

**Entwicklung eines Kompaktroboters für die
bildgeführte orthopädische Chirurgie**

Development of a Compact Robot
for Image Guided Orthopaedic Surgery

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

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Guido Brandt
aus Würselen

Berichter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Günter Rau
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jörg Feldhusen

Tag der mündlichen Prüfung: 16. September 2003

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Guido Brandt

**Entwicklung eines Kompaktroboters
für die bildgeführte orthopädische Chirurgie**



Helmholtz-Institut
für Biomedizinische Technik
an der RWTH Aachen

Shaker Verlag
D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2003

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2060-7

ISSN 1430-7316

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Der Einsatz von Robotern in der Chirurgie erscheint aus medizinischer Sicht attraktiv zu sein. In dieser Arbeit wurde der Fragestellung nachgegangen, ob und mit welchen Vorteilen parallele Roboter-Kinematiken zur intraoperativen Unterstützung des orthopädischen Chirurgen eingesetzt werden können.

Basierend auf einer detaillierten Prozeßanalyse wurde in Zusammenarbeit mit medizinischen Experten eine Liste von solchen orthopädischen Eingriffen erarbeitet, bei denen der Einsatz eines Chirurgierobotersystems signifikante Vorteile verspricht. Eine nachfolgende Klassifizierung der Eingriffe nach Art der mechanischen Bearbeitung und eine genaue Tätigkeitssequenzanalyse ermöglichte das Erstellen von Operationsszenarien mit Einsatz einer robotischen Hilfe.

Basis bei der Entwicklung der Operationsszenarien war hierbei die Strategie, daß der Aktionsraum des Roboters nicht das gesamte Operationsfeld abdecken muß, sondern nur innerhalb eines kleinen, begrenzten Arbeitsraumes zur exakten Positionierung benötigt wird.

Mit Hilfe der Tätigkeitssequenzanalyse konnten die Abläufe auf Elementarfunktionen, die von dem Chirurgierobotersystem geleistet werden müssen, reduziert werden. Die Gesamtheit der Elementarfunktionen bildet die *Funktionspezifikation* des CRIGOS¹ Systems. Basierend auf der Definition der zu erfüllenden, einzelnen Elementarfunktionen wurde die *Systemarchitektur* entwickelt. Es wurde aufgezeigt, wie die einzelnen Komponenten des Chirurgierobotersystems mechanisch, elektrisch sowie informationstechnisch interagieren (Schnittstellendefinition).

Die Funktionspezifikation und die Systemarchitektur wurden verwendet, um die *Anforderungen* für jede Komponente des CRIGOS Systems zu entwickeln, und damit die Grundlage für die konzeptionelle als auch für die nachfolgende detaillierte Entwicklung zu schaffen.

Die Ergebnisse flossen in die konzeptionelle Entwicklung des Chirurgierobotersystems ein. Die Eigenschaften unterschiedlicher Kinematiken wurden beschrieben und ihre Eignung für den medizinischen Einsatz diskutiert. Hierbei stellte sich heraus, daß Strukturen mit paralleler Kinematik gegenüber ihren seriell aufgebauten 'Artgenossen' einige Vorteile bei der medizinischen Anwendung haben. Neben einem intrinsischen Sicherheitsverhalten kann die Parallel-Mechanik aufgrund ihres hohen Last-/Eigengewichtsverhältnisses leichtgewichtig aufgebaut werden. Weitere Vorteile bieten sich durch eine kompakte und technisch modulare Bauweise.

¹Compact Robot for Images Guided Surgery

Die Überlegungen und Ergebnisse führten zur Auswahl der aus dem Bereich der Simulatortechnik bekannten, sogenannten Stewart-Gough-Plattform als Basis der weiteren Arbeiten. Mit Hilfe eines hierzu entwickelten CAD-basierten Simulationswerkzeuges wurden unterschiedliche Designvarianten in Hinblick auf den medizinischen Einsatzfall untersucht. Dabei wurden die kinematischen Parameter der Mechanik bestimmt, die sowohl die Gestalt wie auch die mechanischen Eigenschaften der Feinpositioniereinheit festlegen. Mit Festlegung der kinematischen Parameter konnten weitere Anforderungen an Sub-Komponenten, wie z.B. die notwendige Positioniergenauigkeit der elektro-mechanischen Antriebe, aufgestellt werden.

Nach der konzeptionellen Erarbeitung der Grundgeometrie des Roboters wurden Komponenten wie Antriebe und Anschlußplatten weiter detailliert. Ein primäres Ziel bei der *Konstruktionentwicklungsphase* war die Verwendung von möglichst vielen OEM-Komponenten, um Entwicklungsrisiko und Bauteilkosten gering zu halten sowie die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen.

Bei der Festlegung der mechanischen Schnittstellen des Roboters mit seiner Umgebung wurden insbesondere die Randbedingungen aufgrund des medizinischen Einsatzfeldes berücksichtigt. Dazu gehörte die Realisierung eines steril bedienbaren Werkzeugwechselsystem, welches das reproduzierbare An- und Abkoppeln orthopädischer Werkzeuge ermöglicht.

Auf Basis einer Risikoanalyse wurde ein unabhängig arbeitendes, mikroprozessorgesteuertes Sicherheitssystem aufgebaut, das die wichtigsten Statusgrößen des Roboters wie Encoderwerte, Motorströme und -spannungen, Kräfte und Momente am Werkzeug überwacht.

Die Evaluierung des Robotersystems im Labormodell schließt die Arbeit ab.

Acknowledgements

The work described in this thesis was performed within my employment as research assistant at the Helmholtz-Institute for Biomedical Engineering.

I wish to thank my advisor, Professor Dr.rer.nat Günter Rau, for years of invaluable guidance, support and encouragement during the course of this thesis. I would like to extend my gratitude to Professor Dr.-Ing. Jörg Feldhusen for the supervision of my work and for his important input into this work.

Thanks to Prof. Dr. Hans-Walter Staudte, Head of the Orthopaedic Department, District Hospital Marienhöhe, for bringing new ideas to the table and for his patience in sharing his invaluable medical expertise with us engineers and providing so much input to this research.

Special thanks are also extended to my fellow colleagues and friends Dipl.-Ing. Andreas Zimolong, Dr.-Ing Ralf Schmidt, Dr.-Ing. Stephan Erbse, and especially to Dr.-Ing Klaus Radermacher for introducing me to the fascinating world of Computer Assisted Surgery.

I greatly appreciate the efforts and support of Dipl.-Ing. Matias de la Fuente, Dipl.-Ing. Pierre Bast and Dipl.-Ing Erik Schkommodau within the experiments of my research.

I would like to thank Richard Blinks and Ben Bergo for proof-reading the manuscript.

I would like to thank Professor Dr. Jean-Pierre Merlet for the fruitful discussions on parallel robots whenever we had the chance to meet.

The financial support of the Friedrich-Flick-Förderungsstiftung and the European Commission DGXII under contract BMH4-CT97-2427 is gratefully acknowledged.

Most of all, I wish to express my sincere appreciation to my parents for their support and encouragement throughout my studies and for making me the person who I am now.

Contents

1	Introduction	1
2	Background	2
2.1	Robot assisted surgery	2
2.1.1	Semi-active systems	2
2.1.2	Passive robots with variable impedance	3
2.1.3	Active systems	3
2.1.4	Other robotic systems for surgery	3
3	Discussion on medical robot systems	5
3.1	Current situation: drawbacks of existing medical robots	5
3.2	Motivation for a new development	8
3.3	Hypotheses	8
3.4	Analysis of medical interventions	9
4	Conceptual design	14
4.1	Detailed analysis of two exemplary interventions	14
4.1.1	Linear trajectory type interventions	14
4.1.2	Milling type intervention	19
4.2	Discussion of additional constraints	23
4.2.1	Safety in medical robotics	23
4.2.2	Payload	25
4.2.3	Machining process parameters	26
4.2.4	Size	27

4.2.5	Environmental conditions	27
4.2.6	Materials	27
4.3	Architecture of the CRIGOS robot system	29
5	Analysis of suitable mechanisms	31
5.1	Serial and parallel mechanisms	31
5.1.1	Serial mechanisms	31
5.1.2	Parallel mechanisms	33
5.2	Comparison and assessment	36
6	Modeling and design of the robot	40
6.1	Kinematic modeling of parallel robots	40
6.1.1	The inverse kinematic problem	40
6.1.2	Forward kinematics	43
6.1.3	Differential relationships	45
6.1.4	Determination of forces	47
6.2	Kinematic design of the compact robot	49
6.2.1	Objectives and problems of the kinematic design	49
6.2.2	Methods	54
6.2.3	Configuration of a single leg	69
6.2.4	Required accuracy for actuator attachment points	72
6.2.5	Summary of the kinematic design	73
6.3	Concepts for the coarse positioning	73
6.3.1	Attaching the robot onto the OR-rail	74
6.3.2	Using a gantry-type design integrated into the anesthetic barrier	76
6.3.3	Using a mobile cart for coarse positioning	76
6.4	Mechanical adapters	77
7	Mechanical design of the robot	79
7.1	Design of the drive chain of the parallel manipulator	80
7.1.1	Selection of suitable drives	80
7.1.2	Detailed design of the linear actuator	83

7.1.3	Mechanical design of platform joints	86
7.2	Detailing the force/torque sensor	88
7.3	Design of the endplates of the parallel robot	89
7.4	Design of the tool adapter system	90
7.5	Mobile cart for robot pre-positioning	94
7.6	Bone fixation device	95
7.7	Bone motion monitor	96
7.8	Sterile drape and draping concept	97
7.9	Tool calibration device	98
8	Control of the robot system	99
8.1	Robot control concept	99
8.1.1	Trajectory generation	102
8.1.2	Generation of a general linear trajectory	102
8.1.3	Trajectory checking	104
8.1.4	Modes for Trajectory control	105
8.1.5	Physical Robot controller hardware	107
8.2	Risk Analysis and System Safety Concept	108
8.2.1	Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	112
8.2.2	Low-level safety hardware	113
9	Evaluation	115
9.1	Technical assessment of the robot	115
9.1.1	Test environment	116
9.1.2	Assessed characteristics	116
9.2	Evaluation of the tool adapter design	119
9.2.1	Test procedure	120
9.2.2	Results of tool adapter evaluation	120
9.3	Integration into the operating room	121
9.4	Summary of evaluation	124
10	Discussion and Conclusion	126

A Appendix	129
A.1 Abbreviations	129
A.2 Definitions	130
A.3 Kinematics and statics of serial and parallel manipulators	132
A.4 Results of 'pseudo' calibration	133
A.5 Requirements	133