

Modellierung von Gestaltmerkmalen für die industrielle Oberflächeninspektion

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Dipl.-Ing Alexander Ohl
aus Hanau

genehmigt vom
Fachbereich Maschinentechnik
der Universität Siegen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Scharf
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld

Tag der mündlichen Prüfung:
05. November 2004

ZESS-Forschungsberichte

Nr. 22

Alexander Ohl

Modellierung von Gestaltmerkmalen für die industrielle Oberflächeninspektion

Universität Siegen
Zentrum für Sensorsysteme
Paul-Bonatz-Straße 9-11
57068 Siegen
Tel.: 0271 / 740-3323
Fax: 0271 / 740-2336
e-mail: gs@zess.uni-siegen.de
Internet: <http://www.zess.uni-siegen.de/>

Siegen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3612-0

ISSN 1433-156X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und am Institut für Fertigungstechnik der Universität Siegen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Scharf gilt mein besonderer Dank. Seine kritischen Anregungen, die konstruktiven Diskussionen mit ihm sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse reichen weit über die Förderung bei der Anfertigung dieser Dissertation hinaus.

Für die bereitwillige und spontane Übernahme des Korreferats durch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Löffeld bedanke ich mich herzlich, seine anschaulichen Erläuterungen und Anregungen haben wesentlich zu meinem Verständnis signaltheoretischer Zusammenhänge beigetragen.

Sehr dankbar bin ich ebenso allen Mitarbeitern des ZESS und des Instituts für Fertigungstechnik. Durch die freundliche und persönliche Atmosphäre habe ich während meiner Arbeit sowie bei Projekten stets unterstützenden Rückhalt erfahren. Durch Gespräche mit Kollegen anderer Fachgebiete konnte ich oft interessante Einblicke erhalten und Anregungen für meine Arbeit gewinnen. Meine Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter hat mir dadurch großen Spaß gemacht.

Das liebevolle und ausdauernde Verständnis meiner Familie, insbesondere meiner Frau Carola hat mir auch in schwierigen Phasen der Arbeit jederzeit die nötige Motivation und Zuwendung gegeben, wofür ich mich von ganzem Herzen bedanken möchte.

Nicht zuletzt haben meine Eltern durch die Gestaltung eines liebevollen, begeisterten und großzügigen Rahmens mir die Möglichkeit gegeben mich so zu entfalten wie ich heute bin. Danke.

Siegen, im Dezember 2004

Alexander Ohl

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	I
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	V
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Das menschliche visuelle System	5
1.4 Aufbau der Arbeit	11
2 Automatische Oberflächeninspektion	13
2.1 Einteilung der Oberflächen	13
2.1.1 Homogene Oberflächen	13
2.1.2 Texturierte Oberflächen	13
2.1.3 Gemusterte Oberflächen	15
2.2 Einteilung der Oberflächenfehler	16
2.3 Einteilung der Inspektionsmethoden	20
2.4 Aufbau von Oberflächeninspektionssystemen	21
2.5 Heutiger Einsatz von Gestaltmerkmalen in der Oberflächeninspektion	25
3 Modellierung von Gestaltmerkmalen durch Kenngrößen	27
3.1 Grundlagen	28
3.1.1 Konturen	29
3.1.1.1 Konturlänge	31
3.1.1.2 Konvexe Hülle	34
3.1.1.3 Fouriertransformation	35
3.1.1.4 Konturkrümmung	45
3.1.2 Abstandstransformation	48
3.1.3 Skelette	53
3.2 Merkmalsberechnung	55
3.2.1 Kleinstes umschreibendes Rechteck	55
3.2.2 Kleinster einhüllender Kreis	58
3.2.3 Größter innenliegender Kreis	59

3.2.4	Flächeninhalt	60
3.2.5	Flächenmomente	61
3.2.6	Konvexität	65
3.2.7	Massivität	66
3.2.8	Fourierdeskriptoren	66
3.2.9	Rundheit	72
3.2.10	Exzentrizität	74
3.2.11	Fraktale Dimension	75
3.2.12	Verschlungenheit	79
4	Klassifikation	81
4.1	Merkmalsauswahl	86
4.2	Klassifikationsmethoden	89
4.2.1	Bayes-Methode und Methode der höchsten Wahrscheinlichkeit	90
4.2.2	Methode des nächsten Nachbars	94
4.2.3	Methode des geringsten Abstands	96
4.2.4	Quadermethode	97
4.2.5	Tabellenmethode	98
4.2.6	Support-Vektor-Methode	100
5	Praktische Anwendung	106
5.1	Prüfstrategien	106
5.2	Methodenerprobung am Beispiel der Erkennung von Gerten	109
5.2.1	Gerte an Bohrungen	110
5.2.2	Gerte an Spritzgussteilen	115
5.3	Methodenerprobung am Beispiel der Prüfung von Steckdosenabdeckungen	120
5.4	Ergebnisse und kritische Einordnung	131
6	Zusammenfassung und Ausblick	132
	Literaturverzeichnis	136

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Vektoren sind durch unterstrichene Kleinbuchstaben, Matrizen durch fett gedruckte Großbuchstaben gekennzeichnet.

A	Objektfläche
A_R	Fläche des umschreibenden Rechtecks
ΔA	Flächeninkrement für die Bestimmung der Objektfläche
A_c	Kreisfläche
A_i	Fläche eines Dreiecks zur Krümmungsbestimmung
A_{konv}	Fläche der konvexen Hülle eines Objekts
a, b	Halbachsen einer Ellipse
$b(x, y)$	Wert eines Binärbildes an der Position (x, y)
$c_{i,j}$	Koeffizienten der lokalen Abstandsmaske
C	Kovarianzmatrix
C'	diagonalisierte Kovarianzmatrix
$C_{p,q}$	Kreuzkovarianz der Merkmale x_p und y_p
D	Fraktale Dimension
d_i	Differenz zweier aufeinander folgenden Kettencodes
d_m	Mahalanobis-Abstand
\bar{d}	Mittlerer Randabstand eines Objekts
$d(i, j)$	Kürzester Abstand des Bildpunktes (i, j) zum Objektrand
$f(\underline{x} \omega_i)$	Verteilungsdichte des Merkmalsvektors \underline{x} bedingt auf die Zugehörigkeit zur Musterklasse ω_i
$g(x, y)$	Grauwert eines Bildes an der Position (x, y)
J	Trägheitstensor
K_{ex}	Kenngröße <i>Exzentrizität</i>
K_{konv}	Kenngröße <i>Konvexität</i>
K_{mass}	Kenngröße <i>Massivität</i>

K_{R1}, K_{R2}, K_{R3}	Kenngrößen <i>Rundheit</i>
K_{rau}	Kenngröße <i>Rauheit</i>
K_{sym}	Kenngröße <i>Symmetrie</i>
K_v	Kenngröße <i>Verschlungenheit</i>
K_k	Kenngröße <i>Kompaktheit</i> , aus der Abstandstransformation berechnet
k	Index eines Fourierdeskriptors
k_1, k_2	Indizes für den Bereich der Fourierkoeffizienten zur Bestimmung der Rauheit
L	Konturlänge
L	Verlustmatrix des Bayes-Klassifikators
L_{fit}	Konturlänge der ausgeglichenen Schätzung
L_{konv}	Länge der konvexen Hülle eines Objekts
L_{triv}	Konturlänge der trivialen Schätzung
M	Dimension eines Merkmalsvektors
$m_{p,q}$	Moment der Region R
N	Anzahl der Punkte einer Kontur
n_0, n_1	Anzahl achsenparallel bzw. diagonal benachbarter Konturpunkte
P	Kurvenlänge
p	Pfadlänge für Parameterdarstellung einer Kontur
p_i, x_i, y_i	diskreter Konturpunkt an der Stelle i mit den Koordinaten x_i und y_i
$p(\underline{x})$	Wahrscheinlichkeit für ein Vorliegen des Merkmalsvektors \underline{x}
$p(\underline{x} \omega_i)$	Bedingte Wahrscheinlichkeit für ein Vorliegen des Merkmalsvektors \underline{x} bedingt auf die Zugehörigkeit zur Objektklasse ω_i
$p(\omega_i)$	a-priori Wahrscheinlichkeit für die Klasse ω_i
R	Bildregion
r	Maßstabslänge zur Bestimmung der fraktalen Dimension D
r_c	Kreisradius

r_k	Betrag des k-ten Fourierkoeffizienten
r_i	Kettencode einer Kontur
R_{in}	Radius des größten innen liegenden Kreises
R_{out}	Radius des kleinsten einhüllenden Kreises
S	Grad der Rotationssymmetrie
$S(k)$	Diskrete Fouriertransformierte von $s(n)$
$s(n)$	Abtastwerte einer periodischen Funktion
s_x, s_y	Schwerpunkt
u	Anzahl der Unterteilungen zur Bestimmung der fraktalen Dimension D
U_R	Umfang des umschreibenden Rechtecks
U_c	Kreisumfang
w_j	Gewichtungsfunktion zur Bestimmung der Konturkrümmung
\underline{x}	Merkmalsvektor
\bar{x}	Mittelwert des Merkmals x der Trainingsstichprobe
$\bar{\underline{x}}$	Mittelwertvektor der Merkmalsvektoren einer Stichprobe
\underline{x}_n	n-ter Merkmalsvektor für eine rekursive Schätzung des Erwartungswertes
x_i	i-tes Element eines Merkmalsvektors
$z(p), x(p), y(p)$	Parameterform einer ebenen Kurve
z_k	Reihe der Konturpunktkoordinaten als komplexe Zahl
\hat{z}_k	Komplexe Fourierkoeffizienten
α	Gewichtungsfaktor zur rekursiven Ermittlung des Erwartungswertes
α_0, β_0	Zentrum der zweidimensionalen Gauß-Verteilungsfunktion
θ	Orientierungswinkel der Trägheitsellipse
λ	Wellenlänge
λ_1	Grenzwellenlänge für die Tiefpassfilterung einer Kontur
$\underline{\mu}_n$	Erwartungswertvektor einer Stichprobe mit n Elementen
$\mu_{p,q}$	Zentralmoment

$v_{i,j}^m$	Wert eines Bildpunktes an der Stelle (i, j) nach dem m-ten Iterationsschritt der Abstandstransformation
$v_{p,q}$	Normalisiertes Zentralmoment
ξ_i	Randabstand eines Ausreißers bei der Bestimmung von Support-Vektoren
Q_i	Mittlere Konturkrümmung am Punkt i
σ	Standardabweichung
φ_k	Startwinkel eines Kreises, Phasenwinkel des k-ten Fourierkoeffizienten
ω_i	Objektklasse

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

DFT	Discrete Fourier Transform
EDT	Euclidean Distance Transform
FFT	Fast Fourier Transform
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
i.O.	in Ordnung
LUT	Look Up Table
n.i.O.	nicht in Ordnung