

Robotische Systeme und Regelungsstrategien für die Radiotherapie bewegter Tumore

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

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Henry Arenbeck

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves

Tag der mündlichen Prüfung: 8. Januar 2015

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek
online verfügbar.

Berichte aus der Medizintechnik

Henry Arenbeck

**Robotische Systeme und Regelungsstrategien
für die Radiotherapie bewegter Tumore**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3753-1

ISSN 1431-1836

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

Danksagung

Hiermit bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen und den Partnern des in dieser Arbeit beschriebenen Projekts, insbesondere Herrn Prof. Dr. Michael J. Eble⁽¹⁾, Herrn Dr. Uwe Heinrichs⁽²⁾ und Herrn Dr. Richard Holy⁽³⁾ für deren konzeptionelle Vorbereitung und Ratschläge zur Konkretisierung des in dieser Arbeit beschriebenen „RT-Targets“, Herrn Dr. Oliver Winz⁽⁴⁾, Frau Carolin Schubert⁽⁵⁾ und Frau Nuria Escobar Corral⁽⁶⁾ für die Durchführung und Auswertung der Bildgebungs- und Bestrahlungsversuche mit dem in dieser Arbeit beschriebenen „4D-Phantom“, Herrn Kai Bollue⁽⁷⁾ für dessen Ratschläge zur Leistungs- und Steuerungselektronik sowie die Umsetzung des Softwareframeworks für die Steuerung des „4D-Phantoms“ und Frau Sylvie von Werder⁽⁸⁾ für die Hilfe bei der Aufzeichnung der in dieser Arbeit verwandten respiratorischen Bewegungsmuster. Desweiteren danke ich herzlich den zahlreichen studentischen Mitarbeitern, die an dieser Arbeit mitgewirkt haben, insbesondere (in alphabetischer Reihenfolge) Herren Manuel Fechter, Jonas Gesenhues, David Kügler, Berkay Özer und Lutz Wittschier. Allen o.g. Personen sowie Frau Prof. Dr. Catherine Disselhorst-Klug⁽⁹⁾ danke ich für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Herrn Prof. Dr. Fridtjof Nüsslin⁽¹⁰⁾ danke ich für seine anspornende Rückmeldung während der Entwicklung und seine Anregungen zu angrenzenden Einsatzpotentialen des 4D-Phantoms. Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer dieser Arbeit, Herrn Prof. Dr. Dirk Abel⁽¹¹⁾, der diese Arbeit ermöglichte und durch stets offen und freundlichen Umgang, schnelle Unterstützung, wenn nötig, und hohen ermöglichten Handlungsspielraum besonders motivierende und leistungsfördernde Arbeitsbedingungen schuf. Der KUKA Laboratories GmbH⁽¹²⁾ danke ich für die Unterstützung des in dieser Arbeit beschriebenen Projekts.

⁽¹⁾ Klinik für Radioonkologie und Strahlentherapie, Uniklinik RWTH Aachen

⁽²⁾ Klinik für Radioonkologie und Strahlentherapie, Uniklinik RWTH Aachen

⁽³⁾ Klinik für Radioonkologie und Strahlentherapie, Uniklinik RWTH Aachen

⁽⁴⁾ Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen

⁽⁵⁾ Klinik für Radioonkologie und Strahlentherapie, Uniklinik RWTH Aachen

⁽⁶⁾ Klinik für Radioonkologie und Strahlentherapie, Uniklinik RWTH Aachen

⁽⁷⁾ Institut für Regelungstechnik, RWTH-Aachen

⁽⁸⁾ Abteilung Rehabilitations- und Präventionstechnik, Institut für Angewandte Medizintechnik, RWTH-Aachen

⁽⁹⁾ Abteilung Rehabilitations- und Präventionstechnik, Institut für Angewandte Medizintechnik, RWTH-Aachen

⁽¹⁰⁾ Klinik für Strahlentherapie und Radiologische Onkologie, Klinikum rechts der Isar, Technische Universität München

⁽¹¹⁾ Institut für Regelungstechnik, RWTH-Aachen

⁽¹²⁾ Augsburg, Deutschland

für Susanne

Inhalt

Abkürzungen.....	VII
Notation.....	X
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in die Radiotherapie.....	1
1.2 Radiotherapie bewegter Tumoren	7
1.2.1 Bewegungshemmung durch Arretierung	8
1.2.2 Bewegungshemmung durch Atemkontrolle	9
1.2.3 Bewegungskompensation durch Gating	9
1.2.4 Bewegungskompensation durch Tracking	12
1.3 Eigenschaften respirationsbedingter Bewegungen	20
1.4 Ziel der Arbeit	22
1.5 Innovationen.....	26
2 Robotisches Phantom zur Validierung der Bildgebung und Radiotherapie bewegter Gewebestrukturen	29
2.1 Einführung	29
2.2 Aufbau des 4D-Phantoms.....	39
2.2.1 Body.....	40
2.2.2 Target.....	41
2.2.3 Roboter	45
2.2.4 Hubeinheit	47
2.2.5 Nutzerinterface.....	48
2.2.6 Steuerung	51
2.3 Algorithmik zur Steuerung und Regelung des Roboters	54
2.3.1 Kinematik.....	55
2.3.2 Koordinatensysteme und Notation	57
2.3.3 Koordinatentransformation	59
2.3.4 Kollisionserkennung	65
2.3.5 Trajektoriengenerierung.....	67
2.3.6 Kalibrierung	69
2.4 Erprobung des 4D-Phantoms	71

2.4.1	Positioniergenauigkeit.....	72
2.4.2	Klinischer Einsatz: Bildgebung.....	73
2.4.3	Klinischer Einsatz: Radiotherapie	76
2.5	Weiterentwicklungen des 4D-Phantoms	77
2.5.1	Vereinfachte Körper-Gelenk-Struktur des Roboters.....	78
2.5.2	Erweiterung des Roboters zur Manipulation des Targets in fünf Freiheitsgraden.....	79
2.5.3	Konstruktive Verbesserungen des Roboters	82
2.5.4	Erhöhte Mensch-Äquivalenz des 4D-Phantoms.....	84
2.5.5	Verbesserte Dosismesstechnik.....	86
2.5.6	Kinetisches Modell des Roboters	87
2.5.7	Vereinfachte Kalibrierung des Roboters	89
2.5.8	Flexible Kollisionserkennung	89
2.5.9	Erweiterte Steuerung und Regelung der Roboterbewegung.....	90
2.6	Schlussfolgerungen.....	93
3	Prädiktion respirationsbedingter Bewegungen	96
3.1	Einführung	96
3.2	Entwurf verschiedener Prädiktionsverfahren	106
3.3	Prädiktion von Trajektorien.....	112
3.4	Kriterien zur Bewertung eines Prädiktionsverfahrens	113
3.4.1	Genauigkeit	114
3.4.2	Toleranz von Unregelmäßigkeiten	117
3.4.3	Toleranz von Messrauschen.....	119
3.4.4	Neigung zur Divergenz.....	119
3.4.5	Abhängigkeit von Trainingsdaten.....	120
3.4.6	Überschätzung der Auslenkung	120
3.4.7	Variabilität	122
3.4.8	Konvergenzzeit	122
3.4.9	Rechenaufwand.....	123
3.5	Erprobung der Prädiktionsverfahren	123
3.5.1	Beispieldaten	123
3.5.2	Simulationen.....	126
3.5.3	Bewertungen	143
3.6	Schlussfolgerungen.....	153

4	Regelung eines Knickarmroboters zur Gegenführung respirationsbedingter Bewegungen	161
4.1	Einführung	161
4.2	Modellierung und Simulation des Zukunftsfehlers	165
4.3	Modellierung des Roboters	167
4.4	Realisierung verschiedener Regelungsverfahren	170
4.4.1	Adaptive Latenzzeitvorsteuerung	171
4.4.2	Vorsteuerung mit PI-Regelung	172
4.4.3	Modellbasierte prädiktive Regelung	174
4.4.4	Periodenrobuste repetitive Regelung	175
4.5	Versuche und Ergebnisse	177
4.5.1	Identifikation des Robotermodells	177
4.5.2	Quantifizierung der Aperiodizität von Atembewegungen	179
4.5.3	Simulationsbasierte Erprobung der periodenrobusten repetitiven Regelung	182
4.5.4	Versuchsbasierte Erprobung und Vergleich der Regelungsverfahren	187
4.6	Schlussfolgerungen	192
5	Erprobung eines Systems zur Gegenführung respirationsbedingter Bewegungen	198
5.1	Erprobungssystem	198
5.2	Algorithmus der prädiktiven Regelung	200
5.3	Versuche und Ergebnisse	201
5.4	Schlussfolgerungen	203
6	Zusammenfassung und mögliche Anschlussdissertationen	205
7	Anhang	210
7.1	4D-Phantom: Roboter: Kollisionserkennung: Berechnung der Distanzmaße ..	210
7.2	4D-Phantom: Roboter: Trajektoriengenerierung: Implementierung linearer und elliptischer Bahntrajektorien	212
7.3	4D-Phantom: Roboter: Kalibrierung: Erfassung der Targetposition mit Hilfe des optischen Trackingsystems	214
7.4	4D-Phantom: Roboter: Kinetisches Modell	215
7.5	Bindung zur Vorgabe der relativen Verdrehung zwischen zwei Körpern für die Mehrkörpersimulation in Körperkoordinaten	219

7.6	4D-Phantom: Roboter: Geschwindigkeitsregelung: Extended Kalman Filter zur Schätzung der Laufzeitdifferenz	222
7.7	4D-Phantom: Roboter: Algorithmus zur iterativen Steuerung für gleitende Zielpunktspezifikation	223
7.8	Regelung: Probabilistische Simulation des Zukunftsfehlers	225
7.9	Regelung: Identifikation des Robotermodells: Anregungstrajektorien	226
7.10	Regelung: Ergebnisse der Reglereinstellung	228
7.11	Anpassung einer Basiswelle an eine Trajektorie mit periodischer Charakteristik	229
7.12	Regelung: Extended Kalman Filter zur Beobachtung der Dauer, des Offsets und des Maximalwerts der aktuellen Periode	232
7.13	Regelung: Bildung einer Trajektorie mit einstellbarer Aperiodizität	233
Literatur.....		235
Betreute studentische Arbeiten.....		255