



305

Yi Shen

System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

Yi Shen

**System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der
Fließmontage**

Herbert Utz Verlag · München 2015

Forschungsberichte IWB
Band 305

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7167-0 Version: 1 vom 05.10.2015
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4520-6
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

Yi Shen

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter,
Ruhr-Universität Bochum

Die Dissertation wurde am 17.03.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30.06.2015 angenommen.

Yi Shen

**System für die Mensch-Roboter-Koexistenz
in der Fließmontage**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 305

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4520-6

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Ich bedanke mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum, für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, dem Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Rüdiger Spillner für die enge, konstruktive Zusammenarbeit und die spannenden gemeinsamen Diskussionen. Besonderer Dank gilt an dieser Stelle dem Leiter der mechanischen Werkstatt am *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Herrn Kurt Hartmann, der mich tatkräftig unterstützt und begleitet hat. Herrn Dr.-Ing. Gerhard Straßer, Herrn Dominik Simon und Frau Bettina Schwarz danke ich für die kritische Begutachtung des Manuskripts und die wertvollen Anregungen. Hervorheben möchte ich meine ehemaligen Kollegen Herrn Christian Thiemann und Herrn Fabian Reiß aus dem Büro 22 und mich für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken.

Nicht zuletzt gilt mein aufrichtiger Dank meinen Eltern, die mich in meinem Handeln stets unterstützt und gefördert haben und mir diesen spannenden Weg ermöglicht haben. In ganz besonderem Maße danke ich Dir, Ronit, für Deine unermüdliche Unterstützung, den notwendigen Rückhalt, Deine Geduld und Dein Verständnis, die mich während der Erstellung dieser Arbeit stets begleitet haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Flexibilitätssteigerung durch Arbeitsraumteilung.....	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	4
2 Stand der Forschung und Technik.....	7
2.1 Industrieroboter.....	7
2.1.1 Grundkomponenten und -begriffe.....	7
2.1.2 Entwicklung und Einsatzfeld.....	8
2.1.3 Programmierverfahren und Robotersteuerung.....	10
2.2 Mensch-Roboter-Kooperation.....	12
2.2.1 Einführung.....	12
2.2.2 Formen der Kooperation.....	15
2.3 Sicherheit in der Kooperation.....	17
2.3.1 Allgemeines.....	17
2.3.2 Einsatzvoraussetzungen.....	19
2.3.3 Sicherheitsmaßnahmen.....	21
2.3.4 Normative Rahmenbedingungen.....	22
2.4 Sicherheitsstrategien.....	26

2.4.1	Einführung.....	26
2.4.2	Energieabsorption.....	27
2.4.3	Kontaktdetektion und -reaktion.....	30
2.4.4	Kontaktprädiktion und -reaktion.....	32
2.4.5	Lokalisierung.....	36
2.4.6	Bewertung bestehender Ansätze.....	38
2.5	Konkretisierung des Handlungsbedarfs.....	42
3	Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage.....	45
3.1	Allgemeines.....	45
3.2	Montageprozess.....	46
3.3	Arbeitsraumüberwachung.....	47
3.4	Roboterbahnplanung.....	49
3.5	Ökonomische Effizienz.....	52
3.6	Systemaufbau.....	53
3.7	Fazit.....	53
4	Konzeption und Systementwurf.....	55
4.1	Übersicht und Vorgehen.....	55
4.2	Entwurf des Synchronisationskonzepts.....	57
4.2.1	Systemgrenzen und Synchronisationskaskade.....	57
4.2.2	Synchronisationsprinzip.....	58
4.2.3	System I: Montagehauptkörper – Roboter.....	59
4.2.4	System II: Roboter – Überwachungsraum.....	61
4.3	Statechart-Modell.....	62

4.3.1	Allgemeines	62
4.3.2	Industrieroboter als Statechart	63
4.4	Robotermodell	64
4.4.1	Allgemeines	64
4.4.2	Modellierungsräume	65
4.4.3	Koordinatentransformation	66
4.4.4	Systemtheoretische Betrachtung	68
4.4.5	Auswahl Identifikationsverfahren	70
4.4.6	Systemidentifikation	73
4.4.7	Prädiktion	78
4.5	Arbeitsraumüberwachung und -synchronisation	80
4.5.1	Allgemeines	80
4.5.2	Positionserkennung	82
4.5.3	Ablaufmodellierung	83
4.5.4	Arbeitsraumsynchronisation	95
4.5.5	Zwischenfazit	101
4.6	Umgebungsmodell	102
4.6.1	Allgemeines	102
4.6.2	Konkretisierung der Aufgabe	103
4.6.3	Mapping	105
4.6.4	Simplifizierung	110
4.7	Roboterbahnplanung	113
4.7.1	Allgemeines	113
4.7.2	Bahnplanung – Montageprozess	114
4.7.3	Bahnregelung – Re-Synchronisation	115

4.7.4	Bahnanpassung – Kollisionsvermeidung	117
4.8	Zusammenfassung des Konzepts.....	129
5	Systemaufbau und -erprobung.....	131
5.1	Einführung.....	131
5.2	Systemaufbau	131
5.2.1	Übersicht.....	131
5.2.2	Elektrohängebahn mit PKW-Karosse	132
5.2.3	Vertikalknickarmroboter mit Endeffektor.....	132
5.2.4	Kamerasystem	134
5.2.5	Laserscanner	134
5.2.6	Robotersteuerung und Echtzeitsystem	134
5.3	Kommunikationsarchitektur	135
5.3.1	Übersicht.....	135
5.3.2	Schnittstellen	136
5.4	Anwendungsbeispiel	138
5.4.1	Einführung.....	138
5.4.2	Förderbandsynchrone Montage.....	138
5.4.3	Koexistenz	139
5.5	Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbetrachtung.....	142
5.5.1	Allgemeines.....	142
5.5.2	Erforderliche Sicherheit.....	143
5.5.3	Entwicklungsmaßnahmen.....	143
5.5.4	Auslegung.....	143
5.5.5	Testroutinen.....	145

5.6	Fazit	146
6	Bewertung.....	147
6.1	Allgemeines	147
6.2	Technische Bewertung.....	148
6.2.1	Funktionsbewertung	148
6.2.2	Flexibilitätsbewertung	150
6.3	Wirtschaftliche Bewertung.....	152
6.3.1	Kostenstruktur.....	152
6.3.2	Kostenvergleichsrechnung.....	154
6.3.3	Kosteneinfluss Personal.....	155
6.3.4	Kosteneinfluss Hardware.....	157
6.3.5	Kosteneinfluss Verfügbarkeit	158
6.4	Fazit	161
7	Schlussbetrachtung.....	163
7.1	Zusammenfassung	163
7.2	Ausblick	165
8	Literaturverzeichnis	167
9	Studienarbeiten	193

Abkürzungsverzeichnis

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
APAS	Automatischer Produktions-Assistent
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations
BA	Bahnanpassung
BioRob	Bionic Robotics
BK	Betriebskosten
BP	Bahnplanung
BR	Bahnregelung
BRIC	Brasilien, Russland, Indien und China
BROMMI	Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboteranwendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion
CAD	Computer-Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CCF	Common Cause Failure
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CP	Collision Point
DC	Diagnostic Coverage
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
EHB	Elektrohängbahn
EN	Europäische Norm

FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSM	Finite State Machine
FTP	File Transfer Protocol
HK	Hardwarekosten
HMM	Hidden Markov Modell
IAD	Intelligent Automation Device
IAS	Intelligent Assist Systems
ICP	Iterative Closest Points
IEC	International Electrotechnical Commission
IFF	Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung
IFR	International Federation of Robotics
I/O	Input/Output
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IPK	Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
IPOC	Input-Process-Output-Counter
ISO	International Organization for Standardization
KCP	KUKA Control Panel
KMS	Kraft-Momenten-Sensor
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
KNN	künstliche neuronale Netze
KOS	Koordinatensystem
KRC	KUKA Robot Control

KRL	KUKA Robot Language
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LBR iiwa	KUKA Leichtbauroboter intelligent industrial work assistant
MA	Mitarbeiter
MATLAB	MATrix LABoratory
MG	Modellgütewert
MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output
MPC	Model Predictive Control
MTTF	Mean Time To Failure
MRK	Mensch-Roboter-Koexistenz
MRMMK	Multi-Roboter-Multi-Mensch-Koexistenz
NI	National Instruments
PKW	Personenkraftwagen
PL	Performance Level
PL _r	Performance Level required
PN	Petri-Netz
PRM	Probabilistic Roadmaps
RAMP	Real-Time Adaptive Motion
RK	Realisierungskosten
RMS	Root Mean Square
RRT	Rapidly-Exploring Random Trees
RSI	Robot Sensor Interface
RT	Real-Time

Abkürzungsverzeichnis

RWT	Rückwärtstransformation
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SISO	Single-Input- Single-Output
SK	Stillstandskosten
STL	Surface Tessellation Language
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TOTE	Test- Operate-Test-Exit
TS	Technical Specification
UR®	Universal Robot
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VWT	Vorwärtstransformation
XML	Extensible Markup Language

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
A_{Rob}	Roboter Systemmatrix
A_{HMM}	Hidden Markov Transitionsmatrix
B_{Rob}	Roboter Eingangsmatrix
B_{HMM}	Hidden Markov Emissionsmatrix
C_{Rob}	Roboter Ausgangsmatrix
D_{Rob}	Roboter Durchgangsmatrix
F_{BA}	virtuelle Ablenkungskraft
F_H	Haftkraft
F_N	Normalkraft
G	Gütemaß für die Bahnanpassung
I	Eingabeeinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
J_{TCP}	Jakobimatrix des Roboter-TCP
K	Kostenwert
L	Logikeinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
L_{Rob}	Roboter Kalman Verstärkungsfaktor
MG	Modellgütemwert
N_c	Kamera Steuerungshorizont
N_p	Kamera Prädiktionshorizont
O	Ausgabeeinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
O_T	Beobachtungssequenz des Hidden Markov Modells
O_{TE}	Ausgang der Testeinrichtung

Verzeichnis der Formelzeichen

$P_{i,j}$	Punktfolge für einen Montageprozess
P_{Rob}	Roboter Kovarianzmatrix des Schätzfehlers
Q	Gewichtungsmatrix für die Optimierung der Bahnanpassung
R_{Rob}	Roboter Kovarianzmatrix des Messrauschens
T	DH-Transformationsmatrix
TE	Testeinrichtung einer Sicherheitsarchitektur
T_R	rotatorische Transformationsmatrix
T_T	translatorische Transformationsmatrix
\dot{V}	Volumenstrom
X_{TCP}	kartesische Roboterpose des TCP

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
c	Kreuzvergleichseinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
d_r	Reaktionsabstand für die Bahnanpassung
d_s	kürzester Abstand zwischen Roboter und Umgebungsobjekten
e	Anzahl der Kanten bei Polygonen
e_{BA}	Richtung der virtuellen Ablenkungskraft F_{BA}
e_s	Richtung des Oberflächenabstands d_s
f	Anzahl der Flächen bei Polygonen
i	Verbindung innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
k_{BA}	Verstärkungsfaktor für die Bahnanpassung
k_P	Verstärkungsfaktor für den achssynchronen Positionsregler
m	Überwachungseinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur