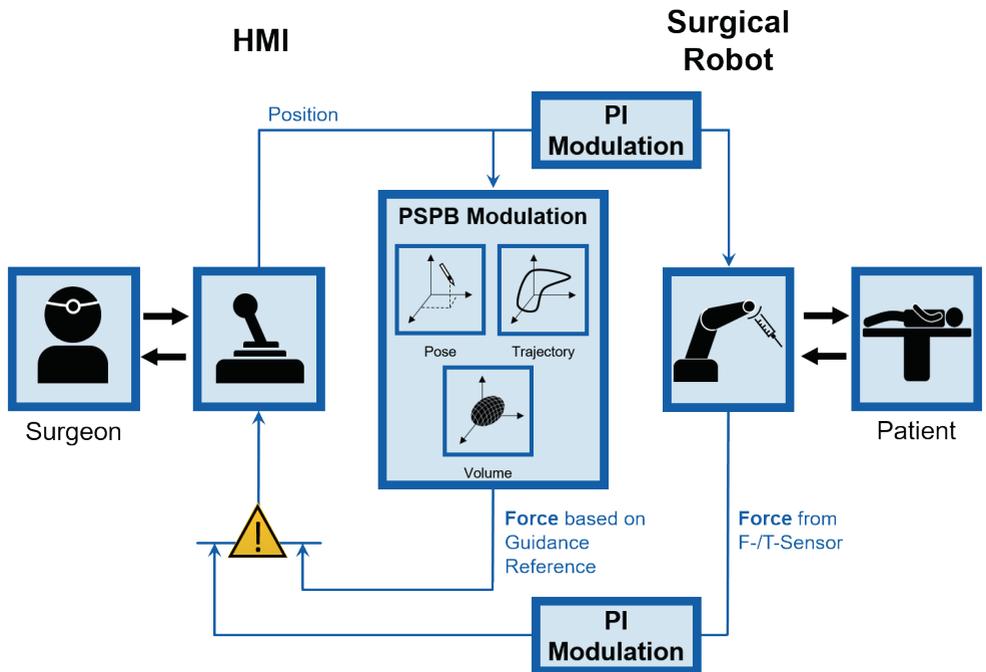


Philipp Schleer

# Model-Based Versatile Configuration of Cooperative Robotic Systems for Surgery



## Aachener Beiträge zur Medizintechnik

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Dr. h. c. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

# **Model-Based Versatile Configuration of Cooperative Robotic Systems for Surgery**

*Modellbasierte vielseitig einsetzbare Konfiguration kooperativer Robotersysteme für die Chirurgie*

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Philipp Jonathan Schleer

Berichter/in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Mai 2021



**Aachener Beiträge zur Medizintechnik**

**66**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Dr. h. c. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

**Philipp Schleer**

---

**Model-Based Versatile Configuration of  
Cooperative Robotic Systems for Surgery**

Ein Beitrag aus dem Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen  
(Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher).

---

**RWTHAACHEN**  
UNIVERSITY

---

Shaker Verlag  
Düren 2021

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-8149-7

ISSN 1866-5349

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

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

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

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen Menschen danken, welche mich auf dem Weg zu meiner Dissertation, während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Helmholtz Institut für Biomedizinische Technik der RWTH Aachen, und darüber hinaus unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher, Leiter des Lehrstuhls für Medizintechnik am Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der RWTH Aachen, für die hervorragende Betreuung und enorme Unterstützung meiner Arbeit. Sein außerordentlicher Ideenreichtum und die zahlreichen konstruktiven fachlichen Diskussionen haben das Gelingen dieser Arbeit überhaupt erst ermöglicht. Ich möchte ihm für die kreativen und unterstützenden Rahmenbedingungen danken, in denen ich mich sowohl fachlich als auch persönlich, am Lehrstuhl, sowie auf zahlreichen internationalen Konferenzen, weiterentwickeln konnte. Außerdem möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch, Leiterin des Instituts für Arbeitswissenschaften der RWTH Aachen, für die Übernahme des Korreferats bedanken.

All meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen, welche über die Zeit am Lehrstuhl zu meinen Freundinnen und Freunden geworden sind möchte ich für ihre stets enorme Hilfsbereitschaft und die harmonische Arbeitsatmosphäre danken, sowie allen beteiligten Studierenden für ihre wertvolle Unterstützung und allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern an den Studien. Besonderer Dank gilt dem "Mechatronik & Robotik" Team, M. Sc. Manuel Vossel, M. Sc. Sergey Drobinsky, Dr.-Ing. Matías de la Fuente, M. Sc. Jan Heibeyn, M. Sc. Lovis Phlippen, M. Sc. Lukas Theisgen, M. Sc. Noah Wickel und Dr.-Ing. Mark Verjans, für den freundschaftlichen Zusammenhalt und die gegenseitige fachliche Unterstützung. Ganz besonders möchte ich dabei M. Sc. Lukas Theisgen für die vielen gemeinsamen Stunden im Büro und die fachlichen Gespräche bedanken, durch die zahlreiche Ideen erst entstanden sind, welche zu dieser Dissertation geführt haben. Außerdem möchte M. Sc. Manuel Vossel, Dr.-Ing. Mark Verjans und M. Sc. Sergey Drobinsky für die stets tatkräftige fachliche Unterstützung und M. A. Sabine Stockschläder-Krüger für ihre Hilfsbereitschaft und kontinuierliche Unterstützung im Hintergrund danken.

Weiterhin möchte ich mich bei allen klinischen Partnern der Uniklinik der RWTH Aachen bedanken, die Einblicke in zahlreiche Operationen ermöglicht haben und ihre umfangreichen Darlegungen des medizinischen Hintergrunds.

Zutiefst dankbar bin ich Uwe, da er mir stets den Rücken freigehalten hat und dessen enorme persönliche Unterstützung mich erst zu dem Menschen gemacht hat, der ich heute bin. Meinen herzlichsten Dank! Außerdem möchte ich allen meinen Freunden danken, die immer für mich da sind und stets ein offenes Ohr haben und die zahlreichen traumhaften gemeinsamen Erlebnisse, ihr seid die Besten! Ganz herzlich möchte ich auch meiner Schwester Viola danken, die schon immer eine Freundin für mich war. Zu guter Letzt möchte ich den Menschen danken, die durch ihre vielseitige Unterstützung über mein gesamtes Leben all dies erst ermöglicht haben: meinen Eltern Eberhard und Anneliese. Euch möchte ich diese Arbeit widmen!

## **Abstract**

Machines are characterized by geometric accuracy, able to fuse information from multiple sensors, untiring and immune to radiation and infection. Humans are proficient at interpreting complex information and qualitative data even against high background noise levels. Since these skills are highly complementary, several cooperative strategies are used in surgical robotics to improve the surgical outcome. However, technical realizations vary immensely throughout application fields, and there seems to be no consensus about which realization performs best for a given clinical scenario. The plurality of surgical robots in combination with their narrow application fields influences cost as well as usability negatively and hence prevents their widespread adoption. To be able to assist the surgeon during an intervention by the best possible means, modular system design seems to be crucial.

Therefore, surgical robotics is analyzed from a human factors perspective to abstract systems and assistance functions as a basis for a modular architecture in the operating room. Subsequently, user studies are conducted with respect to the basic haptic guidance functions in simulation environments and a conceptual haptic feedback controller for orthopedics and neurosurgery is presented. Consecutively, several strategies to combine artificially generated haptic guidance forces and feedback from the remote environment while avoiding overlapping or masking of forces are investigated. Finally, an exemplary cooperative robotic system for surgery is built to validate the research results.

Abstracted surgical tasks were performed with an increased effectiveness compared to the manual execution and with similar efficiency. User satisfaction was improved and participants preferred using the cooperative robotic system. The validation study thus confirms findings from the studies in simulation environments. The overall insights are then jointly reflected upon to provide recommendations for a versatile configuration of cooperative robotic systems for surgery. The presented generic robotic device profiles, in combination with the abstracted modular assistance functions and their recommendations for use, can foster integration of surgical robots into an open and modular “plug and play” dynamic network of medical devices and IT systems in the operating room. This will enable surgical robots to become more versatile, provide a better benefit-to-cost ratio and increase market penetration. At the same time, usability for the surgeon and ultimately patient care can be enhanced.



## Zusammenfassung

Maschinen zeichnen sich durch geometrische Genauigkeit aus, können Informationen von mehreren Sensoren zusammenführen, sind unermüdlich und immun gegen Strahlung und Infektionen. Der Mensch ist geschickt darin, komplexe Informationen und qualitative Daten auch bei hohem Hintergrundrauschen zu interpretieren. Da diese Fähigkeiten hochgradig komplex sind, werden in der Chirurgierobotik mehrere kooperative Strategien eingesetzt, um das Operationsergebnis zu verbessern. Technischen Realisierungen in den Anwendungsbereichen unterscheiden sich allerdings immens, und es scheint keinen Konsens darüber zu geben, welche Realisierung für ein gegebenes klinisches Szenario am besten geeignet ist. Die Vielzahl an Chirurgierobotern und deren enge Anwendungsbereiche wirken sich negativ auf Kosten und Benutzerfreundlichkeit aus und verhindert deren breite Anwendung. Um Chirurgen bei einem Eingriff bestmöglich zu unterstützen scheint ein modulares Systemdesign entscheidend zu sein.

Daher wird die Chirurgierobotik unter Berücksichtigung menschlicher Faktoren analysiert, um Systeme und Assistenzfunktionen zu abstrahieren und die Basis für eine modulare Architektur im Operationssaal zu schaffen. Anschließend werden Anwenderstudien zu grundlegenden haptischen Führungen in Simulationsumgebungen durchgeführt und ein Konzept eines haptischen Feedback Reglers für die Orthopädie und Neurochirurgie vorgestellt. Mehrere Strategien der Kombination von künstlich erzeugten haptischen Führungskräften und Feedback aus der entfernten Umgebung bei Vermeidung von Überlagerung oder Auslöschung von Kräften, werden darauffolgend untersucht. Abschließend wird ein beispielhaftes kooperatives Robotiksystem (KRS) für die Chirurgie aufgebaut um die Forschungsergebnisse zu validieren.

Die abstrahierten chirurgischen Aufgaben wurden mit einer erhöhten Effektivität im Vergleich zur manuellen Durchführung und mit ähnlicher Effizienz durchgeführt. Die Benutzerzufriedenheit wurde verbessert und die Teilnehmer bevorzugten das KRS. Die Validierungsstudie bestätigt damit Erkenntnisse aus den Studien in Simulationsumgebungen. Die gesamten Erkenntnisse werden im Anschluss gemeinsam reflektiert, um Empfehlungen für eine vielseitig einsetzbare Konfiguration von KRS für die Chirurgie zu geben. Die vorgestellten generischen Roboter-Geräteprofile können, mit den abstrahierten modularen Assistenzfunktionen und deren Einsatzempfehlungen, die Integration von Chirurgierobotern in ein offenes, dynamisches und modulares "plug and play" Netzwerk von Medizingeräten und IT-Systemen im Operationssaal fördern. Damit wird Chirurgierobotern eine vielseitigere Einsetzbarkeit, ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis und einer stärkeren Marktverbreitung ermöglicht. Gleichzeitig kann die Benutzerfreundlichkeit für den Chirurgen und letztendlich die Patientenversorgung verbessert werden.



# Table of Contents

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>2. State of the Art in Cooperative Surgical Robotic Systems.....</b>	<b>5</b>
2.1 Cooperation and Ergonomics	5
2.2 Communication Channels	6
2.2.1 Communication Channels in Surgical Robotics	7
2.2.2 Haptic Interfaces	8
2.3 Classification of Surgical Tasks	8
2.4 Surgical Robotic Systems	9
2.4.1 Classification	10
2.4.2 Cooperative Systems	11
2.5 Towards Versatile Cooperative Surgical Robotics	19
<b>3. Conceptual Design.....</b>	<b>27</b>
3.1 Experimental Platform Design	30
<b>4. Haptic Guidance.....</b>	<b>35</b>
4.1 Pose and Trajectory	36
4.1.1 Material and Methods	37
4.1.2 Results	44
4.1.3 Discussion and Conclusion	48
4.2 Trajectory and Velocity	51
4.2.1 Material and Methods	52
4.2.2 Results	55
4.2.3 Discussion and Conclusion	57
4.3 Volumetric Constraints	59
4.3.1 Material and Methods	60
4.3.2 Results	64
4.3.3 Discussion and Conclusion	68
<b>5. Haptic Tool Feedback .....</b>	<b>71</b>
5.1 Conceptual Controller Design	73
5.2 Experimental Setup	76
5.3 Results	77
5.4 Discussion and Conclusion	80
<b>6. Combination of Haptic Information .....</b>	<b>81</b>
6.1 Preliminary Studies	82
6.2 Main Experiments	88
6.2.1 Results	97
6.3 Discussion and Conclusion	102
<b>7. Validation of Overall System on Sample Applications .....</b>	<b>107</b>
7.1 Material and Methods	108
7.2 Results	116

7.3 Discussion and Conclusion	120
<b>8. General Discussion</b> .....	<b>127</b>
<b>9. Outlook</b> .....	<b>137</b>
<b>References</b> .....	<b>I</b>
<b>List of Figures</b> .....	<b>XIX</b>
<b>List of Tables</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>Appendix</b> .....	<b>XXV</b>
Appendix I. Pose and Trajectory	XXV
Appendix II. Trajectory and Velocity	XXVI
Appendix III. Volumetric Constraints	XXVII
Appendix IV. Combination of Haptic Information	XXVIII
Appendix V. Validation of Overall System on Sample Application	XXXI