

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 49

Christian Hartl-Nesic

Surface-Based Path Following Control on Freeform 3D Objects

Schriften aus den Instituten für

Automatisierungs- und Regelungstechnik (TU Wien)
Regelungstechnik und Prozessautomatisierung (JKU Linz)

Herausgeber: Andreas Kugi, Kurt Schlacher und
Wolfgang Kemmetmüller

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 49

Christian Hartl-Nesic

**Surface-Based Path Following Control
on Freeform 3D Objects**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Wien, TU, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7637-0

ISSN 1866-2242

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Am 11. März 2020 wurde die weltweite Ausbreitung des Virus SARS-CoV-2 durch die Weltgesundheitsorganisation als Pandemie eingestuft. Folglich wurde ab 16. März 2020 der „Lockdown“ in Österreich mit strikten Ausgangsbeschränkungen und Maßnahmen zur sozialen Distanzierung verordnet, um die Ausbreitung des Virus einzudämmen. Fast zur Gänze wurde die vorliegende Niederschrift in dieser außergewöhnlichen Zeit unter diesen außergewöhnlichen Umständen verfasst.

Im September 2020 wurde diese Niederschrift in einer ähnlichen Form als Dissertation eingereicht und erfolgreich verteidigt. Die theoretische und praktische Grundlage entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) an der Technischen Universität Wien.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Andreas KUGI bedanken. Vielen herzlichen Dank, Andreas, für deinen fachlichen Rat, dein Vertrauen sowie die Möglichkeiten und Freiheiten, die du mir am Institut geboten hast. Speziell danke ich dir für deine Unterstützung auf der „Zielgeraden“ dieser Arbeit. Außerdem bedanke ich mich bei Tamim ASFOUR und Markus VINCZE für die Erstellung der Gutachten. Ich danke Thomas FEIX und Clemens DYCKMANS von adidas AG, die stets mit spannenden Aufgaben und Fragestellungen in der industriellen Robotik aufgewartet haben. Großer Dank gebührt meinem Betreuer Tobias GLÜCK. Danke, Tobias, ich hatte sehr viel Spaß an unserer gemeinsamen Arbeit, den Besprechungen und speziell auch in der gemeinsamen Zeit auf Dienstreisen.

Vielen Dank an alle aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut für den fachlichen Austausch, die produktive Arbeitsatmosphäre und die sportlichen und gemütlichen Aktivitäten außerhalb der Arbeitszeit. Hervorheben möchte ich Stefan FLIXEDER und Bernhard BISCHOF. Gespräche mit euch waren stets eine Inspiration und Bereicherung für mich. Weiters danke ich meinem Bürokollegen Michael SCHWEGEL für die produktiven und ideenreichen, aber auch für die humorvollen und ziellosen Diskussionen.

Ein großer Dank gilt meiner Familie für den Rückhalt und die Möglichkeit, den hinter mir liegenden Weg überhaupt beschreiten zu können. Besonders möchte ich Emina NEŠIĆ danken für die detaillierten Korrekturen an dieser Arbeit. Schließlich danke ich meiner Frau Marinela. Vielen Dank aus tiefstem Herzen für deine großartige, jahrelange Unterstützung, dein Verständnis und deine immerwährende Liebe.

Kurzfassung

Heutige Prozessautomatisierungslösungen beruhen in hohem Maße auf programmierbaren und multifunktionalen Robotern, die die repetitiven und ermüdenden Verarbeitungsschritte in der Massenproduktion für den Menschen zum Teil übernehmen. Viele dieser Prozesse erfordern im Allgemeinen, dass der Roboter ein Werkzeug entlang eines geometrischen Pfades führt, welcher im kartesischen Raum definiert ist. Diese Aufgabe wird in der Regelungstechnik als *Pfadfolgeregelung* bezeichnet und tritt bei Prozessen wie z. B. Fräsen und Schneiden auf.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Entwicklung eines neuen Konzeptes für die oberflächenbezogene Pfadfolgeregelung auf dreidimensionalen Werkstücken. Im Gegensatz zur klassischen Pfadfolgeregelung berücksichtigt das vorgestellte Regelungskonzept systematisch den Oberflächennormalenvektor der zugrundeliegenden dreidimensionalen Freiformoberfläche sowie den Pfadtangentenvektor des oberflächenbezogenen Pfades. Für die Interaktion mit der Oberfläche werden zwei unterschiedliche Koordinatensysteme für den Kontaktpunkt eingeführt, nämlich das *natürliche* und das *parallele* Koordinatensystem. Unter Verwendung einer Koordinatentransformation und einer Zustandsrückführung wird die Dynamik des nichtlinearen Robotersystems bezüglich eines nichtlinearen Pfades in ein System mit linearem Eingangs-/Ausgangsverhalten in den neuen pfadbezogenen Koordinaten transformiert. Diese berücksichtigen die zugrundeliegende dreidimensionale Freiformoberfläche, womit eine Impedanzregelung, Admittanzregelung und Kraftregelung in den neuen Koordinaten formuliert werden kann. Darüber hinaus werden industrielle Prozesse auf dreidimensionalen Freiformoberflächen in Bezug auf kinematische Einschränkungen, d. h. verbotene Werkzeugbewegungen, und kinematische Redundanzen, das sind freie Selbstbewegungen des Werkzeugs, beschrieben.

Das Regelungskonzept wird experimentell anhand eines neuen Ansatzes für das flexible Aufkleben von zugeschnittenen (kurvigen) Klebebändern auf dreidimensionale Freiformoberflächen validiert. Der experimentelle Aufbau für einen Demonstrator geht aus einer ausführlichen Konzeptstudie hervor. Beim Aufklebeprozess wird eine impedanzgeregelt Drapierrolle über das dreidimensionale Objekt geführt, ohne diese um den Oberflächennormalenvektor zu drehen. Dies verhindert die Faltenbildung im aufgeklebten Streifen. Die experimentellen Ergebnisse mit einem KUKA LBR iiwa 14 R820 zeigen die hohe Qualität des vorgestellten Ansatzes.

Die in dieser Arbeit vorgestellte oberflächenbezogene Pfadfolgeregelung ist ein allgemeines und modulares Konzept, mit dem verschiedene industrielle Prozesse

auf dreidimensionalen Freiformoberflächen mit unterschiedlichen kinematischen und dynamischen Eigenschaften beschrieben und ausgeführt werden können, wie z. B. Polieren, Schweißen, Laserschneiden, Nähen und Spritzlackieren.

Today, process automation solutions strongly rely on programmable and multi-functional robotic manipulators to perform repetitive and for the human operator partly tedious processing tasks for large-scale series productions. Many of these processes require the movement of a robot-mounted tool along a given geometric path defined in the Cartesian space. From a control engineering perspective, this task is called *path following control* and emerges in processes such as milling and cutting.

The work at hand is concerned with the development of a novel surface-based path following control concept for the processing of 3D objects. In contrast to classical path following control, the presented control concept systematically takes into account the surface normal vector of an underlying freeform 3D surface and the path tangent vector of the surface-based path. For the interaction with the target 3D object, two distinct coordinate frames are introduced, i. e. the *natural* and the *parallel* contact frame. Using a coordinate transformation and feedback linearization, the nonlinear robotic system dynamics is transformed into a system with linear input/output behavior in new path-based coordinates. The underlying surface is systematically incorporated into this concept, which allows to formulate impedance control, admittance control, and force control in the new coordinates. Moreover, industrial processes on freeform 3D surfaces are described in terms of kinematic constraints, i. e. forbidden tool motions, and kinematic redundancies, i. e. free self-motions of the tool.

The control concept is validated experimentally by a novel approach for the versatile application of (curved) pre-cut adhesive tapes on freeform 3D surfaces. The experimental design of the demonstrator results from a thorough concept study. In this process, an impedance-controlled draping roll traverses the target 3D object without turning around the surface normal vector to prevent wrinkles. Experimental results with a KUKA LBR iiwa 14 R820 demonstrate the high quality of the proposed approach.

Surface-based path following control is a general and modular framework to describe and perform various industrial processes on freeform 3D surfaces with diverse kinematic and dynamic requirements, e. g., polishing, laser cutting, sewing, and spray painting.

Contents

1	Introduction	17
1.1	Industrial Processes on 3D Objects	17
1.2	Handling of Deformable Materials	19
1.3	Aim of this Work	21
1.4	Outline of this Thesis	22
2	Mathematical Model of a 7-Axis Collaborative Robot	25
2.1	Kinematics	25
2.1.1	Homogeneous Transformations	25
2.1.2	Forward Kinematics	26
2.1.3	Manipulator Jacobian	28
2.1.4	Inverse Kinematics	29
2.2	Dynamics	31
2.3	Singular Perturbation Theory	32
3	Surface-Based Path Following Control	35
3.1	Overview	36
3.2	Paths on Surfaces	37
3.2.1	Surfaces	38
3.2.2	Paths	38
3.2.3	Ribbons	39
3.2.4	Paths and Vector Fields on Surfaces	40
3.2.5	Straight Paths: Geodesics	41
3.2.6	Curved Paths	42
	Curved Planar Paths	42
	Curved Paths on Freeform Surfaces	43
3.3	Surface-Based Frames and Coordinate Transformations	44
3.3.1	Natural Contact Frame	45
	Natural Projection Operator	45
	Tangential Subsystem	47
	Transversal Subsystem	47
	Orientation Subsystem	48
	Coordinate Transformation	48
3.3.2	Parallel Contact Frame	49
	Parallel Projection Operator	50
	Tangential Subsystem	51
	Transversal Subsystem	51

Contents

	Orientation Subsystem	52
	Coordinate Transformation	52
3.4	Feedback Linearization	54
3.5	Task Space Controller	55
3.5.1	Impedance Control	55
	Decoupled Error Dynamics	56
	Compliance Control	56
	Path-Dependent Controller Parameters	56
3.5.2	Admittance Control	58
3.5.3	Force Control	59
3.5.4	Hybrid Control Concepts	59
3.6	Hierarchical Nullspace Controller	60
3.6.1	Single-Axis Tool Redundancy	60
3.6.2	Level 1: Joint Limits and Stabilization of the Redundant Axis	62
3.6.3	Level 2: Elbow Stabilization	63
3.7	Path Progress	64
3.7.1	Autonomous Mode	65
3.7.2	Cooperative Mode	65
3.7.3	Cooperative Mode: Gesture Control	67
3.7.4	Collaborative Mode	67
4	Concept Study on Tape Application	69
4.1	Process Analysis	70
4.1.1	Problem Statement	70
4.1.2	Process Steps	70
	Contouring	71
	Application	73
4.1.3	Robot Employment and Kinematics	74
4.2	Concepts	76
4.2.1	Shape-Adaptive Gripper	76
4.2.2	Shape-Adaptive Table	77
4.2.3	Tape Dispenser Tool	77
	Supply at End-Effector	77
	Stationary Supply	77
4.2.4	Stationary Tape Dispenser	78
	Liner	78
	Conveyor Belt	79
4.2.5	Roll-Up Tool	79
4.2.6	Multi-Robot Cell	79

4.2.7	Additive Methods	80
	Unit Patch Application	80
	3D Printing	81
4.3	Evaluation	81
4.4	Discussion	88
4.4.1	Concept Selection	88
4.4.2	Limitations and Remedies	89
5	Application of Curved Tapes on 3D Objects	91
5.1	Experimental Setup	92
5.1.1	Coordinate Frames	92
5.1.2	Tape Application Tool	93
5.1.3	Characteristics	94
5.2	Process Overview	95
5.3	Tape Application Paths	96
5.4	Tape Application Controller	96
5.4.1	External Tool Kinematics	97
5.4.2	Controller Design	98
	Kinematic Constraints	98
	Coordinate Transformation	99
	Single-Axis Tool Redundancy and Feedback Linearization	99
	Task Space Controller	100
	Nullspace Controller	100
5.4.3	Optimal Initial Robot Pose	101
5.5	Implementation	103
5.5.1	Robot Control	103
5.5.2	Discrete Surfaces	104
5.5.3	Optimal Robot/Tool Position	106
	Robot/Tool Kinematics	107
	Optimization Problem	107
	Demonstrator Target 3D Object	108
5.5.4	Discrete Tape Application Paths	112
5.5.5	Discrete Surface-Based Path Following Control	113
	Discrete-time Parallel Contact Frame	113
	Discrete-time Parallel Projection Operator	114
5.5.6	Contact Force Estimation	115
5.6	Experimental Results	115
5.6.1	Straight Tape	117
5.6.2	Curved Tape	120
5.6.3	Discussion	122

Contents

6	Conclusions and Outlook	123
6.1	Conclusions	124
6.2	Outlook	127
A	Parameters	129
A.1	Kinematic Parameters	129
A.2	Controller Parameters	129
	Bibliography	131