

Robotergestützte automatische Digitalisierung von Werkstückgeometrien mittels optischer Streifenprojektion

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der Fakultät für Informatik
der Universität Karlsruhe (Technische Hochschule)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Dipl.-Wi.-Ing. Frank Bertagnoli

aus Böblingen

Tag der mündlichen Prüfung:

6. Februar 2006

Erster Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. R. Dillmann

Zweiter Gutachter:

Prof. Dr.rer.nat. A. Schmitt

Messtechnik und Sensorik

Frank Bertagnolli

**Robotergestützte automatische
Digitalisierung von Werkstückgeometrien
mittels optischer Streifenprojektion**

Shaker Verlag
Aachen 2006

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.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4948-6

ISSN 1610-4773

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

Kurzfassung

Hohe Qualitätsansprüche, die Reduzierung der Herstellungskosten und eine mannigfache Variantenvielfalt fördern schnellere Verfahren für die Prozesskette des Reverse-Engineering. Ein wichtiger Abschnitt innerhalb dieser Prozesskette ist die Digitalisierung der Werkstücke. Damit verbunden ist der Schritt vom bisherigen manuellen Positionieren des Messensors zum vollautomatischen Messablauf.

Diese Arbeit stellt ein Verfahren vor, um die bisher manuell durchgeführte optische Digitalisierung vollautomatisch durchzuführen und bestehende, fest eingelernte, automatisierte optische 3D-Messsysteme in ihrer Flexibilität weiter zu steigern. Die Relevanz ergibt sich durch eine steigende Anzahl von variablen Werkstücken mit kleiner Losgröße, welche flächenhaft vermessen werden. Durch die Nutzung eines Industrieroboters und eines Positionierdrehtisches wird eine praktische Lösung aufgezeigt, um ein 3D-Sensorsystem im ersten Schritt automatisiert und im Weiteren durch ein Verfahren zur Messpositionsplanung vollautomatisch zu positionieren.

Der Schwerpunkt und Kern der Arbeit liegt auf dem Verfahren zur vollautomatischen Bestimmung der einzelnen, je nach Messobjekt unterschiedlichen Messpositionen. Die Anforderung an einen optimierten Messplan besteht dabei aus dem Zusammenfügen mehrerer geeigneter Messpositionen. Das Ziel ist die vollständige Digitalisierung des Werkstückes mit möglichst wenigen Messansichten ohne einen manuellen Eingriff. Für die Planung über die Werkstückgeometrien werden dazu die Informationen aus dem Herstelungsdatensatz des zu erfassenden Werkstückes genutzt. Eine Methode zur Generierung geeigneter Messpositionen und ein genetischer Optimierungsalgorithmus bestimmen dabei den optimierten, werkstückbezogenen Messplan für den auf einem Roboter montierten 3D-Messsensor.

Die theoretischen Inhalte werden anhand der einzelnen Methodenschritte dargestellt, in der industriellen Praxis mittels des optischen Messroboters „OptiMero“ umgesetzt und die Praxistauglichkeit an mehreren konkreten Testkörpern validiert. Im Vergleich zu einer manuellen Erfassung ergibt sich durch die robotergestützte, automatische Digitalisierung eine Einsparung von bis zu 50% der Messzeit.

*Das Verständnis der Gründe dessen, was vor sich geht,
bedeutet viel mehr als die bloße Kenntnis der Fakten.*

Galileo Galilei
(1564 - 1642)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der DaimlerChrysler AG, innerhalb des Ressorts „Research and Technologie“, Direktion „Body and Powertrain“ im Forschungszentrum Ulm. Diese Abhandlung beinhaltet nicht die insgesamt durchgeführten Arbeiten. Einige Teilaspekte des Verfahrens und Messergebnisse können aus Firmengründen nur teilweise beleuchtet werden.

Zuerst bedanke ich mich besonders bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann des Instituts für Technische Informatik der Universität Karlsruhe für die Möglichkeit, die Industriepromotion durchzuführen sowie für seine akademische Begleitung und universitäre Betreuung. Während der verschiedenen Phasen meiner Arbeit gab er mir wichtige Impulse und übte konstruktive Kritik. Herr Prof. Dr.rer.nat. Alfred Schmitt, ebenfalls von der Universität Karlsruhe, übernahm dankenswerterweise als zweiter Gutachter das Korreferat und half mit wertvollen Hinweisen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Flegel und dem Leiter der Abteilung „Rapid Technologies and Production Management“, Herrn Dr.rer.nat. Gerhard Jünemann, danke ich für die Möglichkeit der Dissertation innerhalb der DaimlerChrysler AG sowie für die Investierung in einen Industrieroboter zur Anwendung und praktischen Validierung der theoretischen Erkenntnisse meiner Forschungstätigkeit.

Selbstverständlich möchte ich mich auch bei meinem Teamleiter, Herrn Dr.rer.nat. Klaus Förderer, für die sehr gute Unterstützung und bei meinen beiden Betreuern während der Dauer meiner Doktorandentätigkeit in Ulm, Herrn Dr.rer.nat. Georg Wiora und Herrn Dr.rer.nat. Marcus Ziegler, bedanken, bei denen ich für Rückfragen und Diskussionen stets ein offenes Ohr fand. Die interessanten wissenschaftlichen Impulse und die kompetenten Gespräche haben mir zur Entwicklung dieser Arbeit sehr geholfen.

Herrn Dr.sc.techn. Horst A. Beyer und seinem Team Herrn Werner Mayer, Herrn Samuel Gerber sowie Herrn Graeme van der Vlugt gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung bei der praktischen Anbindung meiner Methoden und Algorithmen an die Software QSpec.

Frank Bertagnolli
Sindelfingen, im November 2005

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation der Arbeit	1
1.2 Begriff der automatischen Digitalisierung	3
1.3 Zielsetzung und Beitrag	3
1.4 Struktur der Arbeit	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Reverse-Engineering	7
2.2 Optische Triangulation	9
2.3 Automatisierte optische Messtechnik	16
2.4 Messstrategien und Messplanungen	23
3 Ausgangspunkt und Problemstellung der 3D-Objekterfassung	29
3.1 Ausgangspunkt	29
3.2 Anforderungen an den Messprozess	30
3.3 Aufgabenstellung	34
3.4 Lösungsansatz	35
3.5 Abschätzung des Lösungsansatzes	39
4 Automatisierte Positionierung des Messsystems	41
4.1 Instrumentarium	41
4.2 Systemaufbau	44
4.3 Kinematik des Roboters	48
4.4 Positionierung	56
5 Messplanung zur automatischen Digitalisierung	65
5.1 Konzept	65
5.2 Bestimmung der Messpositionen	70
5.3 Simulation der Messung	79
5.4 Optimierung des Messplans	85
5.5 Erweiterte Messstrategie	95
5.6 Auswertung einer Einzelmessung	98
5.7 Lösungserörterung	105

6 Test und Bewertung	107
6.1 Vorgehensweise	107
6.2 Test	111
6.3 Auswertung	119
6.4 Bewertung	123
7 Anwendung und Wirtschaftlichkeit	125
7.1 Anwendung	125
7.2 Messprozess	130
7.3 Wirtschaftlichkeit	143
8 Schlussbetrachtung	147
8.1 Zusammenfassung	147
8.2 Ausblick	150
A Anhang	151
A.1 Glossar	151
A.2 Formelzeichen	153
A.3 Ergebnisse der Messstrategie für weitere Geometrien	156
A.4 Grundlagen der Rotationsmatrizen	163
A.5 Hand-Auge-Kalibrierung	164
A.6 Vergleich von automatisierten Messsystemen	166
Literaturverzeichnis.....	167

Abkürzungsverzeichnis

3D	d reidimensional
ANCO	A ngular C oded (winkelcodiert)
Bit	b inary d igit (Binäre Ziffer)
CAD	C omputer A ided D esign
CAM	C omputer A ided M anufacturing
CaRo	C amera R obot
CCD	C harge C oupled D evice (ladungsgekoppelte Halbleiterelemente)
CFK	C arbon- F aser verstärkter K unststoff
CNC	C omputerized N umerical C ontrol
CONSENS	C onfiguration of S ensor networks
DigiMan	D igitalisier- M anager
DIN	D eutsches I nstitut für Normung
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers, Inc. (als Standardisierungsgremium fungierender Ingenieurverband in den USA)
KALIMERO	K arlsruher L inearer M essroboter
KR	K UKA R obot (KUKA Roboter)
KR C2	K UKA R obot C ontrol System Type 2 (KUKA Robotersteuerung Typ 2)
KUKA	K eller und K nappich Augsburg
Laser	L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation
LED	L ight E mitting D iode (Leuchtdiode)
LOM	L aminated O bject M anufacturing
NP	N on-deterministic P olynomial time (Komplexitätsklasse)
OptiMero	O ptischer M essroboter
PID	P rodukt- I ntegral- D ifferenz
Pixel	P icture E lement (Bildpunkt in einer zweidimensionalen Matrix)
PTP	P oint T o P oint (Punkt zu Punkt)
PUMA	P rogrammable U niversal M achine for A ssembly
QSpec	Q uality I nspection
STL	S tereolithography (Stereolithographie)
TCP	T ool C entre P oint
TCP/IP	T ransmission C ontrol P rotocol/ I nternet P rotocol
VDE	V erband D eutscher E lektrotechniker
VDI	V erein D eutscher I ngenieure