

*Entwicklung eines experimentell gestützten Planungssystems
für sichere Mensch-Roboter-Kooperation
- Remote Robot Safety Cell -*

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Master of Science

Alexander Gürtler

geboren am 06.11.1987
in Berlin, Deutschland

Vorsitzende: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger
Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker
Tag der mündlichen Prüfung: 28.10.2015

Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik
BTU Cottbus-Senftenberg
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger

Alexander Gürtler

**Entwicklung eines experimentell gestützten Planungssystems
für sichere Mensch-Roboter-Kooperation
- Remote Robot Safety Cell -**

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.: Cottbus-Senftenberg, BTU, 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 978-3-8440-4105-7

ISSN 1864-5789

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 des Herausgebers

Die Automatisierungstechnik bildet eine Schlüsseltechnologie für die Steigerung der Produktinnovation und die Verbesserung von Wertschöpfungsprozessen. Als Konsequenz einer globalen Wirtschaftsstruktur müssen alle Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Produktion und Güterverkehr in einen übergreifenden Kontext gestellt und behandelt werden. Dabei steht die informationstechnische Verknüpfung verbundener Unternehmen und Unternehmensbereiche bei stetig veränderlichen Aufgabenstellungen und Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Die Automatisierung des betrieblichen und betriebsübergreifenden Informationsflusses sowie die Einbindung des Menschen in allen Phasen des Entwicklungs- und Leistungsprozesses bildet daher die vordringliche Aufgabenstellung für Forschung und Entwicklung. Durch den zielgerichteten, systematischen Einsatz und die ständig aktualisierte Beurteilung und Bewertung automatisierungstechnischer Lösungen wird die schnelle Umsetzung und Einführung hochwertiger und zukunftsweisender Innovationen gesichert.

Ziel der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Senftenberg (BTU) ist die kontinuierliche Verbesserung der automatisierungstechnischen Methoden und Verfahren im Hinblick auf fortgeschrittene Produktionsstrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung integrierter Fertigungs- und Montagesysteme unter Einsatz neuartiger Steuerungstechnik. Dazu werden leistungsfähige Entwurfswerkzeuge der Digitalen Fabrik erprobt und weiterentwickelt. Durch die Bereitstellung modernster Laborausstattung und die Zusammenarbeit mit industriellen und institutionellen Technologieführern wird der Stand der Technik in Wissenschaft und Forschung aktualisiert abgebildet. Nationale und internationale Forschungsarbeiten zu ganzheitlichen Automatisierungskonzepten, den Industrial Life Cycle Automation, runden das Aufgaben- und Leistungsspektrum des Lehrstuhls ab.

Die in dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen aus den Forschungsarbeiten des Lehrstuhls Automatisierungstechnik der BTU Cottbus Senftenberg. In diesen Bänden werden neue Resultate und Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung veröffentlicht. Die Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik sollen Forschung, Entwicklung und Anwendung zu automatisierungstechnischen Fragestellungen enger verknüpfen und daraus Potential für zukünftige Innovationen erzeugen.

Ulrich Berger

Kurzfassung

Nach Jahren der Effizienzsteigerung in der modernen Fertigungsindustrie steht ein Wechsel in den Produktionsparadigmen an. Neue Anforderungen zwingen die produzierende Industrie zum Umdenken.

Die Globalisierung mit ihren Chancen und Risiken bringt volatile Märkte, kürzere Produktlebenszyklen, breitere Produktportfolios, internationale Kooperationen und steigende Individualisierung von Produkten. Unternehmen müssen nicht nur die Qualität von Premiumprodukten wie Automobilen aufrechterhalten, sondern auch stetig profitabler werden, um das Wachstum zukunftsfähig zu gestalten.

Aufgrund der steigenden Komplexität von Produktionsautomaten kann die Profitabilität nicht allein durch konventionelle Automatisierung erreicht werden. Zur Unternehmens- und Standort-sicherung muss auch die Effizienz der menschlichen Wertschöpfung gesteigert werden, da sie das zentrale Element der Wettbewerbsfähigkeit darstellt.

Ein wichtiges Element zur Steigerung der Effizienz liegt in der Symbiose der Wandlungsfähigkeit des Menschen mit den repetitiven Qualitäten von Automaten. Gerade in der Automobilmontage ist diese Symbiose von Bedeutung: Da sie sich durch einen hohen Anteil an menschlicher Arbeitskraft auszeichnet, kann hier die Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) zur Effizienzsteigerung beitragen. Eine sinnvolle Arbeitsgestaltung kann die Vorteile beider Welten optimal ausnutzen, um so zukunftsfähige Arbeitsplätze zu gestalten.

In dieser Arbeit wird ein Planungssystem erarbeitet und vorgestellt, das eine frühzeitige Aussage über die Zulässigkeit von Roboterbewegungen bei Kooperationen mit Menschen ermöglicht. Die sicherheitsrelevanten Rahmenbedingungen für den Menschen können somit bereits im digitalen Planungsstadium bestimmt und die Gefährdung minimiert werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es, über ganzheitliche, nachhaltige Planungen von MRK-Applikationen sowohl die Planungskosten als auch die Dauer einer Inbetriebnahme drastisch zu reduzieren und dabei den Schutz der an der Produktion beteiligten Personen sicherzustellen.

Wesentliche Schritte auf dem Weg zu einer zielgerechten Erstellung eines Planungssystems für die sichere Mensch-Roboter-Kooperation waren:

1. die Untersuchung und Recherche des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik zu MRK-Robotersystemen und bekannten Planungsmethoden;
2. die Formulierung der Randbedingungen für das Planungssystem und die technische Analyse relevanter Effekte auf die Mensch-Roboter-Kontakte;
3. die Konzeption eines Planungssystems für die sichere Mensch-Roboter-Kooperation;
4. die Umsetzung des Planungssystems mittels eines generalisierten Roboterprüfstandes zur gesetzeskonformen Messung kritisch bewerteter Roboterbewegungen;
5. die Validierung des Planungssystems durch dessen Einsatz bei zwei geplanten MRK-Anwendungen in der Automobilmontage (eines in der Antriebsstrangmontage und eines in der Endmontage des Gesamtfahrzeuginnenraums).

Als Zusammenfassung und Fazit werden die gewonnenen Erkenntnisse reflektiert. Diskutiert wird, wo das Planungssystem in seiner jetzigen Form einzuordnen ist. Ein Ausblick zeigt, welche künftigen Einsatz- und Weiterentwicklungspotenziale es in sich birgt.

Abstract

After years of rising efficiency in the modern manufacturing industry, there is a paradigm shift in the fields of production. New requirements are forcing the industry to grow in new directions.

The opportunities and risks of globalization include volatile markets, shorter product life-cycles, and a wider range of products. Besides conserving the quality of premium products such as automobiles, enterprises constantly have to become more profitable in order to stay sustainable.

Due to the fact that the complexity of automated manufacturing plants has increased, profitability cannot be achieved by using conventional automation. For this reason, the human added value, which represents the central element of competitiveness, has to be raised to ensure that the corporation may remain a running concern at its place of location.

An important element for bringing about this improvement in efficiency lies in the symbiosis of human mutability with the repetitive qualities of automated manufacturing plants. In the automotive assembly, which is distinguished by a high percentage of human workforce, this element can be the human-robot collaboration. Through an expedient job design, the advantages of both worlds can be exploited and future-oriented workplaces be created.

The following developed topic illustrates the planning process, which allows an early statement about the permissibility of human-robot plants and its' motions. The potential risks for human can be determined in the digital planning phase and therefore adapted. By using this procedure, planning costs and time for bringing into service can be reduced and an integrated, sustainable scheduling of human-robot plants enabled.

To achieve the targets of the planning system, for a safe human-robot collaboration, the following basic steps have been executed:

1. the investigation of the current state of the art of science and technology of human-robot systems and common planning methods;
2. the formulation of boundary conditions of the planning system and the technical analysis of relevant effects on human-robot contacts;
3. the conception of a planning system for the save human-robot-cooperation
4. the implementation of the planning system by using a generalized robot test bed for legislative conform measurements of critical evaluated robot motions;
5. the validation of the planning system through using it on two planned human-robot applications in the automotive assembly (one in the powertrain assembly and one in the final assembly of the vehicle interior).

As a conclusion of the thesis the previous results are reflected and a prospect formulated, where the planning system has to be classified today and where future applications and potentials are to find.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit fertigte ich während meiner Anstellung als Doktorand bei der Daimler AG in den Werken Stuttgart und Sindelfingen an. Hiermit möchte mich bei meinen Kollegen für die permanente Forderung und Förderung bedanken. In erster Linie bedanke ich mich dabei bei meinem Teamleiter Herrn Willi Klumpp, der die Weichen für das Thema stellte. Ein großer Dank gilt aber auch dem Team und der Unterstützung unserer zahlreichen Studenten, ohne die das Ergebnis nicht die aktuelle Güte erreicht hätte. Herrn Matthias Schreiber danke ich für die stellvertretende Teamleitung in den abschließenden neun Monaten, in denen er mein Projekt unterstützte. Herrn Dr. Matthias Reichenbach und Herrn Dr. Volker Zipfer danke ich für die akademischen Ratschläge und die methodisch wertvolle Kritik.

Für eine hervorragende Betreuung während der gesamten Promotionszeit gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, Leiter des Lehrstuhls Automatisierungstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. Er brachte stets Engagement und eine Vielzahl innovativer und wissenschaftlicher Ideen ein, durch die die Arbeit den finalen Schliff erhielt.

Bei Herrn Prof. Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker vom Institut für Mobile Systeme (IMS) an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg möchte ich mich für die Mühen des Korreferates bedanken.

Frau Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe, Inhaberin des Lehrstuhls für Arbeitswissenschaften/Arbeitspsychologie an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meiner Lebensgefährtin Sylvia für die ununterbrochene und fortwährende Unterstützung in allen Lebenslagen bedanken. Ohne diese Unterstützung hätte ich weder den Freiraum noch die Energie zum Anfertigen dieser Dissertation gehabt.

Alexander Gürtler

Besigheim, den 11. Juli 2015

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen.....	ix
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole.....	xi
Verzeichnis der Abbildungen.....	xiii
Verzeichnis der Tabellen.....	xvii
1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation für die Mensch-Roboter-Kooperation in der Industrie.....	4
1.2. Zielstellung der Arbeit.....	6
1.3. Aufbau der Arbeit.....	7
2. Stand von Wissenschaft und Technik: Mensch-Roboter-Kooperation.....	9
2.1. Industrieroboter in Einsatz.....	12
2.2. Forschungsroboter für die Zukunft.....	16
2.3. Methoden aus der Industrie.....	19
2.4. Methoden aus der Forschung.....	23
2.5. Forschungsbedarf im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation.....	27
3. Formulierung der Randbedingungen für ein neues Planungssystem.....	31
3.1. Umgebungsanalyse der sicheren Mensch-Roboter-Kooperation.....	31
3.2. Ermittlung der roboterbedingten Gefährdungsgrößen.....	33
3.3. Integration der notwendigen Messmethodik.....	41
3.3.1. Kraftmessungen bei Mensch-Roboter-Kollision.....	41
3.3.2. Betrachtung der Biofidelität ausgewählter Körperbereiche.....	45
3.3.3. Eignungsuntersuchung verschiedener Druckmesssysteme.....	48
3.4. Funktionsbestimmung für die sichere Mensch-Roboter-Kooperation.....	49
3.4.1. Untersuchungen zum Kollisionsverhalten.....	55
3.4.2. Untersuchung der Kollisionserkennungsfunktion.....	58
3.5. Systembildung mit den notwendigen Randbedingungen.....	60
4. Konzeptentwurf und Lösungsansatz für ein experimentell gestütztes Planungssystem.....	65
4.1. Entwurf des MRK-Planungssystems mit Konzeptkomponenten.....	66
4.2. Komponente 1: umgebungsbedingte Sicherheitsfunktion.....	75
4.3. Komponente 2: roboterbedingte Sicherheitsfunktionen.....	79
4.4. Komponente 3: Raumindizierung für Sicherheitsräume.....	90
4.4.1. Octree-Kompressionsverfahren zur Anlagenbeschreibung.....	93
4.4.2. Zuordnungsverfahren relevanter Körperbereiche.....	96
4.5. Komponente 4: Sicherheitsbewertungsfunktion.....	104
4.6. Komponente 5: Überführung in den legislativen Kontext.....	106

5. Realisierung einer Remote Robot Safety Cell (RRSC)	109
5.1. Aufgabenstellung der RRSC	110
5.2. Modularer Aufbau der RRSC	112
5.2.1. Modul 1: Roboterhardware	113
5.2.2. Modul 2: Prüfungslast	116
5.2.3. Modul 3: Steuerungstechnik	119
5.2.4. Modul 4: Messtechnische Integrationen	127
5.2.5. Modul 5: Bedienung und Datenbank	132
5.2.6. Modul 6: Externe Systemschnittstellen.....	139
5.2.7. Zwischenfazit zur RRSC.....	140
5.3. Prozessverifikation	140
6. Validierung des Planungssystems an beispielhaften Montageapplikationen mit Mensch-Roboter-Kooperation.....	145
6.1. Kupplungsmontage eines Automatikgetriebes	145
6.2. Schraubanwendung mit Leichtbauroboter am Gesamtfahrzeug	152
7. Zusammenfassung und Ausblick	157
7.1. Zusammenfassung	157
7.2. Fazit	159
7.3. Ausblick.....	159
Literaturverzeichnis.....	162
A. Anhang.....	xxiii