

BENJAMIN JOHNEN

**BAHNREFERENZIERUNG  
MITTELS DYNAMIC TIME WARPING  
ZUR BEWEGUNGSANALYSE VON  
INDUSTRIEROBOTERN**

# Bahnreferenzierung mittels Dynamic Time Warping zur Bewegungsanalyse von Industrierobotern

Dissertation  
zur  
Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur

der  
Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr-Universität Bochum

von  
Benjamin Johnen  
aus Dortmund

Bochum 2017

Dissertation eingereicht am: 21.08.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2017

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Zweiter Referent: Prof. Dr. Heinrich Müller

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 4/2017

**Benjamin Johnen**

**Bahnreferenzierung mittels Dynamic Time Warping  
zur Bewegungsanalyse von Industrierobotern**

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.: Bochum, 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 978-3-8440-5627-3

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*„Always with you what cannot be done. [...] Do. Or do not. There is no try.“*

Yoda

Star Wars: Episode 5 - The Empire Strikes Back (1980)

Lawrence Kasdan & George Lucas



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionssysteme (IPS), Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung (IRPA) der Technischen Universität Dortmund und am Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) der Ruhr-Universität Bochum.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssysteme, danke ich für die wohlwollende Betreuung und Unterstützung, die diese Arbeit erst ermöglicht hat. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr. Heinrich Müller, Inhaber des Lehrstuhls für Graphische Systeme der Technischen Universität Dortmund, für die Übernahme des Koreferats.

Teile dieser Arbeit resultieren aus dem Teilprojekt A4 „Effiziente Simulation der dynamischen Effekte bei oberflächenorientierter Roboterprozessführung“ des Sonderforschungsbereichs (SFB) 708 „3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung“. Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen für die gute und lehrreiche Zusammenarbeit im SFB und darüber hinaus, insbesondere Herrn Professor Dr. Heinrich Müller und Herrn Dr. Thomas Wiederkehr.

Für die engagierte Kooperation und die konstruktiven Diskussionen zur Bahnvermessung von Industrierobotern danke ich Herrn Carsten Scheele, Herrn Volker Miegel und Herrn Rene Kirsten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Daniel Hegels für die Unterstützung bei dem in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall der vollautomatischen Bahnoptimierung für das Thermische Spritzen.

Ich danke Herrn Michael Rieger und Herrn Kay Lenkenhoff für die inhaltliche Durchsicht sowie die wertvollen Diskussionen zur Arbeit und allen anderen fleißigen Helfern beim Korrekturlesen.

Auch danke ich allen weiteren Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich an beiden Lehrstühlen in Dortmund und Bochum zusammenarbeiten durfte, für Hilfsbereitschaft, Motivation und das gute Arbeitsklima. Dies gilt auch für die Unterstützung der Sekretärinnen und Techniker, die oft im Verborgenen bleibt aber nicht weniger wichtig ist.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich immer unterstützt und mit ihrer festen Überzeugung des Gelingens dieser Arbeit stetig motiviert haben.

Dortmund, im Oktober 2017  
Benjamin Johnen



# Vorveröffentlichungen

- [1] Johnen, Benjamin und Kuhlenkötter, Bernd (2016). „A Dynamic Time Warping Algorithm for Industrial Robot Motion Analysis“ In: *2016 Annual Conference on Information Science and Systems (CISS)*, S. 18-23. ISBN: 978-1-4673-9457-4. DOI: 10.1109/CISS.2016.7460470.



# Kurzfassung

Für die Automatisierung von industriellen Fertigungsprozessen mit Hilfe von Industrierobotern sind Erkenntnisse über das Bewegungsverhalten der Roboter notwendig, um zu ermitteln, ob die Anforderungen des Prozesses erfüllt werden können. Nationale und internationale Normen definieren Leistungskenngrößen für Industrieroboter und Methoden diese zu ermitteln. Diese allgemeinen Kenngrößen sind allerdings in der Praxis vielfach nicht ausreichend, um das Bewegungsverhalten eines Roboters für einen bestimmten Prozess zu beschreiben. In diesen Fällen müssen individuelle Versuche durchgeführt werden, bei denen die Bewegung des Roboters für prozessspezifische Bahnen gemessen und analysiert wird.

In der vorliegenden Dissertation werden das Vorgehen und die notwendigen Methoden für eine solche Bewegungsanalyse von Industrierobotern vorgestellt. Für die Messung von Bewegungsbahnen werden geeignete Messsysteme mit ihren zugrunde liegenden Messmethoden sowie notwendige Definitionen und Transformationen von Bezugskoordinatensystemen betrachtet. Ebenso werden Möglichkeiten zur Festlegung von Referenzbahnen aufgezeigt. Der Schwerpunkt der Arbeit widmet sich der Auswertung von gemessenen Bahnen in Bezug zu Referenzbahnen. Mittels einer Bahnreferenzierung wird ein Bezug zwischen den Bahnpunkten hergestellt, mit dem Ziel die Abweichungen von Positionen, Orientierungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Werkzeugkoordinatensystems des Roboters für jeden Punkt der Bahnen bestimmen zu können.

Aufgrund von sowohl zeitlichen als auch örtlichen Abweichungen einer gemessenen Bewegungsbahn zu einer geplanten Bewegung, ist die Bahnreferenzierung kein triviales Problem. Es wird gezeigt, dass sowohl eine einfache Bahnreferenzierung, durch Berechnung nächstgelegener Bahnpunkte, als auch eine Verallgemeinerung der Methoden der Normen auf beliebige Bahngeometrien in Punktzuordnungen resultieren, die eine Fehlinterpretation des Bewegungsverhaltens zur Folge haben können. Zur Lösung dieses Problems werden verwandte Problemstellungen und ihre Lösungsansätze aus anderen Forschungsgebieten untersucht. Das sogenannte Dynamic Time Warping ermöglicht eine Bahnreferenzierung, die sowohl die zeitlichen als auch örtlichen Abweichungen berücksichtigt. Für eine Adaption auf die Bewegungsanalyse von Industrierobotern, wird eine neue Verfahrensvariante entwickelt, welche die selektive Zuordnung von interpolierten Bahnpunkten ermöglicht, die Abstände der zugeordneten Punkte minimiert und die korrekte Bewegungsabfolge der Bahnen beibehält. Neben dem formalen Beweis der Eigenschaften dieser neuen Verfahrensvariante, wird die Einsetzbarkeit an zwei Anwendungsbeispielen veranschaulicht.

**Schlagwörter:** Dynamic Time Warping, Bewegungsanalyse, Industrieroboter



# Abstract

For the automation of industrial production processes by means of industrial robots, knowledge about the movement behavior of the robots is necessary in order to determine whether the requirements of the process can be met. National and international standards define performance parameters for industrial robots and methods to determine them. However, these general parameters are often not sufficient in practice to describe the movement behavior of a robot in a particular process. In these cases, individual tests have to be conducted, in which the movement of the robot for process-specific paths is measured and analyzed.

In this dissertation, the procedure and the necessary methods for such a motion analysis of industrial robots are presented. For the measurement of trajectories, suitable measuring systems with their underlying measurement principles and the necessary definitions and transformations of coordinate systems are considered. Possibilities for defining reference paths are also presented. The main focus of the work is the evaluation of measured paths in relation to reference paths. Using a path referencing method, a mapping between the points of the paths is established. The objective is to determine deviations of positions, orientations, velocities and accelerations of the tool coordinate system of the robot for each point of the paths.

Due to temporal and spatial deviations between a measured and a planned motion path, mapping is not a trivial problem. This dissertation shows that both a simple path mapping, by calculation of the nearest path points, as well as a generalization of the methods of the standard specifications for unrestricted path geometries result in point mappings, which can lead to a misinterpretation of the movement behavior. For the solution of this issue, related problems and their solutions from other research areas are investigated. The so-called Dynamic Time Warping allows a path mapping, which takes into account the spatiotemporal deviations. For an adaptation to the motion analysis of industrial robots a new variant of the technique is developed. It allows the selective mapping of interpolated points, minimizes the distances between the mapped points and maintains the correct order of the point sequences. In addition to the formal proof of the properties of this new variant, the applicability is illustrated by two application examples.

**Keywords:** Dynamic Time Warping, motion analysis, industrial robots



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziel und Beitrag der Arbeit . . . . .	3
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Industrieroboter</b>	<b>7</b>
2.1	Kinematische Strukturen . . . . .	8
2.2	Bewegungsdefinition und Interpolation . . . . .	13
2.3	Anwendungsgebiete und ihre Anforderungen an die Industrierobotik . . . . .	15
2.4	Bewertung der Leistungsfähigkeit von Industrierobotern . . . . .	18
2.4.1	Kenngrößen aus nationalen und internationalen Normen . . . . .	20
2.4.2	Einflussfaktoren auf die Robotergenauigkeit . . . . .	26
2.5	Zusammenfassung im Kontext dieser Arbeit . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Messung von Roboterbewegungsbahnen</b>	<b>31</b>
3.1	Messverfahren und Messsysteme . . . . .	32
3.1.1	Taktile Messung . . . . .	32
3.1.2	Optische Messung . . . . .	35
3.1.3	Anwendungsbeispiele in der Industrierobotik . . . . .	41
3.2	Definition und Ermittlung von Referenzbahnen . . . . .	44
3.3	Definition, Messung und Transformation von Bezugskordinatensystemen . . . . .	46
3.3.1	Basiskordinatensystem . . . . .	47
3.3.2	Werkzeugkordinatensystem . . . . .	48
3.4	Zusammenfassung im Kontext dieser Arbeit . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Handlungsbedarf und Definition von Anforderungen</b>	<b>53</b>
4.1	Zuordnungsproblematik beim Vergleich von Roboterbahnen . . . . .	56
4.2	Anforderungen an einen automatischen Vergleich beliebiger Roboterbahnen . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Verwandte Problemstellungen aus anderen Forschungsgebieten</b>	<b>61</b>
5.1	Anwendungsgebiete für den Vergleich von Zeitreihen . . . . .	61
5.1.1	Kartenabgleich von GPS-Daten . . . . .	62
5.1.2	Aktivitätserkennung von Menschen, Tieren und Objekten . . . . .	63
5.1.3	Gesten- und Handschrifterkennung . . . . .	65
5.1.4	Spracherkennung . . . . .	67

5.2	Ähnlichkeitsmaße und Referenzierungsmethoden für Zeitreihen . . . . .	68
5.2.1	Hausdorff-Distanz . . . . .	69
5.2.2	Editierdistanz . . . . .	71
5.2.3	Longest Common Subsequence . . . . .	76
5.2.4	Fréchet-Distanz . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Dynamic Time Warping</b>	<b>83</b>
6.1	Das klassische Dynamic Time Warping . . . . .	83
6.2	Nebenbedingungen für die Zuordnungsfunktion . . . . .	89
6.2.1	Schrittweitenbegrenzung . . . . .	90
6.2.2	Globale Beschränkungen . . . . .	90
6.2.3	Gewichtungskoeffizienten . . . . .	93
6.3	Varianten des klassischen Dynamic Time Warping Algorithmus . . . . .	93
6.3.1	Continuous Dynamic Time Warping . . . . .	95
6.3.2	Subsequence Dynamic Time Warping . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Entwicklung einer Methode zur automatischen Roboterbahnanalyse</b>	<b>105</b>
7.1	Dynamic Time Warping für den Vergleich von Roboterbahnen . . . . .	105
7.1.1	Zuordnung einzelner linearer Bahnsegmente . . . . .	106
7.1.2	Dynamic Time Warping mit selektiver Interpolation . . . . .	115
7.1.3	Eigenschaften des DTW mit selektiver Interpolation . . . . .	130
7.1.4	Zuordnung von Teilbahnen . . . . .	142
7.2	Berechnung von Bahnkenngrößen . . . . .	145
7.2.1	Datenvorverarbeitung zur Berechnung abgeleiteter Kenngrößen . . .	146
7.2.2	Punktbezogene Kenngrößen . . . . .	150
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiele</b>	<b>155</b>
8.1	Positionsabweichungen einer standardisierten Roboterbahn . . . . .	155
8.2	Vollautomatische Bahnoptimierung für das thermische Spritzen . . . . .	167
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>177</b>
9.1	Zusammenfassung der Arbeit . . . . .	177
9.2	Ausblick auf zukünftige Potenziale . . . . .	179

## Anhang

<b>A</b>	<b>Formeln des Dynamic Time Warping mit selektiver Interpolation</b>	<b>181</b>
----------	--	------------

## Verzeichnisse

Literaturverzeichnis	187
Abkürzungsverzeichnis	205
Abbildungsverzeichnis	207
Tabellenverzeichnis	211
Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme	213
Lebenslauf	221