

Systemarchitektur zur virtuellen Planung industrieller Bin-Picking Lösungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Inf. Adrian Schyja
aus
Groß Strehlitz

Tag der mündlichen Prüfung: 20.03.2015

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter
2. Gutachter: Prof. Dr. Heinrich Müller

Dortmund
2015

**Schriftenreihe Industrielle Robotik
und Produktionsautomatisierung**
hrsg. von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Band 4

Adrian Schyja

**Systemarchitektur zur virtuellen Planung
industrieller Bin-Picking Lösungen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3616-9

ISSN 2192-5941

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionssysteme (IPS), Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung (IRPA) der Technischen Universität Dortmund.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, Inhaber der Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Betreuung und die sehr gute Unterstützung, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr. Heinrich Müller, Inhaber des Lehrstuhls für Graphische Systeme der Technischen Universität Dortmund, für die Übernahme des Korreferats.

Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Alfred Hypki für die kritische Durchsicht meiner Arbeit sowie für seine außerordentlich sachkundigen Anregungen und Ratschläge. Frau Dr.-Ing. Emine Bilek danke ich für die inhaltliche Durchsicht meiner Arbeit und die zahlreichen konstruktiven Diskussionen. Für die tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung der Demonstratoranlage bedanke ich mich bei Herrn Jürgen Kutschinski.

In gleicher Form danke ich allen bisher nicht namentlich genannten Personen, die mich insbesondere bei der Durchsicht der Arbeit unterstützt haben. Ferner gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für ihre Unterstützung, Diskussionsbereitschaft sowie das angenehme Arbeitsklima.

Mein ganz herzlicher Dank geht an meine Freundin Frau Dr. Julitta Gucia für die motivierende Unterstützung. Und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die den Grundstein für meinen Weg gelegt haben und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Dortmund, im April 2015

Adrian Schyja

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	v
Mathematische Notation	ix
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.1.1 Beweggründe für den Griff in die Kiste	2
1.1.2 Charakterisierung von Bin-Picking Systemen	4
1.2 Grundlegende Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit	5
1.3 Gliederung der Arbeit	7
2 Stand der Technik und Forschung	9
2.1 Einsatz von Robotersystemen	9
2.2 Auslegung von Greifersystemen	12
2.2.1 Greifertechnik	12
2.2.2 Greifpunktbestimmung	14
2.2.3 Trajektorienplanung	15
2.3 Sensortechnik zur Bauteillokalisierung	19
2.3.1 Klassifizierung optischer Verfahren	19
2.3.2 Stereo-Vision	20
2.3.3 Strukturiertes Licht	21
2.3.4 Laser-Scanning	24
2.3.5 Time Of Flight	25
2.3.6 Einsatz optischer Sensorik zur Bauteillokalisierung	27
2.4 Programmierung und Simulation von Industrierobotern	28
2.5 Bin-Picking Systeme	32
2.5.1 Systeme in der Forschung und Entwicklung	32
2.5.2 Kommerzielle Systeme am Markt	35
3 Analyse von Anforderungen und Randbedingungen	39
3.1 Anforderungen an die Planung und Auslegung	39
3.2 Prozessspezifische Anforderungen und Randbedingungen	42

3.3	Kommunikation zwischen Systemkomponenten	45
3.4	Anforderung an die Software	46
3.4.1	Anforderungen an das Offline-Framework	47
3.4.2	Anforderungen an das Online-Framework	48
3.5	Ableitung des Handlungsbedarfs	49
4	Universelles Software-Framework DirectControl 3	53
4.1	Systemarchitektur des Software-Frameworks	53
4.1.1	Technische Basis der Plattform	54
4.1.2	Zentrale Komponenten und Schnittstellen	56
4.1.3	Informationsaustausch innerhalb von DirectControl 3	57
4.1.4	Einsatz existierender Bibliotheken und Bereitstellung von Basisstrukturen	58
4.2	Auslegung und Planung robotergestützter Arbeitszellen	60
4.2.1	Grafische Benutzungsschnittstelle	60
4.2.2	Konzept des Umweltmodells	63
4.2.3	Abbildung kinematischer Strukturen	64
4.3	Anwendungserweiterung	67
4.3.1	Registrierung von Addins zur Laufzeit	69
4.3.2	Registrierung von Komponenten zur Laufzeit	70
4.3.2.1	Nutzung von MEF in DirectControl 3	72
4.3.2.2	Praktisches Anwendungsbeispiel	72
4.4	Realisierung funktionaler Erweiterungen	74
4.4.1	Anbindung von 3D-Visualisierung	74
4.4.2	Methoden zum Datenaustausch	76
4.4.2.1	Einsatz von AutomationML als standardisierte Datenbasis	77
4.4.2.2	Integration von CAD-Modulen	78
4.4.2.3	Effiziente Verarbeitung von COLLADA-Dokumenten	80
4.4.3	Kollisionsdetektion und Physiksimulation	85
4.4.4	Integration der Bewegungssimulation	87
4.4.4.1	Bereitstellung allgemeiner Strukturen	88
4.4.4.2	Integration von RCS-Modulen	89
4.4.5	Zusammenfassung	90
5	Konzept und Umsetzung einer Bin-Picking Systemarchitektur	93
5.1	Konzipierung des Bin-Picking Frameworks	94
5.2	Modularisierung und Architektur	96
5.2.1	Schichten- und Kommunikationsmodell	96
5.2.2	Software-Architektur des Bin-Picking Frameworks	97
5.2.3	Konfiguration und Parametrierung der Systemkomponenten	101
5.3	Kommunikation und Synchronisation der Sub-Systeme	103

5.3.1	Anbindung an eine Zellensteuerung	103
5.3.2	Prozessablauf und Kommunikation bei der Initialisierung	106
5.3.3	Prozessablauf und Kommunikation bei Bauteilanforderung	108
5.4	Monitoring und Diagnose	109
5.5	Zusammenfassung	113
6	Prototypische Umsetzung und Verifikation	115
6.1	Nutzung vorhandener Systemkomponenten	116
6.2	Verifikation an einer virtuellen Versuchsumgebung	119
6.2.1	Auslegung der Anlage in der virtuellen Versuchsumgebung	119
6.2.2	Realisierung notwendiger Software-Module	120
6.2.3	Virtuelle Befüllung von Kisten	124
6.2.4	Strategien zur Bauteillokalisierung	125
6.2.5	Bahnplanung und Bauteilentnahme	127
6.2.6	Simulation der SPS- und Roboterkommunikation	131
6.2.7	Assistentengeführte Parametrierung	135
6.2.8	Simulation von Bin-Picking	138
6.2.9	Exemplarische Simulationsergebnisse	141
6.2.9.1	Experiment 1 – Erreichbarkeitsprüfung	142
6.2.9.2	Experiment 2 – Entleerungsgrad	143
6.2.9.3	Experiment 3 – Taktzeitanalyse	144
6.3	Verifikation an einer realen Versuchsumgebung	145
6.3.1	Auslegung der realen Versuchsanlage	147
6.3.1.1	Kollisionsprüfung im Prozess	147
6.3.1.2	Kalibrierung des Vision-Systems	148
6.3.2	Realer Prozessablauf	149
6.3.3	Ergebnisse der realen Versuchsdurchführung	152
6.3.3.1	Entleerungsgrad	152
6.3.3.2	Taktzeitanalyse	153
6.4	Zusammenfassende Bewertung	153
7	Zusammenfassung und Ausblick	157
7.1	Zusammenfassung	157
7.2	Ausblick	159
A	Vorgehen zur Inbetriebnahme	163
A.1	Installation des Roboterprogrammes	163
A.2	Realisierung der SPS-Logik	166
A.3	Konfiguration und Parametrierung	168
B	Zentrale Strukturen und Klassen	173

B.1	DirectControl 3	173
B.1.1	Zentrale Manager-Klassen	173
B.1.2	Vererbungshierarchie des Umweltmodells	174
B.1.3	Abbildung kinematischer Ketten	175
B.2	Bin-Picking Framework	176
B.2.1	Nachrichtenverarbeitung	177
B.2.2	Vererbungshierarchie der Konfigurationsklassen	178
B.2.3	Automatische Validierung von Attributen	181
Literaturverzeichnis		183
Abbildungsverzeichnis		205
Tabellenverzeichnis		209