

Entwicklung einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle für die automatisierte Kleinserienmontage

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Sven Dose

aus Eutin

Tag der mündlichen Prüfung: 06.02.2014

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn

Berichte aus der Robotik

Sven Dose

**Entwicklung einer intuitiven
Mensch-Maschine-Schnittstelle
für die automatisierte Kleinserienmontage**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2842-3

ISSN 1434-8098

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

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, diese Dissertation selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Verwendung anderer als der kenntlich gemachten Hilfsmittel angefertigt zu haben. Alle aus anderen Arbeiten direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind vollständig unter Nennung ihrer Quelle angegeben.

Karlsruhe, Juli 2013

Kurzfassung

Der Trend zu kürzeren Produktlebenszyklen und einer höheren Variantenvielfalt erhöht die Zahl der Kleinserien in der industriellen Montage. Gleichzeitig verstärkt der hohe Anteil an Handarbeit den Kostendruck durch Niedriglohnländer. Ein Ansatz für die bisher meist zu aufwändige Automatisierung bei Kleinserien bieten neuartige, flexible Robotersysteme. Diese sind durch einen universellen Greifer und verschiedene Sensorsysteme zur Objektlokalisierung auch ohne Umbau für vielfältige Applikationen einsetzbar. Ihr Anwendungsgebiet umfasst Pick-and-Place-Aufgaben mit einer großen Bandbreite an Objekten und Varianten zur Bauteilbereitstellung. Eine Inbetriebnahme der Roboter mit herkömmlichen Methoden erfordert jedoch viel Zeit und Expertenwissen. Zudem wird das Erreichen eines robusten Dauerbetriebs durch das breite Anwendungsspektrum und die höhere Fehleranfälligkeit eines Universalsystems erschwert.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle, mit der auch unerfahrene Nutzer ein flexibles Robotersystem für Applikationen mit hoher Manipulationsgenauigkeit bei z.T. komplexer Bauteilzuführung programmieren können. Beim Einrichten der Objektlageerkennung wird die Auswahl einer geeigneten Sequenz von Sensoren und Algorithmen durch wenige Fragen mit hinterlegtem Entscheidungsbaum vereinfacht. Für die Parametrierung der Algorithmen werden verschiedene Zwischenergebnisse der Bildverarbeitungskette für eine intuitive Bewertung und Optimierung der Parametereinstellungen visuell aufbereitet. Die Programmierung von Roboterbahnen erfolgt über Jog-Steuerungen anhand speziell auf die Anforderungen zugeschnittener und intuitiv verständlicher Bewegungsrichtungen.

Ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit besteht in der autonomen, strategiebasierten Behandlung von wirtschaftlich unvermeidbaren Störungen im Betrieb mit dem Ziel, Ausfälle zu verhindern und die Prozessrobustheit von flexiblen Robotersystemen zu steigern. Über eine Datenbank mit Strategien kann der Bediener entsprechend den Anforderungen der Applikation verschiedene, geeignete Behandlungsmöglichkeiten für unterschiedliche Fehlerfälle bei der Objektmanipulation und -lokalisierung auswählen. Die zeitoptimale Aufrufreihenfolge der ausgewählten Strategien wird zur Laufzeit durch Schätzung des Fehlerfalls mittels eines Partially Observable Markov Decision Process (POMDP) geplant. Dieser Ansatz ermöglicht, die Kombination verschiedener Strategien zum Lokalisieren, Entfernen und Beschaffen von Objekten sowie zur Prüfung der Anwesenheit, um unterschiedliche Fehlerarten optimal zu behandeln. Zusätzlich wird die Behandlungsdauer reduziert. Die zur Optimierung erforderlichen statistischen Wahrscheinlichkeiten werden autonom als Erfahrungswissen aus vorhergehenden Behandlungen gelernt.

Die entwickelte Mensch-Maschine-Schnittstelle wird mit einem flexiblen Robotersystem an ver-

schiedenen Applikationen aus der Produktion der Robert Bosch GmbH evaluiert. Im Probandentest mit Einstellern aus der Fertigung wird gezeigt, dass eine erfolgreiche Programmierung komplexer Aufgaben kein Expertenwissen erfordert und die Inbetriebnahmedauer von ca. einer Woche auf wenige Stunden reduziert wird. Anhand von Dauerläufen bei fehleranfälligen Applikationen wird eine starke Steigerung der Prozessrobustheit durch die strategiebasierte Störungsbehandlung bei gleichzeitig geringem Inbetriebnahmeaufwand nachgewiesen. Der Einsatz eines POMDP sowie das Lernen des Erfahrungswissens ermöglichen die statistisch optimale Behandlung unterschiedlicher Fehlerfälle sowie eine Reduktion der Behandlungsdauer.

Abstract

The current trend of shorter product life cycle times and higher product variety increases the share of small batch sizes in assembly fabrication. At the same time the high amount of manual work raises the cost pressure by low-wage countries. Novel and flexible robot systems represent an approach for an economic automation that has been too extensive in most cases so far. They can be used for diverse applications without mechanical adaptation because of a universal gripper and various sensor systems for object localization. Their area of application covers pick-and-place tasks with a huge variety of objects and many variants of feeding these into the process. However conventional methods of commissioning require a lot of time and expert knowledge. Further, a robust and continuous operation is hard to achieve because of higher error-proneness of a universal system combined with the wide range of applications.

The aim of this work is to develop an intuitive human-machine interface that enables even inexperienced users to program a flexible robot system for assembly applications with high accuracy of manipulation and a complex feeding of components. For setting up the object detection, a few questions along a decision tree are used to simplify the selection of a proper sequence of localization algorithms and sensors. To reduce complexity of parameterizing the algorithms, different intermediate results of the image processing chain are processed and shown to the user. By intuitive evaluation of the visual results the parameter values can be optimized easily. The robot paths are programmed via teach-in using jog controls that offer directions of robot movements that are specially fitted regarding the requirements and can be used intuitively.

A fundamental contribution of this work is the autonomous and strategy based handling of errors that are economically inevitable during assembly operation. This avoids breakdowns and increases the robustness of flexible robot systems. By considering the requirements and limiting conditions of the application and using a data base with strategies, the user can properly assign several options to handle varying errors during object manipulation or localization. The ideal order of executing the selected strategies is planned at runtime by estimating the causal fault using a partially observable markov decision process (POMDP). This approach allows combining several strategies for localization, removing and obtaining objects as well as for checking their presence to handle different types of faults optimally. Further, the time for handling errors is reduced. The statistical probabilities used for optimization are learned autonomously from previous error handlings.

The human-machine interface is evaluated using a flexible robot system and different assembly applications at Robert Bosch GmbH. Tests including adjusters of the production show that complex assembly tasks can be programmed successfully without expert knowledge and the time needed can

be reduced from about one week to a few hours. Executing error-prone applications in continuous operation shows that the strategy-based error handling allows a significant improvement of process robustness while requiring only little commissioning effort. Using a POMDP combined with learning experience knowledge allows to handle varying fault types efficiently and to reduce the time needed.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Abteilung für Fertigungsautomatisierung (CR/APA) der Robert Bosch GmbH in Kooperation mit dem Institut für Anthropomatik vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Zuerst möchte ich mich besonders bei meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann, für die Betreuung dieser Arbeit, das entgegengebrachte Interesse sowie seine Unterstützung in Form der wertvollen Rückmeldungen und Anregungen bedanken. Desweiteren danke ich Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn für die freundliche Übernahme des Koreferats, sowie Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer und Juniorprof. Dr.-Ing. Anne Koziolok für die angenehme und faire Prüfung. Zudem danke ich allen bereits genannten Professoren sowie Prof. Dr.-Ing. Johann M. Zöllner, Prof. Dr. Tanja Schultz, Prof. Dr. Walter F. Tichy und Prof. Dr.-Ing. habil. Björn Hein für die hilfreichen Kommentare und Anregungen zu meiner Arbeit im Rahmen der Professorenrunde.

Großer Dank gilt meinen beiden Betreuern bei Bosch, Dr. Peter Schlaich und Dr. Frank Röthling, für die wertvollen Diskussionen, ihr ehrliches und hilfreiches Feedback sowie die zu mancher Zeit nötigen aufmunternden Worte. Allen Kollegen aus der CR/APA danke ich ganz herzlich für ihre Hilfsbereitschaft sowie die stets lustige und schöne gemeinsame Zeit. Für die fachliche Unterstützung, die vielen Anregungen und die gute Zusammenarbeit danke ich im Speziellen dem ganzen APAS-Team und insbesondere Dieter Kunz, Thomas Witzig, Jan-Peter Eckhoff, Simon Jessen, Christian Diessner, Christoph Noack und Raffael Lorenz aus dem MMI-Teilprojekt. Weiterhin möchte ich Sabine Saylor für die vielen guten Ratschläge und Tipps danken, die sie mir aus ihrer Erfahrung als Doktorandin stets bereitwillig gegeben hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen, die durch ihre Teilnahme an den Usability-Tests zur Evaluierung der Konzepte beigetragen haben.

Vielen Dank ebenfalls an Dorothee Schmidt, Christine Brand, Diana Kreidler und Isabelle Wappeler für die allzeit freundliche und hilfsbereite Unterstützung in allen organisatorischen Fragen.

Schließlich möchte ich meinen Eltern von ganzem Herzen danken, die mich sowohl während meiner Ausbildung als auch bei dieser Arbeit stets unterstützt und ermutigt haben.

Mein tiefster Dank gebührt meiner Partnerin Kristin für die permanente Unterstützung, ihre Geduld und die vielen aufbauenden und motivierenden Worte während der gesamten Zeit. Ohne ihre Rückendeckung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Karlsruhe, im August 2013

Sven Dose

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung und Beitrag	4
1.3	Aufbau der Arbeit	6
2	Analyse der Randbedingungen für eine flexible Automatisierung der Kleinserienmontage	7
2.1	Typische Applikationen in der Kleinserienmontage	7
2.1.1	Aufgabenspektrum	7
2.1.2	Bauteilspektrum und -zuführung	9
2.2	Flexible Robotersysteme für die Kleinserienmontage	11
2.2.1	Betrachtete Varianten flexibler Robotersysteme	13
2.2.2	Typisches Bedienerprofil	13
2.3	Klassifizierung von Störungen im Automatikbetrieb flexibler Robotersysteme	14
2.3.1	Begriffsdefinitionen bzgl. der Robustheit von Montageprozessen	14
2.3.2	Analyse auftretender Störungen und Ausfälle	15
2.3.3	Abgeleitete Möglichkeiten zur Steigerung der Robustheit	19
2.4	Anforderungen an eine MMS für flexible Robotersysteme	20
2.4.1	Anforderungen zur intuitiven Programmierung von Montageabläufen	20
2.4.2	Anforderungen an eine autonome Behandlung auftretender Störungen	21
2.5	Zusammenfassung	22
3	Stand der Technik	25
3.1	Erstellen von Roboterablaufprogrammen und Bewegungsbahnen	25
3.1.1	Roboterprogrammierung in der industriellen Praxis	29
3.1.2	Forschungsansätze zur intuitiven Roboterprogrammierung	30
3.1.3	Bewertung der vorgestellten Programmiermethoden	38
3.1.4	Lösungsansatz	39
3.2	Einrichten von Objektlageerkennungen	41
3.2.1	Inbetriebnahme von Objektlageerkennungen in der industriellen Praxis	42
3.2.2	Forschungsansätze zum intuitiven Einrichten der Objektlokalisierung	43
3.2.3	Bewertung der vorgestellten Ansätze	45

3.2.4	Lösungsansatz	46
3.3	Optimierung von Robustheit und Autonomie bei Montageprozessen	46
3.3.1	Optimierung der Prozessrobustheit in der industriellen Praxis	48
3.3.2	Forschungsansätze zur Optimierung der Prozessrobustheit	49
3.3.3	Bewertung der vorgestellten Optimierungsansätze	54
3.3.4	Lösungsansatz	56
3.4	Zusammenfassung	57
4	Entwicklung einer intuitiven MMS zur Programmierung flexibler Robotersysteme	59
4.1	Grundlagen zur Gestaltung von MMS	59
4.1.1	Begriffsdefinitionen zu MMS	59
4.1.2	Anforderungen zur Gestaltung einer MMS	60
4.2	Strukturierung einer Pick-and-Place-Aufgabe	61
4.3	Konzept zur intuitiven Bedienerführung	63
4.3.1	Ablaufplanerstellung durch iconbasierte Programmierung	64
4.3.2	Wizardbasierte Aktionsparametrierung	66
4.4	Methode zum intuitiven Einrichten einer Objektlageerkennung	67
4.4.1	Exemplarisch betrachtete Lokalisierungsverfahren	68
4.4.2	Bestimmung einer geeigneten Lokalisierungssequenz	69
4.4.3	Parametrierung von Objektlageerkennungen	72
4.5	Methode zur effizienten Positionierung eines Roboterarms	76
4.5.1	Analyse der erforderlichen Roboterpositionen	76
4.5.2	Aufgabenangepasste Jog-Steuerung	77
4.5.3	Definieren und Bearbeiten von Robotertrajektorien	82
4.6	Zusammenfassung	82
5	Entwicklung einer strategiebasierten, autonomen Störungsbehandlung	85
5.1	Grundlagen zum Partially Observable Markov Decision Process	86
5.2	Konzept einer effizienten, parametrierbaren Störungsbehandlung	90
5.3	Modellierung der Störungsbehandlung als POMDP	93
5.3.1	Motivation zum Einsatz eines POMDP	93
5.3.2	Modellierung des Zustandsraums	94
5.4	Parameterarme Strategien zur Störungsbehandlung	99
5.4.1	Kamerabasierte Lokalisierungsstrategien	99
5.4.2	Strategien zur Bauteilbeschaffung	101
5.4.3	Strategien zur Bauteilentfernung	102
5.4.4	Strategien zur Anwesenheitsprüfung	103
5.5	Lernen von statistischem Erfahrungswissen	104

5.6	Optimierung der Berechnungsdauer	106
5.6.1	Vorselektion über einen Wahrscheinlichkeitsbaum	108
5.6.2	Trennung von Wahrscheinlichkeiten vor und nach der Anwesenheitsprüfung	110
5.7	Initialisierung des Erfahrungswissens	112
5.7.1	Verwendung globaler Wahrscheinlichkeiten	112
5.7.2	Initialisierung durch Aufruf aller Strategien	112
5.7.3	Korrektur von Pseudo-Maxima durch eine Zusatzstrategie	113
5.8	Parametrierung der Störungsbehandlung	114
5.9	Zusammenfassung	117
6	Umsetzung von MMS und Störungsbehandlung	119
6.1	Gesamtübersicht	119
6.1.1	Roboter-Steuerung	119
6.1.2	Greifer-Steuerung	120
6.1.3	Bildverarbeitungsmodul	121
6.1.4	Roboter-Framework	122
6.1.5	Mensch-Maschine-Schnittstelle	123
6.1.6	Störungsbehandlung	123
6.2	Strategien zur Störungsbehandlung	124
6.3	Steuerung der Störungsbehandlung	126
6.4	Statistisches Erfahrungswissen	128
6.5	Zusammenfassung	130
7	Evaluierung	131
7.1	Eingesetzte Versuchsplattform	131
7.2	Evaluierung der MMS zur intuitiven Programmierung flexibler Robotersysteme	134
7.2.1	Durchführung von Usability-Tests	134
7.2.2	Evaluierung der Inbetriebnahmedauer	138
7.2.3	Evaluierung der Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz	142
7.3	Evaluierung der strategiebasierten Störungsbehandlung	146
7.3.1	Applikation I: Bremszylinder umsetzen	147
7.3.2	Applikation II: Koppler lagerichtig zuführen	148
7.3.3	Applikation III: Zylinder lagerichtig zuführen	150
7.3.4	Applikation IV: Ventilplatte palettieren	152
7.3.5	Applikation V: Ventalnadel palettieren	154
7.3.6	Applikation VI: Datamatrix-Code prüfen	155
7.4	Evaluierung der erfahrungsbasierten Strategieauswahl	156
7.4.1	Evaluierung der Parameter zur Initialisierung des Erfahrungswissens	157

7.4.2	Evaluierung der erfahrungsbasierten Reduktion der Behandlungsdauer	165
7.4.3	Evaluierung der Berechnungsdauer der optimalen Policy	170
7.5	Zusammenfassung	171
8	Schlussbetrachtung	173
8.1	Zusammenfassung	173
8.2	Ausblick	177
A	Abkürzungen und Formelzeichen	181
B	Homogene Transformationsmatrizen	183
C	Unterlagen zur Evaluierung der intuitiven MMS	185
C.1	Bewertungsbogen zur MMS	185
C.2	Fragebogen zur Sozialstatistik	186
C.3	Interviewleitfaden	187
D	Abbildungsverzeichnis	189
E	Tabellenverzeichnis	193
F	Literaturverzeichnis	195