

Wenchao Zou

**Entwicklung eines Systems für das
Programmieren durch Vormachen
unter Nutzung der Augmented Reality
für roboterbasierte Montagesysteme**

**Entwicklung eines Systems für das Programmieren durch Vormachen unter
Nutzung der Augmented Reality für roboterbasierte Montagesysteme**

**Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation**

vorgelegt von

Wenchao Zou M.Sc.

**geboren am 28.11.1984
in Shanghai, China**

| | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Vorsitzender: | Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll |
| Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger |
| Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Volker Krüger |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 10.09.2018 |

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

Wenchao Zou

**Entwicklung eines Systems für das Programmieren
durch Vormachen unter Nutzung der Augmented
Reality für roboterbasierte Montagesysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6286-1

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

Die Automatisierung der Produktion, speziell für die Kleinserienmontage, erfordert beim Roboterersatz eine immer höhere Flexibilität zur wettbewerbsfähigen Herstellung von Gütern nach Änderungen der Produkte oder Prozesse. Dies kann jedoch von den konventionellen Roboterprogrammiersystemen nicht ausreichend erfüllt werden. Der Grund besteht darin, dass diese komplex zu bedienen sind und hohe Anforderungen an die Qualifikation des Personals stellen. Um diesen Engpass zu beheben, wurde ein Konzept zur intuitiven und einfachen Roboterprogrammierung entwickelt. Es bietet die Möglichkeit für Personal mit wenig Roboterkenntnissen, ausführbare Roboterprogramme für komplexe Aufgaben wie Montageaufgaben innerhalb kurzer Zeit zu erstellen.

Das entwickelte Roboterprogrammierkonzept nutzt einen intuitiven demonstrativen Ansatz, wodurch die Erstellung der Montageaufgaben durch Vormachen der Aufgabe anstatt durch konventionelle Ansätze abgeschlossen wird. Bei der sogenannten Programmierung durch Vormachen wird die Demonstration ohne Nutzung von einem physischen Robotersystem durchgeführt. Die Mensch-Maschine-Interaktion umfasst die Eingabe des Benutzers und die Rückmeldung an den Benutzer. Um die Bedienung des Programmiersystems möglichst intuitiv und einfach zu gestalten, werden unter anderem Gesten zur Eingabe und Augmented Reality zur Rückmeldung verwendet. Die Benutzerschnittstelle ist zur virtuellen Montageplanung gestaltet, sodass die Erstellung oder Wiederholung der Montageaufgaben einfach ist.

Zur Erstellung der Demonstrationsumgebung sind die geometrischen Modelle der Produkte und deren Baugruppendaten erforderlich. Diese Daten werden bei der Produktentwicklung gestaltet und aus der Konstruktionssoftware als eine Austauschdatei exportiert. Durch Lesen dieser Austauschdatei werden die Baugruppendaten in die Demonstration überführt. Die demonstrierten Montageaufgaben werden in Teilaufgaben segmentiert und in eine Aufgabensequenzdatei eingeführt. Unter Nutzung der Aufgabensequenzdatei werden die Roboteraktionen aus einer vordefinierten Aktionsbibliothek, worin die Aktionen als Musterfunktionen zur generellen Beschreibung der Montageaufgaben enthalten sind, aufgerufen und parametrisiert. Dadurch werden die Roboterprogramme nach der Demonstration automatisiert generiert. Die Parameter der Roboteraktionen werden durch Kombination von Bewegungserfassung des Benutzers und Transformationen der Baugruppenabhängigkeiten bestimmt. Dadurch kann die Ungenauigkeit der Bewegungserfassung kompensiert werden. Für die Gewährleistung der Sicherheit werden die generierten Roboterprogramme in einer virtuellen Umgebung simuliert. Nur die validierten Programme werden weiter an die Robotersteuerung überführt und ausgeführt. Der entwickelte Ansatz führt zu einer Erhöhung der Flexibilität und Reduktion von Aufwand und Komplexität der Roboterprogrammierung.

Ein Demonstrator wurde zur Realisierung der Montageaufgaben aufgebaut, womit das entwickelte Programmierkonzept umgesetzt wurde. Anhand des Aufbaus des Demonstrators konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, einen Roboter durch den Benutzer allein über händische Manipulation der virtuellen Bauteile für Montageaufgaben zu programmieren. Eine Reihe von Experimenten wurde am Demonstrator durchgeführt, um die Anwendbarkeit des Konzepts bewerten zu können. Die Testergebnisse zeigen, dass das entwickelte Konzept für die avisierten Aufgaben grundsätzlich geeignet ist.

Abstract

The automation of production, especially for small-batch assembly, requires increasingly higher flexibility for using robots so that the production line could be adapted for any changes in products or processes. However, this problem cannot be comprehensively fulfilled by conventional robot programming systems. This is because these systems are complex to operate and place high demands on the qualification of the personnel handling the system. To overcome this bottleneck, a concept for intuitive and simple robot programming was developed in this work. It offers the possibility for personnel with little knowledge of robotic systems to create executable programs for performing complex tasks such as assembly with minimal time.

The developed robot programming concept is based on an intuitive approach wherein the assembly tasks are created through demonstrations instead of the conventional robot programming approaches. This programming by demonstration approach is based on virtual demonstration of tasks without requiring the physical robotic system. The human-machine interaction includes input from the user and the feedback to the user. To make the operation of the programming system intuitive and easy to interact, gestures are used for input and augmented reality for feedback. The user interface is designed for performing virtual assembly planning to create or reproduce assembly tasks easily.

To create the demonstration environment, the geometric models of the parts and their assembly data are used. This data is generated during product development and exported from the CAD software as an exchange file. Reading this exchange file transfers the assembly data to the demonstration environment. The human demonstrations of the assembly tasks are then performed, and a task sequence file is generated which includes segmentation of the assembly tasks into subtasks. Using the task sequence file, the robot actions from an action library, which contain the actions as template functions for general description of the assembly tasks, are invoked and parameterized. In this way, the robot programs are generated automatically after the demonstration. The parameters of the robot actions are defined by combining the user's motion capture and the transformations of the assembly constraints, thus compensating for the inaccuracy of the motion capture system. To ensure safety, the generated robot programs are initially simulated in a physics environment and the validated programs can be transferred to the robot controller for execution. The developed approach leads to an increased flexibility and a reduction of effort and complexity in robot programming.

A demonstrator was set up to realize the assembly tasks, with which the developed programming concept was implemented. The design of the demonstrator showed that it is possible for the user to program a robot alone for assembly tasks by manipulating the virtual components manually. A number of experiments were carried out using the demonstrator to evaluate the applicability of the concept. The test results show that the concept developed is basically suitable for the tasks envisaged.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit als Doktorand am Lehrstuhl Automatisierungstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) Cottbus-Senftenberg, gefördert durch den China Scholarship Council (CSC).

Zuerst möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, dem Lehrstuhlinhaber, für seine hervorragende Unterstützung bei der Betreuung dieser Arbeit bedanken. Durch seine hilfreichen Anregungen und wertvollen Hinweise hat er entscheidend zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Berger gilt auch mein Dank für das Ermöglichen meiner Teilnahme an vielen wissenschaftlichen Veranstaltungen.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Krüger für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Arbeit war die enge Zusammenarbeit mit meinen Kollegen am Lehrstuhl und die Unterstützung durch meine Freunde. Ausdrücklich danke ich Herrn Udo Steffen, Kai Henning, Dr.-Ing. Christian Lehmann, J. Philipp Städter, Jürgen Selka, Dr.-Ing. Uwe Rau für ihre Unterstützung und hilfreichen Diskussionen. Für die fruchtbare und interessante Zeit möchte ich mich bei allen Lehrstuhlmitarbeitern herzlich bedanken. Insbesondere Herrn Dr. Denny Thimm, Frau Stephanie Krause und Tanja Tartz danke ich für ihre Unterstützung. Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Duc Tho Le, Dr.-Ing. Mayur Andulkar, Panagiotis Kilimis, Alexandros Ampatzopoulos und Frau Karin Habelski für ihre außerordentliche Unterstützung und für ihre Anregungen. Sie haben mich motiviert und mir menschlich stets beigestanden.

Stolz bin ich auf meine Familie, besonders meine Eltern Frau Guoying Zhu und Herrn Huanming Zou, die mich in jeder Situation auf meinem bisherigen Lebensweg vorbehaltlos unterstützt haben. Ihnen bin ich zu tiefstem Dank verpflichtet.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meiner lieben Frau Xinxu, die in den letzten Jahren verständnisvoll auf viele gemeinsame Zeit verzichtet hat. Sie gab mir immer den liebevollen Rückhalt, den ich brauchte, um die vielen Herausforderungen während meines Studiums zu meistern.

Abschließend möchte ich mich dem CSC für die Förderung meines Stipendiums und die kontinuierliche Unterstützung während meines Aufenthalts in Deutschland bedanken.

Wenchao Zou

Cottbus, im Oktober 2018

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation und Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Zielstellung und Beiträge der Arbeit | 5 |
| 1.3 | Aufbau der Arbeit | 6 |
| 2 | Problemdefinition und Anforderungsanalyse | 9 |
| 2.1 | Problemdefinition bei Roboterprogrammierung für Kleinserienmontage | 9 |
| 2.2 | Analyse der Anforderungen zur Roboterprogrammierung für Kleinserienmontage 12 | |
| 3 | Stand der Technik und Forschung | 19 |
| 3.1 | Verfahren zur Roboterprogrammierung | 19 |
| 3.1.1 | Onlineprogrammierung | 20 |
| 3.1.2 | Offlineprogrammierung | 22 |
| 3.1.3 | Hybridprogrammierung | 24 |
| 3.1.4 | Bewertung der Verfahren der Roboterprogrammierung | 29 |
| 3.2 | Einbindung des Benutzers bei Programmierung durch Vormachen | 34 |
| 3.2.1 | Mensch-Maschine-Interaktion in Robotik | 34 |
| 3.2.2 | Augmented Reality zur Programmierung durch Vormachen | 48 |
| 4 | Entwicklung eines Konzeptes zur Programmierung roboterbasierter Montagesysteme | 57 |
| 4.1 | Überblick über das Konzept | 57 |
| 4.2 | Demonstration der Montageaufgaben | 58 |
| 4.3 | Erstellung der Montageaufgaben mit Aktionssequenz | 61 |
| 4.4 | Nachbearbeitung und Simulation zur Ausführung der Montageaufgaben | 63 |
| 4.5 | Zusammenfassung der Konzeptentwicklung | 64 |
| 5 | Erarbeitung der Systembestandteile | 65 |
| 5.1 | Demonstration der Montageaufgaben | 66 |
| 5.1.1 | Datenextraktion aus CAD Modellen | 66 |
| 5.1.2 | Konfiguration der Demonstration | 71 |
| 5.1.3 | Bewegungserfassung zur Mensch-System-Interaktion | 73 |
| 5.1.4 | Manipulation der virtuellen Bauteile bei Demonstration | 77 |
| 5.1.5 | Generierung der Montagereihenfolge | 82 |
| 5.2 | Generierung der Teilaufgabenfolge | 84 |
| 5.2.1 | Datenextraktion aus der Montagereihenfolge | 84 |
| 5.2.2 | Segmentierung der Montageaufgaben und Teilaufgaben | 86 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.3 | Parametrierung der Teilaufgaben | 90 |
| 5.3 | Generierung der Aktionssequenz | 92 |
| 5.3.1 | Roboteraktion zur Beschreibung der Montageaufgaben | 93 |
| 5.3.2 | Bibliothek der Roboteraktionen | 95 |
| 5.3.3 | Aktionssequenz mit Roboteraktionen | 97 |
| 5.4 | Simulation und Ausführung der Montageaufgaben | 100 |
| 5.4.1 | Mapping der Montageaufgaben in Roboterprogramme | 100 |
| 5.4.2 | Konfiguration der Simulation..... | 102 |
| 5.4.3 | Robotersteuerung zur Ausführung der Montageaufgaben | 104 |
| 6 | Implementierung des Konzeptes und dessen Validierung | 107 |
| 6.1 | Komponenten des Systems..... | 107 |
| 6.1.1 | Hardware | 107 |
| 6.1.2 | Software | 109 |
| 6.2 | Aufbau des Demonstrators | 110 |
| 6.3 | Experimentelle Validierung | 112 |
| 6.3.1 | Handerkennung und -verfolgung | 112 |
| 6.3.2 | Demonstration der Montageaufgabe durch Augmented Reality..... | 116 |
| 6.3.3 | Simulation und Ausführung der Montageaufgabe | 121 |
| 6.4 | Bewertung | 127 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 131 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 131 |
| 7.2 | Ausblick | 133 |
| 8 | Literaturverzeichnis..... | 135 |
| 9 | Anhang | 159 |
| 9.1 | Publikationen des Autors | 159 |
| 9.2 | Pseudocode..... | 160 |
| 9.3 | Roboterbahnplanung | 165 |