

Selbstoptimierende Inspektionssysteme in der wandlungsfähigen Kleinserienfertigung

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Alberto Xavier Pavim

Berichter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Peter Loosen

Tag der mündlichen Prüfung:
23. Dezember 2011

Berichte aus der Produktionstechnik

Alberto Xavier Pavim

Selbstoptimierende Inspektionssysteme in der wandlungsfähigen Kleinserienfertigung

Herausgeber:

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Dipl.-Wirt. Ing. W. Eversheim

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Prof. h. c. mult. T. Pfeifer

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. E. h. M. Weck

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt

Band 1/2012
Shaker Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0732-9

ISSN 0943-1756

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement des Werkzeugmaschinenlabors WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, für die Möglichkeit der Promotion am WZL, die Betreuung der Arbeiten, das Vertrauen und die Tätigkeit als Berichterstatter in meinem Promotionsverfahren. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Peter Loosen, Inhaber des Lehrstuhls für Technologie optischer Systeme TOS der RWTH Aachen, für die Übernahme des Koreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Tilo Pfeifer, dem ehemaligen Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, sowie Dr.-Ing. Reinhard Freudenberg danke ich für die Unterstützung meiner Arbeiten seit 2002, für die konstruktiven Diskussionen bezüglich meiner wissenschaftlichen und organisatorischen Tätigkeiten am WZL und auch besonders im Rahmen der BRAGECRIM Forschungsinitiative (*Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology*).

Ein herzlicher Dank gilt den Mitarbeitern des WZL, des Fraunhofer IPT und des Fraunhofer ILT, für die gute Zusammenarbeit, die Unterstützung und die freundliche Arbeitsatmosphäre. Für ihre wichtigen Beiträge als Freunde und Kollegen möchte ich mich bei Alexandre Orth, René Hermes, Christoph Mersmann, Christian Niggemann, Yu Cai, Philipp Jatzkowski, Ingrid Schmitz, Josiane Bougnet, Nicolas Pyschny, Max Funck, Valentin Morasch, Alexander Gatej und Sebastian Haag besonders bedanken.

Im Rahmen der BRAGECRIM Forschungsinitiative und der Organisation der Austauschprogramme zwischen den Universitäten UFSC Florianópolis (Brasilien) und RWTH Aachen (Deutschland) möchte ich mich noch bei Prof. Dr.-Ing. Marcelo Stemmer, Prof. Dr.-Ing. Carlos Schneider, Prof. Dr. Eng. Armando Albertazzi, Prof. Dr. Jomi Hübner, Prof. Dr. Gustavo Donatelli, Prof. Dr. Augusto Bruciapaglia, Prof. Dr.-Ing. Walter Weingaertner und Mario Roloff für die sehr angenehme Zusammenarbeit in Deutschland sowie in Brasilien bedanken.

Für die aufwändige Korrektur dieser Arbeit sowie meines Doktorvortrags möchte ich mich ganz herzlich bei Martin Harding, Michael Wiederhold, Maximilian Wegener, Maximilian Engelbracht, Andrea Radermacher, Sami Yalcin und Christopher Isenberg bedanken.

Für die engagierte Mitarbeit als studentische Hilfskräfte und wichtige Beiträge zur Gestaltung dieser Dissertation möchte ich mich bei Masato Takami, Elena Garcia, Marcelo Faria, Christian Silvano, Marcel Schmitz, Jihad Lyamani, Leonardo Adams, Priscila Antunes, Diego de Oliveira, Thiago Bacic und Igor Kuhlhoff bedanken.

Mein besonderer Dank gilt auch meiner Familie in Aachen und in Deutschland, Guilherme Mallmann, José Bittencourt, André Wilbert, Gustavo Cabral, Fernando Quito, Ricardo Grützmaker, Diego Dias, Musa Morena Manhães, Vito Palo, Raquel Barros, Alessandra Mainieri, Emílio Marins sowie allen Freunden und Kollegen des Freundeskreises Allan Kardec Aachen und der lateinamerikanischen Fußballmannschaft.

Als Stipendiat der brasilianischen Regierung in Deutschland von 2007 bis 2011 möchte ich mich bei meinem Fördergeber CNPq – *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* für die finanzielle Unterstützung und für das Vertrauen bedanken. In gleicher Weise gilt mein Dank der

CAPES – *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* und der DFG – Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts „*Cognitive Production Metrology for Flexible Small Series Production*“ innerhalb der BRAGECRIM Forschungsinitiative sowie der DFG für die Förderung des Projekts „Flexible Montagesysteme für die selbstoptimierende Produktion“ innerhalb des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“.

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, Antonio Roberto Pavim und Divanir Xavier, die mich trotz aller Schwierigkeiten ständig unterstützt haben. Meiner ganzen Familie und Freunde aus Brasilien danke ich für die stetige Ermutigung und Freundschaft trotz des Abstandes.

Nicht zu vergessen ist meine große Dankbarkeit an Gott, für die herausragende Möglichkeit und für alle positiven Herausforderungen, die ich in den letzten fünf Jahren während meiner Forschungstätigkeiten in Deutschland persönlich und professionell erlebt habe.

Aachen, den 9. Januar 2012.

Alberto Xavier Pavim

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	i
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xv
1 Automatisierte kundenorientierte Produktion	1
1.1 Automation und Flexibilität in der Produktion	1
1.2 Forschungsfrage: Eine automatisierte und qualitativ abgesicherte Kleinserie	4
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Kleinserien: Charakterisierung, Herausforderungen und Tendenzen	7
2.1 Kleinserien	7
2.1.1 Kleinserien in der Geschichte der Produktionstechnik	7
2.1.2 Charakterisierung der Kleinserie	9
2.1.3 Anforderungen zur Inspektion von Kleinserien	10
2.2 Werkzeuge zur Flexibilisierung von Produktionssystemen	11
2.2.1 Messtechnik und Sensordatenfusion	11
2.2.2 Agentenbasierte Systeme in der Automatisierungstechnik	19
2.2.3 Kognition in der Automatisierungstechnik	24
2.2.4 Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus	27
2.3 Neue produktionstechnische Paradigmen und zukünftige Trends	29
2.4 Defizite und Zwischenfazit	31
3 Die Fertigungsmesstechnik im Zukunftsszenario der Produktionstechnik	35
3.1 Zielsetzung	35
3.2 Aufgabenstellung und methodische Vorgehensweise	36
4 Konzept zur Steuerung von Messtechnik in flexiblen Produktionszellen	39
4.1 Konzept zur Gestaltung anpassungsfähiger Messtechnik	40
4.2 Agentenbasierte Steuerung der Produktions- und Inspektionsmittel	44
4.3 Generische Modellierung der Produktionssteuerungsstruktur	51

5 Fallstudie: Selbstoptimierende Montage eines miniaturisierten Lasers	55
5.1 Projektbeschreibung und -relevanz	55
5.1.1 Montagerechtes Design des miniaturisierten Lasersystems	57
5.1.2 Gestaltung einer flexiblen, modularen, roboterbasierten Montagezelle	58
5.2 Messtechnische Ausstattung zur Unterstützung der Montage	61
5.3 Aspekte zur Sensordatenfusion, Kognition und Selbstoptimierung	66
5.4 <i>Top-Down</i> -Modellierung der agentenbasierten Produktionssteuerung	69
5.5 <i>Bottom-Up</i> -Implementierung der agentenbasierten Produktionssteuerung	70
5.5.1 Bildaufnahmeagenten	71
5.5.2 Bildverarbeitungsagenten	73
5.5.3 Robotersteuerungsagenten	74
5.5.4 Inspektionsagenten: Justageagenten	76
5.5.5 Kalibrierungsagenten	79
5.5.6 Inspektionsagenten: Messagenten	84
5.5.7 Qualitätsagenten: Fehlerbehebungsagenten	85
5.5.8 Sequenzplanungsagenten	90
5.5.9 Montageplanungsagenten	91
5.5.10 GUI-Agenten	91
5.6 Diskussion der Ergebnisse und Perspektiven	92
6 Fallstudie: Flexible und automatisierte Prüfung von Freiformflächen	97
6.1 Projektbeschreibung und -relevanz	97
6.2 Messtechnische Ausstattung zur flexibel automatisierten Inspektion	100
6.2.1 Technische Aspekte der automatisierten Inspektionsmaschine	102
6.2.2 Inspektionssysteme zur Erweiterung des Wahrnehmungsvermögens der Inspektionsmaschine	104
6.3 Aspekte zur Sensordatenfusion, Kognition und Selbstoptimierung	108
6.4 <i>Top-Down</i> -Modellierung der agentenbasierten Produktionssteuerung	111
6.5 <i>Bottom-Up</i> -Implementierung der agentenbasierten Produktionssteuerung	112
6.5.1 Produktagenten	114
6.5.2 Inspektionsplanungsagenten	117
6.5.3 Routingagenten	118
6.5.4 Stationsagenten	118
6.5.5 Bildaufnahmeagenten	119
6.5.6 Bildverarbeitungsagenten	120
6.5.7 Inspektionsagenten: Inspektionskonfigurationsagenten	121
6.5.8 Kalibrierungsagenten	124
6.5.9 Qualitätsagenten: Datenfusionsagenten	125
6.5.10 IO-Agenten	126
6.5.11 GUI-Agenten	127
6.6 Diskussion der Ergebnisse und Perspektiven	128
7 Zusammenfassung und Ausblick	133

A	Softwarewerkzeuge zur Konzipierung der Produktionssteuerungsstruktur	137
B	Softwaredokumentation der ersten Fallstudie	147
B.1	Zielhierarchie-Graph	148
B.2	Analysephase	149
B.2.1	Use-Case-Diagramme	149
B.2.2	Sequenzdiagramme	154
B.2.3	Beschreibung ausgetauschter Prozessparameter	159
B.3	Modellierungsphase	163
B.3.1	Klassendiagramme	163
B.3.2	Zustandsdiagramme (Aufgabendiagramme)	167
C	Softwaredokumentation der zweiten Fallstudie	169
C.1	Zielhierarchie-Graph	170
C.2	Analysephase	171
C.2.1	Use-Case-Diagramme	171
C.2.2	Sequenzdiagramme	176
C.2.3	Beschreibung ausgetauschter Prozessparameter	182
C.3	Modellierungsphase	187
C.3.1	Klassendiagramme	187
C.3.2	Zustandsdiagramme (Aufgabendiagramme)	195
	Literaturverzeichnis	201
	Eigene Literatur	218
	Lebenslauf	221