

Jürgen Beyerer
Fernando Puente León
Christian Frese



Automatische Sichtprüfung

Grundlagen, Methoden und Praxis
der Bildgewinnung und Bildauswertung



 Springer Vieweg

Automatische Sichtprüfung

Jürgen Beyerer • Fernando Puente León
Christian Frese

Automatische Sichtprüfung

Grundlagen, Methoden und Praxis der
Bildgewinnung und Bildauswertung

Professor Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer
Fraunhofer-Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
und Karlsruher Institut für
Technologie (KIT)
Institut für Anthropomatik
Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
Adenauerring 4
76131 Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Christian Frese
Fraunhofer-Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: christian.frese@iosb.fraunhofer.de

Professor Dr.-Ing. Fernando Puente León
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industrielle Informationstechnik
Hertzstraße 16, Geb. 06.35
76187 Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: puente@kit.edu

Homepage zum Buch:
<http://www.sichtpruefung.de>

ISBN 978-3-642-23965-6
DOI 10.1007/978-3-642-23966-3

ISBN 978-3-642-23966-3 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.
Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Herrn Professor Dr.-Ing. Franz Mesch gewidmet

Vorwort

Die automatische Sichtprüfung ist ein Gebiet der Automatisierungstechnik, das ständig an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnt. Obwohl die zugehörige Branche seit mehr als zwei Jahrzehnten kräftig wächst, ist bis heute nur ein Teil der industriellen Sichtprüfungsaufgaben automatisiert. Speziell für Hochlohnländer schlummert darin noch ein großes Rationalisierungspotenzial, dessen Erschließung nicht nur Kostensenkungen verspricht, sondern auch die Qualität der produzierten Güter zu erhöhen vermag.

Da das Sehen die primäre Sinneswahrnehmung des Menschen ist, übt die Automatisierung der Sichtprüfung eine gewisse Faszination aus; das gilt zumindest für die Autoren dieses Buches. Bei der Automatisierung von visueller Prüfung könnte man leicht auf den Gedanken kommen, dass es doch gar nicht so schwierig sein kann, einem technischen Sichtprüfungssystem beizubringen, was der Mensch oft mit nur einem flüchtigen Blick spielerisch schafft. Tatsächlich wird von Anwendern immer mal wieder die Ansicht geäußert: „Der Mensch sieht das doch sofort; dann kann es für einen Automaten doch nicht so schwierig sein, das Gleiche hinzubekommen.“ Die Antwort darauf ist gar nicht so einfach; es kommt sehr auf den konkreten Fall an: manches fällt dem Menschen leichter, vieles können Maschinen aber genauer und vor allem verlässlicher.

Die automatische Sichtprüfung ist ein vielschichtiges, multidisziplinäres Thema, das Optik, Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik und Mathematik involviert. Automatische Sichtprüfungssysteme sind i. d. R. mehr oder weniger komplexe mechatronische Systeme, die nur im Zusammenspiel der Disziplinen wirtschaftlich die geforderte Leistung erbringen können.

Am Anfang steht eine Sichtprüfungsaufgabe, für die eine automatisierte Lösung gefunden werden muss. Eine herausragende Bedeutung hat dabei die Bildgewinnung: Informationsverlust, der hier unterläuft, lässt sich in den folgenden Bildauswertungsschritten kaum mehr kompensieren. Der Erfolg einer Sichtprüfungslösung wird überwiegend an dieser Stelle entschieden.

Zum Glück hat man bei der Entwicklung automatischer Sichtprüfungssysteme i. d. R. einige Designfreiheitsgrade zur Verfügung, um Bilddaten mit ausreichender Qualität und Aussagekraft zu gewinnen. Der Ingenieur hat es also zumindest ein Stück weit selbst in der Hand, wie gut die Bildaufnahme für die Lösung einer gegebenen Problemstellung geeignet ist. Um diesen Designspielraum bestmöglich zu nutzen, wird in diesem Buch der Bildgewinnung und der Bildaufnahmekonstellation bestehend aus Prüfbob-

jekt, Beleuchtung und Aufnahmesystem ganz besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Dieses Buch hat den Anspruch, umfassend in die automatische Sichtprüfung einzuführen. Das erfordert zunächst, sich im ersten Teil mit der Physik der Bildentstehung und den hierfür notwendigen optischen Gesetzmäßigkeiten und Technologien ausreichend gründlich auseinanderzusetzen, was in den Kapiteln 2 bis 6 getan wird. Auf der Basis dieser Grundlagen wird dann die Bildgewinnung für automatische Sichtprüfung in Kapitel 7 behandelt. In diesem Schlüsselkapitel werden die verschiedenen Bildgewinnungstechniken systematisch dargestellt, sowie wichtige Tricks und Kniffe gezeigt, die gute Sichtprüfsysteme ausmachen.

Für die rechnerische Auswertung von Bildern in einem Computer müssen die analogen in digitale Signale gewandelt werden. Die zugrunde liegende Signaltheorie und die Effekte von örtlicher Abtastung und Quantisierung der Werte werden ausführlich behandelt und im systemtheoretischen Zusammenhang dargestellt. Kapitel 8 ist u. a. diesen Eckpfeilern der digitalen Verarbeitung analoger Signale gewidmet und ebnet den Weg zum zweiten Teil des Buches, der sich mit der Bildauswertung beschäftigt. Die Kapitel 9 bis 15 behandeln die für die automatische Sichtprüfung wesentlichen Verfahren, mit denen aus Bilddaten Schritt für Schritt eine rechnerische Prüfentscheidung herbeigeführt werden kann.

Der Tiefgang der Darstellung ist bei allen behandelten Themen so gewählt, dass der Leser die Motivation und die Hintergründe durchschauen und verstehen kann. Nichts soll „vom Himmel fallen“; die zugrunde liegenden Ideen sollen gründlich verstanden werden. Allerdings werden Sätze in diesem Buch nicht immer in mathematisch strengem Sinn bewiesen. Vielmehr werden i. d. R. Beweisskizzen wiedergegeben, die die wesentlichen Beweisideen wiedergeben und Zusammenhänge plausibel machen. Für den anwendungsorientierten Leser, der dennoch wissen will, was hinter den Verfahren steckt, erhöht dieser bewusste Verzicht auf technisch vollständig geführte Beweise die Lesbarkeit und lässt den Umfang des Buches handlich bleiben.

Zum Teil fußt das vorliegende Buch auf Vorlesungen, die der Autor J. Beyerer am Karlsruher Institut für Technologie (KIT, ehemals Universität Karlsruhe) seit 1994 hält und die vom Autor F. Puente León seit 2003 zunächst an der Technischen Universität München (TUM) und ab 2008 am KIT gehalten werden. Es wendet sich an Studenten der Ingenieurwissenschaften, der Informatik, der Physik und der Mathematik. Da alle benötigten Konzepte und Verfahren gründlich genug eingeführt werden, sollte es bereits fortgeschrittenen Bachelor-Studenten möglich sein, die gebotenen In-

halte gut nachvollziehen zu können. Darüber hinaus wird der Stoff so weit vertieft, dass insbesondere Master-Studenten, Doktoranden und Wissenschaftler, die sich mit automatischer Sichtprüfung beschäftigen, das Buch mit Gewinn studieren können.

Neben der Theorie kommt aber auch die Praxis nicht zu kurz. Die industrielle Erfahrung der Autoren, die an vielen Stellen eingeflossen ist, macht dieses Buch auch für den Praktiker, der konkrete Sichtprüfungsaufgaben mit wirtschaftlichen und robusten Lösungen automatisieren muss, zu einem hilfreichen Nachschlagewerk, das sich allerdings nicht in oberflächlichen Rezepten erschöpft, sondern für ein vertieftes Verständnis ausreichend Tiefgang bietet.

Die Autoren möchten sich bei Fachkollegen für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Buches bedanken:

- bei Herrn Dr. Ulrich Breitmeier (Breitmeier Messtechnik GmbH, Ettlingen) für ein Beispielbild eines Zylinderscanners,
- bei Herrn Dr. Michael Fried (Universität Erlangen) für ein Beispiel zur Mumford-Shah-Methode,
- bei Herrn Dr. Jan Horn (Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie) für eine Abbildung zur kameragestützten Geschwindigkeitsmessung,
- bei Herrn Dr. Udo Netzelmann und Herrn Dr. Günter Walle (Fraunhofer IZFP, Saarbrücken) für Beispielbilder zur Impulsthermographie,
- bei Herrn Dirk Nüßler (Fraunhofer FHR, Wachtberg) für Beispielbilder zur Prüfung mittels Terahertz-Strahlung,
- bei Herrn Prof. Dr. Wolfgang Osten (Universität Stuttgart) für die Bilder zu interferometrischen Verfahren,
- bei Herrn Prof. Dr. Jerry L. Prince (Johns Hopkins University, Baltimore) für Beispiele zu aktiven Konturen,
- bei Herrn Dr. Andreas Purde (Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, TU München) für ein Beispiel zum Pyramid-Linking-Verfahren,
- bei Frau Dr. Anna Remelli und Herrn Dr. Claudio Sedazzari (Firma Opto Engineering, Mantova) für Beispiele zur hyperzentrischen Perspektive,
- bei Herrn Dr. Norman Uhlmann (Fraunhofer EZRT, Fürth) für Beispielbilder zur Röntgenprüfung,
- bei Herrn Bernhard Schmitt M.A. (ONUK, Karlsruhe) für eine Luftaufnahme des Karlsruher Schlosses,
- bei Herrn Dirk vom Stein und Herrn Thomas Winkel (Firma Inspectomat, Mannheim) für die Beispielbilder zur Prüfung von Gießereikernen und Bremsscheiben sowie für telezentrische Aufnahmen,

- bei Herrn Marco Kruse (Institut für Industrielle Informationstechnik IIIT, Karlsruher Institut für Technologie KIT) für das Bild der Schachbrett-Schattenillusion,
- bei Herrn Mario Lietz (IIIT, KIT) für Beispielbilder zur Division durch eine Referenzaufnahme,
- bei Frau Dr. Ioana Gheța (Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme IES, Institut für Anthropomatik, Karlsruher Institut für Technologie) für Beispiele zur Auswertung von Spektralbildserien,
- bei Herrn Robin Gruna (IES, KIT) für Aufnahmen mit inverser Beleuchtung,
- bei Herrn Thomas Stephan (IES, KIT) für Aufnahmen mit einer Lichtfeldkamera,
- bei Herrn Dr. Matthias Hartrumpf (Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Karlsruhe) für Beispielbilder zur Spannungsoptik,
- bei Herrn Dr. Michael Heizmann (Fraunhofer IOSB) für Beispiele zur Texturanalyse sowie zu *shape from shading*,
- bei Herrn Christian Negara (Fraunhofer IOSB) für Beispiele zu Graph-Cut-Verfahren,
- bei Herrn Günter Saur und Herrn Wolfgang Roller (Fraunhofer IOSB) für die Bereitstellung von TerraSAR-X-Aufnahmen,
- bei Herrn Günter Struck und Herrn Dr. Kai-Uwe Vieth (Fraunhofer IOSB) für Beispiele zur Fluoreszenzspektroskopie,
- bei Herrn Chen-Ko Sung (Fraunhofer IOSB) für Beispielbilder zur Inspektion mittels Flachbettscannern und
- bei Herrn Dr. Stefan Werling (Fraunhofer IOSB) für deflektometrische Aufnahmen.

Einen großen Beitrag zur Ausarbeitung des hier dargebotenen Inhalts und zur Veranschaulichung an Beispielen haben insbesondere Herr Dr. Stefan Werling, Herr Dr. Christoph Lindner, Frau Dr. Ana Pérez Grassi, Herr Robin Gruna, Herr Sebastian Höfer und Herr Michael Teutsch im Rahmen der Betreuung der erwähnten Vorlesungen geleistet. Ebenfalls bedanken möchten sich die Autoren bei den studentischen Hilfskräften, die an der Erstellung von Abbildungen und Diagrammen mitgewirkt haben. Ferner haben zahlreiche Studierende wertvolle Verbesserungsvorschläge hinsichtlich der didaktischen Aufbereitung geliefert.

Besonderer Dank gilt Herrn Andrey Belkin, Frau Yvonne Fischer, Herrn Robin Gruna, Herrn Jan Hendrik Hammer, Herrn Marco Kruse, Herrn Achim Kuwertz, Herrn Dr. Alexey Pak, Herrn Masoud Roschani, Herrn

Thomas Stephan, Herrn Miro Taphanel, Herrn Michael Teutsch, Herrn Sebastian Vater, Herrn Markus Vogelbacher, Herrn Dr. Stefan Werling, Herrn Philipp Woock und Herrn Mathias Ziebarth für wertvolle Hinweise und für die Korrektur des Manuskripts.

Schließlich sei dem Springer-Verlag für die ausgezeichnete Zusammenarbeit gedankt.

Karlsruhe, im Sommer 2012

Jürgen Beyerer
Fernando Puente León
Christian Frese

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
<hr/>	
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 $Y_C B_C R_C$	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	Bilddaufnahmeverfahren	267
7.1	Einleitung	271
7.2	Erfassung der optischen Eigenschaften	274
7.2.1	Messung des komplexen Brechungsindex	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	Spektralsensoren	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