

**Modellgestützte Analyse und Implementierung der
roboterbasierten Echtzeitnachführung chirurgischer
Instrumente**

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
der Universität Siegen
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Hans-Christian Schneider

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld
Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Rainer Brück

Tag der mündlichen Prüfung: 2. November 2010

ZESS-Forschungsberichte

Nr. 28

Hans-Christian Schneider

Modellgestützte Analyse und Implementierung der roboterbasierten Echtzeitnachführung chirurgischer Instrumente

*Model-aided analysis and implementation of
robot-based real time surgical instrument tracking*

Universität Siegen
Zentrum für Sensorsysteme
Paul-Bonatz-Straße 9-11
57068 Siegen
Tel.: 0271 / 740-3323
Fax: 0271 / 740-2336
e-mail: gs@zess.uni-siegen.de
Internet: <http://www.zess.uni-siegen.de/>

Siegen 2010

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.: Siegen, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9707-7

ISSN 1433-156X

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

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT	i
KURZFASSUNG	iii
KOORDINATENSYSTEME	v
1 EINLEITUNG	1
2 CHIRURGIEASSISTENZSYSTEME	3
2.1 Überblick	3
2.2 modiCAS als navigiertes mechatronisches Chirurgieassistentensystem	5
3 DIE NACHFÜHRUNG CHIRURGISCHER INSTRUMENTE IN ECHTZEIT	9
3.1 Motivation	9
3.2 Stand der Technik der modiCAS-Instrumentennachführung	10
3.3 Zielsetzung dieser Arbeit	13
3.4 Entwicklung eines neuen Nachführprinzips	14
3.4.1 Aus der Literatur bekannte Methoden zur visuellen Roboterführung	14
3.4.2 Auswahl einer zielführenden Strategie	25
3.4.3 Ansatz und Herleitung des neuen Nachführprinzips	26
4 RAPID CONTROL PROTOTYPING ZUR ANALYSE UND OPTIMIERUNG DER INSTRUMENTENNACHFÜHRUNG	35
4.1 Rapid Control Prototyping im Überblick	35
4.2 Entwurf einer neuen Echtzeitplattform mit NI-LabVIEW	40
4.3 Konzeption und Implementierung der Treiber- & Ressourcenschicht	43
4.4 Laufzeitanalyse der entworfenen Echtzeitplattform . . .	49
4.5 Hilfsmittel für die Dynamikanalyse der Instrumentennachführung	50
4.5.1 Echtzeit-Datenlogger	52
4.5.2 Motorbetriebene Schwenkvorrichtung für reproduzierbare Bewegungen eines Knochenmodells . .	56
4.5.3 Simulator für das 3D-Lokalisiergerät	58

5	MODELLGESTÜTZTE ANALYSE UND OPTIMIERUNG DER INSTRUMENTENNACHFÜHRUNG	61
5.1	Gemessene Eigenschaften der Instrumentennachführung vor der Optimierung	61
5.2	Entwurf eines dynamischen Modells der Instrumentennachführung	67
5.3	Modellbildung des Roboterarms und Parameteridentifikation	69
5.3.1	Kinematikmodell	70
5.3.2	Gelenkmodell	71
5.4	Modellierung des optischen 3D-Lokalisiergeräts	83
5.4.1	Zeitverhalten	85
5.4.2	3D-Poserausachen	87
5.4.3	Vereinfachung der Modellierung	88
5.5	Verifikation des Modellverhaltens	89
5.6	Verschiedene Strategien zur Lageregelung des Roboters bei der Instrumentennachführung	91
5.6.1	Lageregelstrategien im Überblick	93
5.6.2	Untersuchte Lageregelstrategien	95
5.7	Auswahl einer Regelstrategie	112
5.8	Untersuchung von Einflüssen des Lokalisiergeräts auf das Nachführverhalten des Roboters	112
5.8.1	Messrauschen	114
5.8.2	Abweichungen im Kinematikmodell oder in der Roboter-Lokalisiergerät-Kalibrierung	115
5.8.3	Latenz	121
5.8.4	Abtastrate	121
5.8.5	Schlussfolgerungen	124
6	ÜBERTRAGUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE AUF DAS REALE SYSTEM	127
6.1	Vergleich der untersuchten Lageregelstrategien am Real-system mit Hilfe des Lokalisiergerätesimulators	127
6.2	Reduktion des Lokalisiergerätemessrauschens mittels Überarbeitung der Referenzgebergeometrien	128
6.3	Gesamtergebnis der Dynamikuntersuchungen am realen System	146
7	MULTISENSORIK- UND REDUNDANZASPEKTE	149
7.1	Multisensorik für die Erhöhung der Verfügbarkeit	149
7.1.1	Messlückenprädiktion mit Hilfe von Stützsensoren	150

7.1.2	Mehrere optische Lokalisiergeräte zur Erhöhung der Verfügbarkeit	166
7.2	Multisensorik für die Erhöhung der Sicherheit	166
7.2.1	Homogene Sensorredundanz	168
7.2.2	Diversitäre Sensorredundanz	171
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	175
A	3D-LOKALISIERUNG UND NAVIGATION DES CHIRURGIEASSIS- TENZSYSTEMS	177
A.1	Pose und Transformation	177
A.2	Rotation mit Quaternionen	178
A.3	räumliche Kalibrierung zwischen Roboter und Lokalisier- gerät	180
A.4	Tool Geometry Constraints	181
A.5	Referenzgeberübersicht	183
B	LINEARES KALMAN-FILTER	185
C	MHI PA10-6C	187
C.1	Antriebsparameter der Robotergelenke des MHI PA10-6C	187
C.2	Steuerungs-/Regelungsschichten des MHI PA10-6C . . .	187
D	NEUE INSTRUMENTENNACHFÜHRUNG BEI VERSCHIEDENEN DREHZAHLEN DER SCHWENKVORRICHTUNG	189
D.1	Berechnung der Maximaldrehzahl der Schwenkvorrichtung	189
D.2	Messkurven	190
	Notationen	197
	Symbolverzeichnis	199
	Abkürzungsverzeichnis	205
	Literaturverzeichnis	207
	Index	221
	Danksagung	223

Model-aided analysis and implementation of robot-based real time surgical instrument tracking

The medical progress and the utilization of new technologies on the basis of computer-aided procedures, as well as novel sensor components and innovative mechatronical systems will more and more enhance or replace conventional surgical techniques. At the University of Siegen (Germany), the robot-based surgical assistance system modiCAS (modular interactive Computer Assisted Surgery) is developed with the objective to optimally support surgeons in surgical interventions. One key feature of the modiCAS system is to accurately and precisely place any surgical instrument using a robot arm that is guided by a 3D localizer according to the pre-operative planning. During the surgical intervention, it is a challenging task to perform an online instrument tracking in order to always keep a desired constant spatial relation between the surgical instrument and the patient's anatomy, if the patient moves. For the first time, this thesis deals with the dynamical analysis and optimization of the robot-based modiCAS instrument tracking. For this purpose, the primary tracking principle is revised at such a rate that the dynamical behavior of the whole system becomes reproducible and analyzable. Furthermore, a novel dynamical model is derived from the real system in order to perform reproducible offline *Model in the Loop* simulations including scenarios that cannot be realized with the real system (, yet). On the foundation of the model-based experiments, detail enhancements are worked out and further verified with the real system by means of a specially designed *Rapid Control Prototyping* platform. Altogether, the approaches developed in this thesis lead to a significant reduction of the system's dynamic pose error without degrading its stationary precision or accuracy. Finally, some aspects concerning multisensorics and redundancy concepts that may contribute to an increased safety of the modiCAS instrument tracking in the future are discussed.

KURZFASSUNG

Sowohl der medizinische Fortschritt als auch neue computergestützte Methoden, neuartige Sensortechnik und innovative mechatronische Systeme verbessern zunehmend konventionelle chirurgische Verfahren. An der Universität Siegen wird das roboterbasierte Chirurgieassistenzsystem modiCAS (modular interactive Computer Assisted Surgery) entwickelt, mit dem Ziel, Mediziner bei chirurgischen Eingriffen bestmöglich zu unterstützen. Eine Schlüsseleigenschaft des modiCAS-Systems liegt in der präzisen intraoperativen Platzierung und Führung manuell zu bedienender chirurgischer Instrumente mittels eines Roboterarms, welcher über ein optisches 3D-Lokalisiergerät entsprechend einer bildbasierten, präoperativ durchgeführten Planung navigiert wird. Während eines chirurgischen Eingriffs besteht eine besondere Herausforderung darin, mit einer Echtzeitnachführung die geplante räumliche Relation zwischen dem Operations situs und dem chirurgischen Instrument aufrechtzuerhalten, wenn sich der Patient bewegt. In der vorliegenden Arbeit wird die roboterbasierte Instrumentennachführung des modiCAS-Systems erstmals dynamisch analysiert und in ihren Eigenschaften optimiert. Hierfür wird das bestehende Nachführprinzip derart modifiziert, dass es dynamisch modellierbar wird und somit eine modellgestützte Analyse gestattet. Basierend auf dem modifizierten Nachführprinzip wird ein neuartiges dynamisches Simulationsmodell der Instrumentennachführung entwickelt, welches *Model in the Loop*-Simulationen ermöglicht - inklusive Simulationen von Szenarien, die sich mit dem realen System (noch) nicht realisieren lassen. Auf der Basis des neuen Simulationsmodells werden Detaillösungen einschließlich eines neuartigen Regelungskonzepts erarbeitet, welche insgesamt eine signifikante Verbesserung der Instrumentennachführung bewirken. Alle modellbasierten Ergebnisse werden am realen System mit Hilfe einer neu entwickelten *Rapid Control Prototyping*-Plattform verifiziert und zur Anwendung gebracht. Abschließend werden ausblicksweise einige Multisensorik- und Redundanzkonzepte präsentiert und diskutiert, welche zukünftig gegebenenfalls die Sicherheit und Verfügbarkeit der Instrumentennachführung verbessern können.

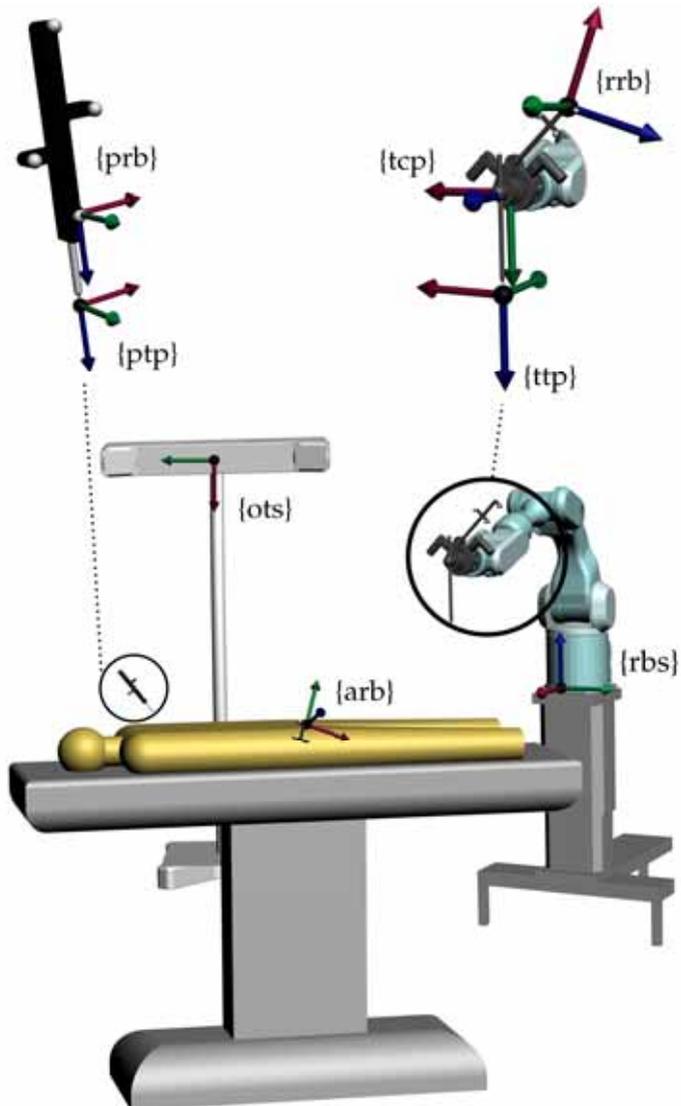


Abbildung 1: Koordinatensysteme

VERZEICHNIS DER KOORDINATENSYSTEME

Bezeichner	Koordinatensystem (KS)
<i>arb</i>	<u>a</u> im <u>r</u> eference <u>b</u> ase <i>körperfestes KS des Patientenreferenzgebers</i>
<i>ins</i>	<u>i</u> nerthal <u>s</u> ensor <i>körperfestes KS des Inertialsensors</i>
<i>ots</i>	<u>o</u> ptical <u>t</u> racking <u>s</u> ystem <i>Basis-KS des optischen Lokalisiergeräts</i>
<i>prb</i>	<u>p</u> robe <u>r</u> eference <u>b</u> ase <i>körperfestes KS des Sondenreferenzgebers</i>
<i>ptp</i>	<u>p</u> robe <u>t</u> ip <i>körperfestes KS der Sondenspitze (Sonde: Zeigeinstrument / Pointer)</i>
<i>rbs</i>	<u>r</u> obot <u>b</u> ase <i>Roboterbasis-KS im Robotersockel</i>
<i>rrb</i>	<u>r</u> obot <u>r</u> eference <u>b</u> ase <i>körperfestes KS des Roboterreferenzgebers</i>
<i>tcp</i>	<u>t</u> ool <u>c</u> enter <u>p</u> oint <i>körperfestes KS im Roboterflansch Bezugs-KS für montierte Instrumente</i>
<i>ttp</i>	<u>t</u> ool <u>t</u> ip <i>körperfestes KS in der Instrumentenspitze</i>

Tabelle 1: Koordinatensysteme



Abbildung 2: Robotergelenke (MHI PA10-6C)