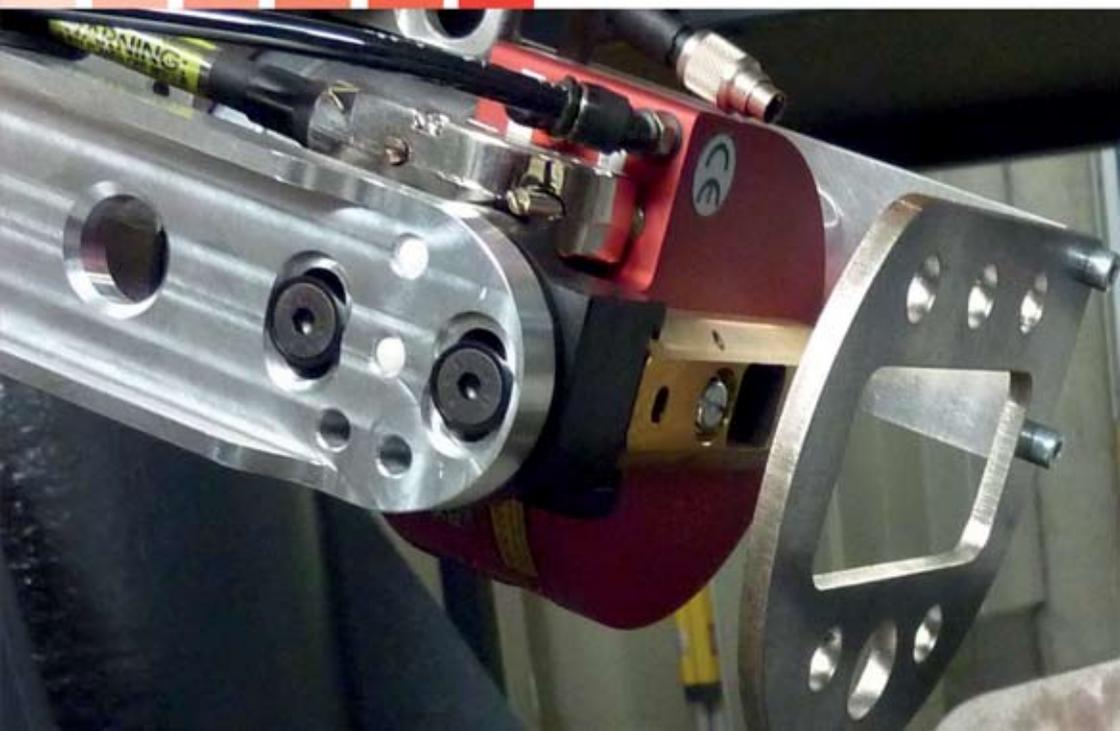


Konzept einer Fehlerkorrektur der
laserbasierten Bauteillokalisierung für
Schweißrobotersysteme

Guido Hoffmeier



Konzept einer Fehlerkorrektur der laserbasierten Bauteillokalisierung für Schweißrobotersysteme

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Guido Hoffmeier

aus

Ibbenbüren

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Juli 2017

1. Gutachter: AR Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

Dortmund, 2017

Berichte aus der Robotik

Guido Hoffmeier

**Konzept einer Fehlerkorrektur
der laserbasierten Bauteillokalisierung
für Schweißrobotersysteme**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5581-8

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

Für meinen Vater,
der mit dieser Arbeit verbunden bleibt.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Assistent an der Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung des Instituts für Produktionssysteme (IPS) und wurde in der Nachfolgeinstitution, der Professur für Regelung und Automatisierung von Produktionsprozessen (RAP) der Technischen Universität Dortmund, abgeschlossen.

Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf danke ich für die fachliche Begleitung meiner Promotion und insbesondere für die Unterstützung nach Beendigung meiner Anstellung am IPS, die es mir ermöglicht hat meine Arbeit erfolgreich zum Abschluss zu bringen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, dem Inhaber der Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung zu meiner Zeit als Wissenschaftlicher Assistent bedanke ich mich für seine Unterstützung bei der Vorbereitung meiner Promotion.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl, Leiter des Instituts für Flugzeug-Produktionstechnik der Technischen Universität Hamburg, danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Werner und Hedwig Hoffmeier, die mich mein Leben lang kompromisslos und mit ganzem Herzen unterstützt, mir mein Studium ermöglicht und damit die Voraussetzung geschaffen haben, welche mir die Vollendung dieser Arbeit erst ermöglicht hat.

Meiner Frau Birgit und meiner Tochter Lucie, Ihnen danke ich für die Geduld, die moralische Unterstützung und das Ertragen meiner Launen während der Entstehung dieser Dissertation. Ohne ihre Hilfe hätte ich genügend Gelegenheiten gehabt, von der Vollendung dieser Arbeit abzusehen.

Zu guter Letzt möchte ich allen Kolleginnen, Kollegen, Freundinnen und Freunden danken. Aus diesem Personenkreis hervorheben muss ich Frau Maria Plyusnina und Herrn Frank Domrös. Sie quälten mich mit so mancher

II

Diskussion und Erkenntnis, die mich allesamt stets und stetig meinem Ziel näher gebracht haben. Ebenso gilt meinem Dank allen weiteren Personen, die hier keine Erwähnung gefunden, aber Ihren Teil der Unterstützung zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problembeschreibung	2
1.2	Untersuchungsziel	6
1.3	Vorgehensweise	7
2	Stand der Wissenschaft und Technik	9
2.1	Historische Entwicklung des Roboterschweißens	9
2.2	Objektlokalisierung und -vermessung	11
2.2.1	Einordnung der Konturmessung	14
2.2.2	Kamerabasierte Systeme	16
2.2.3	Ultraschallbasierte Systeme	17
2.2.4	Laserbasierte Systeme	19
2.2.5	Sonstige Sensorsysteme	26
2.3	Sensorik für das Roboterschweißen	27
2.3.1	Prozessorientierte Verfahren	28
2.3.2	Geometrieorientierte Verfahren	29
2.3.3	Bauteillokalisierung und Nahtanfangssuche im Stahlbau	35
2.4	Unternehmensumfrage	36
3	Ableitung der Problematik	39
3.1	Zusammenfassung der Problematik	39
3.2	Versuchsziele	41
3.3	Rahmenbedingungen	41
3.3.1	Beschränkung der Suchmuster	42
3.3.2	Auswahl der Parameteranpassungen	42
3.3.3	Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile	42
3.3.4	Klimatische Bedingungen	43
3.4	Anforderungen an die Konzepte	43
4	Versuchsaufbau und Durchführung	45
4.1	Beschreibung der Versuchssysteme	45
4.1.1	Lasersensoren	45
4.1.2	Micro-Epsilon optoNCDT 1401-200	45

4.1.3	Baumer OADM 20I4470/S14C	47
4.1.4	Servo Robot Sense i/D-H	47
4.1.5	Auszüge aus den Herstellervorgaben	49
4.1.6	Auswahl eines Sensors	50
4.1.7	Das Testbauteil	50
4.1.8	Anlage Cloos QRC 350	50
4.1.9	ABB IRB 1600	52
4.1.10	Statischer Aufbau	53
4.2	Gestaltung und Ergebnisse der Versuche	55
4.2.1	Versuchsreihen an der Anlage Cloos QRC 350	57
4.2.2	Messungen am statischen Aufbau	81
4.2.3	Messungen und Verifikation am Aufbau ABB IRB 1600	85
4.3	Zusammenfassung und Handlungsempfehlung	87
5	Konzept zur Softwareentwicklung	91
5.1	Grundlegende Anforderungen	93
5.2	Die Geometriererkennung	94
5.2.1	Externe Messwertfilterung	95
5.2.2	Aufbereitung der Punktwolke	96
5.2.3	Die Schnittpunktberechnung	98
5.3	Die Fehlerbehandlung	98
5.3.1	Behandlung von Unstetigkeiten	98
5.3.2	Korrektur systematische Winkelabweichungen	99
5.3.3	Korrektur der geometrischen Verzerrung	103
5.4	Bereitstellung der Korrekturdaten	103
6	Evaluierung der Ergebnisse	105
6.1	Verifikation an der Anlage ABB IRB 1600	105
6.2	Verifikation an der Anlage Cloos QRC 350	107
6.2.1	Verifikation der Winkelabweichungen	107
6.2.2	Evaluierung der Parameteroptimierungen	110
7	Zusammenfassung und Ausblick	113
7.1	Übertragbarkeit der Ergebnisse	115
7.2	Ausblick	115