

Bernhard Bundschuh

**LASEROPTISCHE  
3D-KONTURERFASSUNG**

---

# **Fortschritte der Robotik**

Herausgegeben von Walter Ameling und Manfred Weck

---

Band 1

Hermann Henrichfreise

**Aktive Schwingungsdämpfung an einem elastischen Knickarmroboter**

Band 2

Winfried Rehr (Hrsg.)

**Automatisierung mit Industrierobotern**

Band 3

Peter Rojek

**Bahnführung eines Industrieroboters mit Multiprozessoren**

Band 4

Jürgen Olomski

**Bahnplanung und Bahnführung von Industrierobotern**

Band 5

George Holling

**Fehlerabschätzung von Robotersystemen**

Band 6

Nikolaus Schneider

**Kantenhervorhebung und Kantenverfolgung in der industriellen Bildverarbeitung**

Band 7

Ralph Föhr

**Photogrammetrische Erfassung räumlicher Informationen aus Videobildern**

Band 8

Bernhard Bundschuh

**Laseroptische 3D-Konturerfassung**

---

**Vieweg**

Fortschritte der Robotik 8

Bernhard Bundschuh

# LASEROPTISCHE 3D-KONTURERFASSUNG

Modellierung und systemtheoretische Beschreibung  
eines Sensorsystems



Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Bundschuh, Bernhard:**

Laseroptische 3D-Konturerfassung: Modellierung und systemtheoretische Beschreibung eines Sensorsystems /

Bernhard Bundschuh. – Braunschweig: Vieweg, 1991

(Fortschritte der Robotik; Bd. 8)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss.

ISBN 978-3-528-06427-3

ISBN 978-3-322-88810-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-88810-5

NE: GT

### **Fortschritte der Robotik**

Exposés oder Manuskripte zu dieser Reihe werden zur Beratung erbeten an:  
Prof. Dr.-Ing. Walter Ameling, Rogowski-Institut für Elektrotechnik der RWTH  
Aachen, Schinkelstr. 2, D-5100 Aachen

oder

Prof. Dr.-Ing. Manfred Weck, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und  
Betriebslehre der RWTH Aachen, Steinbachstr. 53, D-5100 Aachen oder an  
den

Verlag Vieweg, Postfach 58 29, D-6200 Wiesbaden.

D82 (Diss. T.H. Aachen)

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Verlagsgruppe Bertelsmann International.

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1991



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Wolfgang Nieger, Wiesbaden

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN-13: 978-3-528-06427-3

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtenverarbeitung der Universität–Gesamthochschule–Siegen.

Herrn Prof. Dr.–Ing. R. Schwarte gebührt mein besonderer Dank für die Anregung zu dieser Arbeit und für die Unterstützung bei ihrer Durchführung.

Ebenso möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Prof. Dr.–Ing. G. Ries für seine zahlreichen wertvollen Hinweise und für die Übernahme des Korreferates bedanken.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr. sc. techn. K. Hinrichs für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meinen Kollegen I. Aller, V. Baumgarten, R. Dänel, W. Graf, K. Hartmann, F. Heuten, F. Klaus, R. Klein, J. Klicker, D. Ley, A. Li, O. Loffeld, L. Shi, L. Tran Duc, D. Wang, Q. You bin ich für die vielen fachlichen Gespräche sehr dankbar.

Mein besonderer Dank gilt auch den Herren W. Twelsiek und R. Wurmbach für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Messungen. Bei Frau M. Pufahl möchte ich mich für ihre Hilfe bei den Schreibarbeiten bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Studentischen Hilfskräften E. Benfer, H. Fischer und A. Grebe für ihre Mühe bei der Durchführung der Messungen und ihre Hilfe bei der Anfertigung und Beschriftung der Zeichnungen.

Nicht vergessen möchte ich auch, den zahlreichen Studien– und Diplomarbeitern zu danken, deren Arbeiten ich mitbetreut habe, und die durch ihr Engagement und ihre Ergebnisse viele Teilaspekte zu meiner Arbeit beigetragen und mir sehr viel Einzelarbeit abgenommen haben.

Meiner Frau Iris danke ich für die Unterstützung bei den Korrekturen und ganz besonders für das mir entgegengebrachte Verständnis.



## VII

2.4	Modellierung der Glasfaseroptik	29
2.4.1	Dämpfung der Glasfasern	29
2.4.2	Dispersion der Glasfasern	30
2.4.3	Erzeugung des Referenzsignals	33
2.4.4	Geregeltes optisches Dämpfungsglied	34
2.4.5	Kohärenz des Laserlichts in der Glasfaser	35
2.4.6	Abstrahlung am Faserende	35
2.4.7	Leistungsverteilung über dem Faserquerschnitt	38
2.4.8	Strahldichte	39
2.4.9	Einkopplung in die Empfangsfaser	40
2.5	Modellierung der Spiegeloptik	40
2.5.1	Modellierung der idealen Sammellinse	41
2.5.2	Modellierung der bikonvexen Linse	42
2.5.3	Modellierung des Spiegels	45
2.6	Durchrechnung der Spiegeloptik	46
2.6.1	Optische Leistungsdichte auf der Zielebene	47
2.6.2	Empfangsleistung als Funktion der Meßentfernung	54
2.7	Ebenes Simulationsmodell	62
2.8	Simulation weiterer Linsensysteme	63
<b>3.</b>	<b>Systemtheoretische Beschreibung der 3D-Konturerfassung nach dem Laserpulslaufzeitverfahren</b>	<b>67</b>
3.1	Lichtflecke als Abtastapertur	67
3.2	Synthese des Empfangssignals	69
3.3	Gewinnung der Konturinformation aus dem Empfangssignal	71
3.3.1	Grauwertbild als Ergebnis der Konturvermessung	72
3.3.2	Gemessene Referenzlaufzeit	75
3.3.3	Gemessene Ziellaufzeit	76
3.3.4	Entfernungsbild als Ergebnis der Konturvermessung	80
3.4	Fehlerbehandlung	81
3.4.1	Deterministische Fehler	82
3.4.2	Statistische Fehler	82

## VIII

3.5	Simulationsbeispiele	84
3.5.1	Simulation der Vermessung ebener Konturen	84
3.5.2	Simulation der Vermessung räumlicher Konturen	92
3.6	Meßbeispiel	94
3.7	Systemtheoretische Beschreibung weiterer Sensorsysteme	101
3.7.1	Abstandssensor mit Schwerpunktlaufzeitbestimmung	101
3.7.2	Abstandssensor nach dem Phasenvergleichsverfahren	104
<b>4.</b>	<b>Die Konturrestauration</b>	<b>109</b>
4.1	Das inverse Problem	109
4.2	Das Adaptive Least Squares Verfahren	111
4.2.1	Die Glättungsfunktion	113
4.2.2	Die Gewichtungsfunktion	117
4.3	Räumlich und zeitlich lineare Beschreibung der Konturvermessung	120
4.3.1	Interpolation und Extrapolation von Konturpunkten	120
4.3.2	Aufstellung der Gleichungssysteme	123
4.3.2.1	Gleichungssystem für die Grauwerte	123
4.3.2.2	Gleichungssystem für die Zielentfernungen	124
4.3.3	Iterative Lösung über Teilgleichungssysteme	125
4.3.3.1	Seriellles Verfahren	128
4.3.3.2	Paralleles Verfahren	130
4.4	Zeitlich lineare, räumlich nichtlineare Beschreibung der Konturvermessung	131
4.4.1	Langsam veränderliche Meßentfernung	132
4.4.2	Schnell veränderliche Meßentfernung	133
4.5	Allgemeine Beschreibung der Konturvermessung	135
4.6	Simulationsbeispiele	138
4.6.1	Qualitätskriterien zur Beurteilung der Restaurationsergebnisse	138
4.6.2	Erzeugung der Testkonturen	140
4.6.2.1	Erzeugung der ebenen Testkonturen	140
4.6.2.2	Erzeugung der räumlichen Testkonturen	141
4.6.3	Entstehung der gestörten Meßdaten	142



## IX

4.6.4	Monte–Carlo–Simulation der Restauration ebener Konturen	142
4.6.4.1	Einfluß des Normierungsfaktors der Gewichtungsfunktion	143
4.6.4.2	Einfluß der Ausdehnung der Gewichtungsfunktion	148
4.6.4.3	Extrapolation von Konturpunkten	151
4.6.4.4	Interpolation von Konturpunkten	156
4.6.5	Restauration ebener Konturen bei unterschiedlicher Modellierung des Meßvorgangs	158
4.6.6	Monte–Carlo–Simulation der Restauration räumlicher Konturen	166
4.6.6.1	Einfluß des Normierungsfaktors der Gewichtungsfunktion	167
4.6.6.2	Einfluß der Ausdehnung der Gewichtungsfunktion	170
4.7	Meßbeispiel	171
5.	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	175
A.	<b>Anhang</b>	178
A.1	Berechnung des Strahlengangs durch eine ideale Sammellinse	178
	<b>Literaturverzeichnis</b>	181