

Beyerer • Puente León • Frese

Automatische Sichtprüfung

Grundlagen, Methoden und Praxis
der Bildgewinnung und Bildauswertung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Sichtprüfung	3
1.2	Optische Erfassung von Prüfobjekten	9
1.3	Entstehung und Definition eines Bildes	11
1.4	Automatische Sichtprüfung	13
1.5	Praktische Durchführung von Sichtprüfungsprojekten	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
2.2.3	Huygens'sches Prinzip	51
2.2.4	Kohärenz	51
2.2.5	Interferenz	54
2.2.6	Beugung	57
2.2.6.1	Auflösung abbildender Systeme	69
2.2.7	Speckle	73
2.3	Licht als Quantenphänomen	75
2.4	Das Strahlenmodell der geometrischen Optik	80
2.5	Zusammenfassung	80
2.6	Wechselwirkung von Licht und Materie	80
2.6.1	Absorption	81
2.6.2	Reflexionsgesetz	82
2.6.3	Brechungsgesetz	83
2.6.4	Streuung	85

2.6.5	Die Fresnel'schen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten	86
2.6.6	Elektromagnetische Wellen in leitfähigen Medien	93
2.6.6.1	Der komplexe Brechungsindex	93
2.7	Lichtquellen	97
2.7.1	Temperaturstrahler	98
2.7.1.1	Physikalische Grundlagen	98
2.7.1.2	Glüh- und Halogenlampen	100
2.7.2	Gasentladungslampen	102
2.7.3	Leuchtdioden	106
2.7.4	Laser	110
2.7.5	Zusammenfassung	114
3	Optische Abbildung	117
3.1	Einleitung	119
3.2	Abbildung mit einer Lochkamera (Zentralprojektion)	121
3.3	Kameramodell und Kamerakalibrierung	124
3.4	Abbildung mit einer Linse (Objektiv)	129
3.4.1	Paraxiale Näherung und Gauß'sche Optik	130
3.4.2	Abbildungsgesetz	131
3.4.3	Bündelbegrenzung	139
3.4.4	Schärfentiefe	145
3.4.5	Telezentrische Abbildung	150
3.4.5.1	Abbildungsunschärfe bei der telezentrischen Optik	152
3.4.5.2	Beidseitige Telezentrie	153
3.4.6	Perspektive	154
3.4.7	Abbildung bei verkippten Ebenen	158
3.4.8	Abbildungsfehler	162
3.4.8.1	Seidel'sche Aberrationen sphärischer Linsen	163
3.4.8.2	Chromatische Aberration	166
3.5	Optische Instrumente mit mehreren Linsen	168
3.5.1	Projektionsapparat	168
3.5.2	Mikroskop	169
4	Radiometrie	173
4.1	Radiometrische Größen	175
4.2	Das Lichtfeld eines Prüfobjekts	181
4.3	Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF)	184

4.3.1	BRDF und Streulicht	187
4.4	Bildwertentstehung	190
4.4.1	Anwendung auf eine dünne Linse	190
5	Farbe	193
5.1	Photometrie	195
5.2	Farbwahrnehmung und Farbräume	197
5.2.1	Farbwahrnehmung des menschlichen Auges	198
5.2.2	Farbmischung	203
5.2.3	Die CIE-Farbräume	206
5.2.4	Spektralphotometrische Farbmessung und Farb- abstandsbestimmung	222
5.2.5	Farbordnungssysteme	230
5.2.6	Weitere Farbräume	231
5.2.6.1	Gamma-Korrektur	232
5.2.6.2	RGB-Farbräume	233
5.2.6.3	HSI und HSV	236
5.2.6.4	YUV und $Y C_B C_R$	237
5.2.6.5	Farbdruck und CMYK	238
5.3	Filter	239
5.4	Aufnahme und Verarbeitung von Farbbildern	243
6	Sensoren zur Bildgewinnung	245
6.1	Punkt-, Zeilen- und Flächensensoren	248
6.2	Röhrenkameras	248
6.3	Photomultiplier	248
6.3.1	Restlichtverstärker	249
6.4	Photodioden	250
6.5	PSD-Sensoren	253
6.6	CCD-Sensoren	255
6.7	CMOS-Sensoren	258
6.8	Zeilenkameras	260
6.9	Farbsensoren und Farbkameras	261
6.10	Infrarotkameras	262
6.10.1	Bolometer-Kameras	263
6.10.2	Infrarot-Quantendetektorkameras	264
6.11	Qualitätskriterien für Bildsensoren	265

7 Bildaufnahmeverfahren	267
7.1 Einleitung	271
7.2 Erfassung der optischen Eigenschaften	274
7.2.1 Messung des komplexen Brechungsindexes	274
7.2.1.1 Reflektometrie	274
7.2.1.2 Ellipsometrie	279
7.2.2 Fluoreszenz	287
7.2.3 Verfahren zur Reflektanzerfassung	290
7.2.3.1 Diffuse Beleuchtung	291
7.2.3.2 Hellfeldbeleuchtung	292
7.2.3.3 Dunkelfeldbeleuchtung	293
7.2.3.4 Laserscanner	294
7.2.3.5 Flachbettscanner	297
7.2.4 Spektrosensoren	297
7.2.5 Streulichtverfahren und Prüfung der Oberflächenrauheit	299
7.3 Erfassung der räumlichen Gestalt (3D-Form)	302
7.3.1 Triangulation (punktweise Abtastung)	303
7.3.2 Lichtschnittverfahren (Linienabtastung)	308
7.3.3 Messunsicherheit der Triangulation	310
7.3.4 Strukturierte Beleuchtung (Flächenabtastung)	313
7.3.4.1 Streifenprojektion	314
7.3.5 Deflektometrie	320
7.3.6 Moiré-Verfahren	330
7.3.6.1 Der Moiré-Effekt	330
7.3.6.2 Mathematisches Modell des Moiré-Effekts	332
7.3.6.3 Telezentrische Streifenprojektion	333
7.3.6.4 Schattenmoiré	338
7.3.6.5 Projektionsmoiré	340
7.3.7 Schlussbetrachtung zur strukturierten Beleuchtung	341
7.3.8 Stereoaufnahmen	341
7.3.8.1 Herleitung der Fundamentalmatrix	343
7.3.8.2 Stereokorrespondenzalgorithmen	346
7.3.8.3 Stereorekonstruktion	347
7.3.8.4 Mehrkamerasysteme	348
7.3.8.5 Monokulares Stereo	349
7.3.9 Lichtfeldkamera	349
7.3.10 Silhouettenerfassung	355
7.3.10.1 Telezentrische Silhouettenerfassung	358
7.3.10.2 Beleuchtung für die telezentrische Abbildung	358

- 7.3.10.3 Retroreflektoren 360
- 7.3.11 Shape from Shading 362
- 7.3.12 Autofokussensoren 364
- 7.3.13 Konfokale Mikroskopie 365
- 7.3.14 Lichtlaufzeitsensoren 370
- 7.3.15 Phasenbasierte Verfahren 371
 - 7.3.15.1 Interferometrie 371
 - 7.3.15.2 Speckleinterferometrie für die Materialprüfung 378
 - 7.3.15.3 Scherographie 379
 - 7.3.15.4 Holographie 381
- 7.4 Erfassung innerer Objektstrukturen 386
 - 7.4.1 Thermographie 386
 - 7.4.2 Bildgebung mit Röntgenstrahlung 392
 - 7.4.3 Bildaufnahme mit Terahertz-Strahlung 399
 - 7.4.4 Spannungsoptik 406
- 7.5 Spezielle Bildaufnahmeverfahren 414
 - 7.5.1 Bildaufnahmesystem mit variabler Beleuchtungsrichtung 419
 - 7.5.2 Endoskopie 420
- 7.6 Allgemeine Prinzipien 422
 - 7.6.1 Fremdlichtunterdrückung 422
 - 7.6.2 Inverse Beleuchtung 424
- 7.7 Zusammenfassung 430

II Bildauswertung 433

- 8 Bildsignale 435**
- 8.1 Mathematische Beschreibung von Bildsignalen 439
- 8.2 Systeme und Signale 440
 - 8.2.1 Systemeigenschaften 443
 - 8.2.2 Dirac-Impuls 445
 - 8.2.2.1 Definition des Dirac-Impulses 445
 - 8.2.2.2 Eigenschaften des Dirac-Impulses 447
 - 8.2.3 Der Faltungsoperator 449
- 8.3 Die Fourier-Transformation 450
 - 8.3.1 Eindimensionale Fourier-Transformation 450
 - 8.3.1.1 Definition der Fourier-Transformation 450
 - 8.3.1.2 Eigenschaften der Fourier-Transformation . . . 453
 - 8.3.1.3 Korrespondenzen der Fourier-Transformation 459

8.3.2	Das eindimensionale Abtasttheorem	462
8.3.3	Diskrete Fourier-Transformation (DFT)	465
8.3.3.1	Definition der DFT	465
8.3.3.2	Eigenschaften der DFT	468
8.3.3.3	Leckeffekt	469
8.3.3.4	Schnelle Fourier-Transformation (FFT)	471
8.3.3.5	Faltungstheorem der DFT	472
8.3.4	Die zweidimensionale Fourier-Transformation	473
8.3.4.1	Definition der zweidimensionalen Fourier- Transformation	473
8.3.4.2	Eigenschaften der zweidimensionalen Fourier- Transformation	474
8.3.5	Delta-Funktionen im Zweidimensionalen	479
8.3.6	Abtastung zweidimensionaler Signale	481
8.3.7	Abtasttheorem für zweidimensionale Signale	484
8.3.8	Die zweidimensionale DFT	487
8.3.8.1	Praktische Berechnung der 2D-DFT	487
8.3.8.2	Faltungstheorem der 2D-DFT	488
8.3.8.3	Bedeutung von Betrag und Phase	488
8.3.8.4	Beispiele zur zweidimensionalen DFT	489
8.4	Anwendungsbeispiele zur Systemtheorie und Fourier-Transfor- mation	498
8.5	Bildsignale als stochastische Prozesse	504
8.5.1	Momente stochastischer Prozesse	506
8.5.2	Stationarität und Ergodizität	511
8.5.3	Übertragung stochastischer Prozesse durch LSI-Systeme	515
8.6	Quantisierung	522
8.6.1	Optimale Quantisierung	523
8.6.2	Quantisierungstheorem	526
8.6.3	Modellierung der Quantisierung	532
8.7	Karhunen-Loève-Transformation	535
8.7.1	Definition der Karhunen-Loève-Transformation	536
8.7.2	Eigenschaften der Karhunen-Loève-Transformation . . .	537
8.7.3	Anwendungsbeispiele zur Karhunen-Loève-Transforma- tion	541
9	Vorverarbeitung und Bildverbesserung	547
9.1	Einfache Bildverbesserungsmaßnahmen	549
9.1.1	Kontrasterhöhung durch Histogrammspreizung	549

9.1.2	Histogrammanipulation	551
9.1.3	Pseudo- und Falschfarbendarstellung	555
9.1.3.1	Pseudofarbendarstellung	555
9.1.3.2	Falschfarbendarstellung	557
9.1.4	Bildverschärfung	557
9.2	Verminderung systematischer Störeinflüsse	559
9.2.1	Geometrische Entzerrung	560
9.2.1.1	Bilineare Interpolation	562
9.2.1.2	Systemtheoretische Deutung der Interpolation	564
9.2.2	Ausgleich von Inhomogenitäten	565
9.2.2.1	Signalmodell	566
9.2.2.2	Homogenität	567
9.2.2.3	Homomorphe Filterung	569
9.2.2.4	Homogenisierung	571
9.3	Verminderung zufälliger Störungen	579
9.3.1	Lineare Filter	580
9.3.1.1	Tiefpassfilter zur Störungsunterdrückung	586
9.3.1.2	Gleitende Mittelung	586
9.3.1.3	Kegel-Tiefpass	589
9.3.1.4	Gauß-Tiefpass	590
9.3.1.5	Idealer Tiefpass	596
9.3.1.6	Erzeugung von Hochpässen, Bandsperren und Bandpässen aus gegebenem Tiefpass	597
9.3.2	Störungsunterdrückung mit nichtlinearen Filtern	598
9.3.2.1	Medianfilter	599
9.3.2.2	Filter auf Basis von Ordnungsstatistiken	602
10	Bildrestauration	605
10.1	Signalmodell	607
10.2	Inverses Filter	612
10.3	Wiener-Filter	619
10.4	Geometrisches Mittelwertfilter	624
10.5	Optimales Constraint-Filter	625
10.6	Restaurationsprobleme in Matrixnotation	631
10.7	Ortsvariante Bildrestauration	634
11	Segmentierung	637
11.1	Bereichsorientierte Segmentierung	640
11.1.1	Segmentierung durch merkmalsbasierte Klassifikation	640

11.1.2	Bereichswachstumsverfahren	648
11.2	Kantenorientierte Verfahren	649
11.2.1	Gradientenfilter	650
11.2.1.1	Konstruktion symmetrischer linearer Ableitungsfilter	654
11.2.1.2	Differentiation mittels DFT	656
11.2.1.3	Differenzierter Gauß-Tiefpass	657
11.2.1.4	Einfache Kantenoperatoren	659
11.2.2	Kantendetektion mit Hilfe der zweiten Ableitung	660
11.2.3	Wasserscheidentransformation	664
11.3	Diffusionsfilter	664
11.3.1	Lineare, homogene, isotrope Bilddiffusion	667
11.3.2	Lineare, inhomogene, isotrope Bilddiffusion	668
11.3.3	Nichtlineare, inhomogene, isotrope Bilddiffusion	668
11.3.4	Nichtlineare, inhomogene, anisotrope Bilddiffusion	669
11.4	Aktive Konturen	676
11.4.1	Gradient Vector Flow	682
11.4.2	Vector Field Convolution	683
11.5	Segmentierung nach Mumford und Shah	686
11.6	Minimaler Netzwerkschnitt (Graph-Cut-Verfahren)	689
12	Morphologische Bildverarbeitung	699
12.1	Binärmorphologie	701
12.1.1	Punktmengen und strukturierende Elemente	701
12.1.2	Erosion und Dilatation	704
12.1.2.1	Dualität von Erosion und Dilatation	713
12.1.3	Öffnung und Schließung	715
12.1.4	Randextraktion	719
12.1.5	Regionen ausfüllen	720
12.1.6	Komponentenmarkierung und Zusammenhangsanalyse	721
12.1.7	Alles-oder-Nichts-Operator (Hit-or-Miss)	723
12.1.7.1	Verdünnung	724
12.1.7.2	Verdickung	727
12.1.8	Skelettierung	728
12.1.9	Entbartung	731
12.2	Grauwertmorphologie	735
12.2.1	Punktmenge eines Grauwertbildes	735
12.2.2	Erosion und Dilatation	737
12.2.3	Öffnung und Schließung	742

12.2.4 Kantendetektion	746
13 Texturanalyse	751
13.1 Texturtypen	754
13.1.1 Struktureller Texturtyp	755
13.1.2 Strukturell-statistischer Texturtyp	756
13.1.3 Statistischer Texturtyp	757
13.2 Sichtprüfungsaufgaben bezüglich Texturen	758
13.3 Modellbasierte Texturanalyse	759
13.3.1 Analyse struktureller Texturen	759
13.3.2 Analyse strukturell-statistischer Texturen	767
13.3.3 Autoregressive Modelle zur Analyse statistischer Texturen	770
13.3.4 Separation von Linientexturen	773
13.4 Merkmalsbasierte Texturanalyse	780
13.4.1 Wichtige statistische Texturmerkmale	780
13.4.2 Grauwertübergangsmatrix	782
13.4.3 Richtungshistogramm zur Analyse der Anisotropie von Texturen	786
13.4.4 Lauflängenanalyse	787
13.4.5 Textur-Energiemaße nach Laws	789
13.4.6 Local Binary Patterns	791
14 Detektion	795
14.1 Detektion bekannter Objekte mittels linearer Filter	798
14.1.1 Unbekannter Hintergrund	799
14.1.2 Weißes Rauschen als Hintergrund	800
14.1.3 Korreliertes, schwach stationäres Rauschen als Hinter- grund	804
14.1.4 Diskret formuliertes Matched Filter	805
14.2 Detektion unbekannter Objekte (Defekte)	810
14.3 Geradendetektion	811
14.3.1 Die Radon-Transformation	812
14.3.1.1 Definition	813
14.3.1.2 Das Zentralschnitt-Theorem	817
14.3.1.3 Effiziente Berechnung der Radon-Transforma- tion	819
14.3.2 Detektion geradenhafter Strukturen	820
14.3.2.1 Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR)	821
14.3.2.2 Detektion mittels Korrelationsfilter	823

14.3.2.3 Anwendungsbeispiele	823
14.3.3 Die Hough-Transformation zur Geradendetektion	826
14.3.4 Die Hough-Transformation zur Detektion von Kurven . .	828
14.4 Eckendetektion	832
15 Bildpyramiden, Wavelet-Transformation und Multiskalenana-	
lyse	837
15.1 Bildpyramiden	839
15.1.1 Gauß-Pyramide	842
15.1.2 Laplace-Pyramide	842
15.1.3 Pyramid-Linking	844
15.2 Wavelets	846
15.2.1 Kontinuierliche Wavelet-Transformation	846
15.2.2 Diskretisierung der Wavelet-Transformation	850
15.3 Multiskalenanalyse	852
15.4 Die schnelle Wavelet-Transformation	859
15.5 Die zweidimensionale Wavelet-Transformation	863
III Anhänge	867
<hr/>	
A Mathematische Grundlagen	869
A.1 Strahlensatz	871
A.2 Inverse Probleme	873
B Die Fourier-Transformation	875
B.1 Dirac-Distributionen	877
B.2 Die eindimensionale Fourier-Transformation	877
B.2.1 Definition	877
B.2.2 Gesetze	878
B.2.3 Korrespondenzen	879
B.3 Die n-dimensionale Fourier-Transformation	881
B.3.1 Definition	881
B.3.2 Korrespondenzen der zweidimensionalen Fourier-	
Transformation	881
B.4 Die diskrete Fourier-Transformation	882
Literaturverzeichnis	885
Symbolverzeichnis	909

Inhaltsverzeichnis	XXIII
Abkürzungsverzeichnis	925
Index	929