale	464
8.2.1	Systemeigenschaften	467
8.2.2	Dirac-Impuls	469

8.2.2.1	Definition des Dirac-Impulses	469
8.2.2.2	Eigenschaften des Dirac-Impulses	470
8.2.3	Der Faltungsoperator	472
8.3	Die Fourier-Transformation	474
8.3.1	Eindimensionale Fourier-Transformation	474
8.3.1.1	Definition der Fourier-Transformation	474
8.3.1.2	Eigenschaften der Fourier-Transformation	477
8.3.1.3	Korrespondenzen der Fourier-Transformation	482
8.3.2	Das eindimensionale Abtasttheorem	486
8.3.3	Diskrete Fourier-Transformation (DFT)	490
8.3.3.1	Definition der DFT	490
8.3.3.2	Eigenschaften der DFT	491
8.3.3.3	Leckeffekt	493
8.3.3.4	Schnelle Fourier-Transformation (FFT)	496
8.3.3.5	Faltungstheorem der DFT	496
8.3.4	Die zweidimensionale Fourier-Transformation	498
8.3.4.1	Definition der zweidimensionalen Fourier-Transformation	498
8.3.4.2	Eigenschaften der zweidimensionalen Fourier-Transformation	499
8.3.5	Delta-Funktionen im Zweidimensionalen	504
8.3.6	Sprungfunktion im Zweidimensionalen	506
8.3.7	Abtastung zweidimensionaler Signale	508
8.3.8	Abtasttheorem für zweidimensionale Signale	511
8.3.9	Die zweidimensionale DFT	514
8.3.9.1	Praktische Berechnung der 2D-DFT	515
8.3.9.2	Faltungstheorem der 2D-DFT	515
8.3.9.3	Bedeutung von Betrag und Phase	515
8.3.9.4	Beispiele zur zweidimensionalen DFT	516
8.4	Anwendungsbeispiele zur Systemtheorie und Fourier-Transformation	525
8.5	Bildsignale als stochastische Prozesse	533
8.5.1	Momente stochastischer Prozesse	535
8.5.2	Stationarität und Ergodizität	539
8.5.3	Übertragung stochastischer Prozesse durch LSI-Systeme	543
8.6	Quantisierung	550
8.6.1	Optimale Quantisierung	551
8.6.2	Quantisierungstheorem	554
8.6.3	Modellierung der Quantisierung	560
8.7	Rauschen digitaler Bildsensoren	562

8.8	Karhunen-Loève-Transformation	566
8.8.1	Definition der Karhunen-Loève-Transformation	567
8.8.2	Eigenschaften der Karhunen-Loève-Transformation	568
8.8.3	Anwendungsbeispiele zur Karhunen-Loève-Transformation	572
8.9	Literatur	576
9	Vorverarbeitung und Bildverbesserung	579
9.1	Einfache Bildverbesserungsmaßnahmen	581
9.1.1	Kontrasterhöhung durch Histogrammspreizung	581
9.1.2	Histogrammanipulation	583
9.1.3	Pseudo- und Falschfarbendarstellung	587
9.1.3.1	Pseudofarbendarstellung	587
9.1.3.2	Falschfarbendarstellung	588
9.1.4	Bildverschärfung	590
9.2	Verminderung systematischer Störeinflüsse	591
9.2.1	Geometrische Entzerrung	591
9.2.1.1	Bilineare Interpolation	594
9.2.1.2	Systemtheoretische Deutung der Interpolation	595
9.2.2	Ausgleich von Inhomogenitäten	596
9.2.2.1	Signalmodell	597
9.2.2.2	Homogenität	598
9.2.2.3	Homomorphe Filterung	600
9.2.2.4	Homogenisierung	602
9.3	Verminderung zufälliger Störungen	610
9.3.1	Lineare Filter	611
9.3.1.1	Tiefpassfilter zur Störungsunterdrückung	617
9.3.1.2	Gleitende Mittelung	617
9.3.1.3	Kegel-Tiefpass	621
9.3.1.4	Gauß-Tiefpass	621
9.3.1.5	Idealer Tiefpass	627
9.3.1.6	Erzeugung von Hochpässen, Bandsperren und Bandpässen aus gegebenem Tiefpass	628
9.3.1.7	Exkurs: Z-Transformation	628
9.3.2	Störungsunterdrückung mit nichtlinearen Filtern	632
9.3.2.1	Medianfilter	633
9.3.2.2	Filter auf Basis von Ordnungsstatistiken	638
9.3.2.3	Bilateralfilter	638
9.4	Registrierung	641
9.5	Literatur	643

10 Bildrestauration	645
10.1 Signalmodell	647
10.2 Inverses Filter	652
10.3 Wiener-Filter	658
10.4 Geometrisches Mittelwertfilter	665
10.5 Optimales Constraint-Filter	667
10.6 Restaurationsprobleme in Matrixnotation	670
10.7 Restauration bei partizipierenden Medien	674
10.8 Ortsvariante Bildrestauration	678
10.9 Literatur	680
11 Segmentierung	681
11.1 Bereichsorientierte Segmentierung	684
11.1.1 Segmentierung durch merkmalsbasierte Klassifikation	684
11.1.2 Bereichswachstumsverfahren	691
11.2 Kantenorientierte Verfahren	692
11.2.1 Gradientenfilter	695
11.2.1.1 Konstruktion symmetrischer linearer Ableitungsfilter	696
11.2.1.2 Differentiation mittels DFT	699
11.2.1.3 Differenzierter Gauß-Tiefpass	701
11.2.1.4 Einfache Kantenoperatoren	703
11.2.2 Kantendetektion mit Hilfe der zweiten Ableitung	704
11.2.3 Wasserscheidentransformation	710
11.3 Diffusionsfilter	711
11.3.1 Lineare, homogene, isotrope Bilddiffusion	713
11.3.2 Lineare, inhomogene, isotrope Bilddiffusion	714
11.3.3 Nichtlineare, inhomogene, isotrope Bilddiffusion	714
11.3.4 Nichtlineare, inhomogene, anisotrope Bilddiffusion	715
11.4 Aktive Konturen	722
11.4.1 Gradient Vector Flow	727
11.4.2 Vector Field Convolution	729
11.5 Segmentierung nach Mumford und Shah	731
11.6 Minimaler Netzwerkschnitt (Graph-Cut-Verfahren)	733
11.7 Literatur	743
12 Morphologische Bildverarbeitung	747
12.1 Binärmorphologie	749
12.1.1 Punktmengen und strukturierende Elemente	749

12.1.2	Erosion und Dilatation	752
12.1.2.1	Dualität von Erosion und Dilatation	760
12.1.3	Öffnung und Schließung	763
12.1.4	Randextraktion	766
12.1.5	Regionen ausfüllen	767
12.1.6	Komponentenmarkierung und Zusammenhangsanalyse . . .	768
12.1.7	Alles-oder-Nichts-Operator (Hit-or-Miss)	770
12.1.7.1	Verdünnung	771
12.1.7.2	Verdickung	774
12.1.8	Skelettierung	775
12.1.9	Entbartung	777
12.2	Grauwertmorphologie	780
12.2.1	Punktmenge eines Grauwertbildes	780
12.2.2	Erosion und Dilatation	783
12.2.3	Öffnung und Schließung	788
12.2.4	Kantendetektion	792
12.3	Literatur	795
13	Texturanalyse	797
13.1	Texturtypen	800
13.1.1	Struktureller Texturtyp	801
13.1.2	Strukturell-statistischer Texturtyp	802
13.1.3	Statistischer Texturtyp	803
13.2	Sichtprüfungsaufgaben bezüglich Texturen	804
13.3	Modellbasierte Texturanalyse	805
13.3.1	Analyse struktureller Texturen	805
13.3.2	Analyse strukturell-statistischer Texturen	812
13.3.3	Autoregressive Modelle zur Analyse statistischer Texturen . .	815
13.3.4	Separation von Linientexturen	818
13.4	Merkmalsbasierte Texturanalyse	824
13.4.1	Wichtige statistische Texturmerkmale	825
13.4.2	Grauwertübergangsmatrix	827
13.4.3	Richtungshistogramm zur Analyse der Anisotropie von Texturen	831
13.4.4	Laufängenanalyse	832
13.4.5	Textur-Energiemaße nach Laws	833
13.4.6	Local Binary Patterns	835
13.5	Literatur	837

14 Detektion	841
14.1 Detektion bekannter Objekte mittels linearer Filter	844
14.1.1 Unbekannter Hintergrund	845
14.1.2 Weißes Rauschen als Hintergrund	847
14.1.3 Korreliertes, schwach stationäres Rauschen als Hintergrund .	849
14.1.4 Diskret formuliertes Matched Filter	851
14.2 Detektion unbekannter Objekte (Defekte)	855
14.3 Geradendetektion	856
14.3.1 Die Radon-Transformation	857
14.3.1.1 Definition	858
14.3.1.2 Das Zentralschnitt-Theorem	861
14.3.1.3 Effiziente Berechnung der Radon-Transformation .	863
14.3.2 Detektion geradenhafter Strukturen	866
14.3.2.1 Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR)	866
14.3.2.2 Detektion mittels Korrelationsfilter	867
14.3.2.3 Anwendungsbeispiele	868
14.3.3 Die Hough-Transformation zur Geradendetektion	869
14.4 Kurven- und Strukturdetektion	873
14.4.1 Die Hough-Transformation zur Detektion von Kurven	873
14.4.2 Die verallgemeinerte Hough-Transformation	875
14.4.3 Implicit Shape Models	877
14.5 Eckendetektion	878
14.6 Literatur	882
15 Bildpyramiden, Wavelet-Transformation und Multiskalenanalyse	885
15.1 Bildpyramiden	887
15.1.1 Gauß-Pyramide	890
15.1.2 Laplace-Pyramide	890
15.1.3 Pyramid-Linking	892
15.2 Wavelets	893
15.2.1 Kontinuierliche Wavelet-Transformation	894
15.2.2 Diskretisierung der Wavelet-Transformation	897
15.3 Multiskalenanalyse	899
15.4 Die schnelle Wavelet-Transformation	906
15.5 Die zweidimensionale Wavelet-Transformation	910
15.6 Skaleninvariante Merkmale	913
15.7 Literatur	919

III Anhänge	921
A Mathematische Grundlagen	923
A.1 Strahlensatz	925
A.2 Inverse Probleme	927
A.3 Literatur	928
B Die Fourier-Transformation	929
B.1 Die eindimensionale Fourier-Transformation	931
B.1.1 Definition	931
B.1.2 Gesetze	932
B.1.3 Korrespondenzen	933
B.2 Die n-dimensionale Fourier-Transformation	935
B.2.1 Definition	935
B.2.2 Korrespondenzen der zweidimensionalen Fourier-Transformation	935
B.3 Die diskrete Fourier-Transformation	936
Symbolverzeichnis	939
Abkürzungsverzeichnis	959
Index	963