

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

Zusammenfassung Deutsch

Kurzzusammenfassung

Die Radiotherapie bewegter Tumoren befindet sich aktuell in einem Generationswechsel hin zu 4D-Verfahren, die die Strahlendosis sowohl volumen- als auch zeitkonform applizieren und korrespondierend eine intrafraktionelle Regelung der Dosisapplikation erfordern. Ein Ansatz zur Realisierung eines 4D-Radiotherapieverfahrens ist die Führung der Liege des unter Bestrahlung befindlichen Patienten durch einen seriellkinematischen Knickarmroboter mit dem Ziel, die bestrahlten Gewebestrukturen inertial stillzulegen. Dieser Ansatz ermöglicht eine hohe Genauigkeit der Bewegungskompensation sowie resultierend aus dem hohen Arbeitsraum des Knickarmroboters eine effiziente Patientenlogistik und erweiterte Gestaltungsmöglichkeiten des Bestrahlungsprogramms.

In dieser Arbeit wird ein neuartiges robotergestütztes 4D-Phantom vorgestellt, das hochdimensionale Bewegungen des bestrahlten Volumens relativ zu dessen menschäquivalenter Umgebung erzeugt. Desweiteren werden Prädiktions- und Regelungsverfahren, die zur robotergestützten Kompensation respirationsbedingter Gewebewebungen eingesetzt werden können, vorgestellt und sowohl theoretisch als auch versuchsbasiert miteinander verglichen.

Zusätzliche Details

Die Hauptmerkmale, durch die sich ein 4D-Phantom auszeichnen sollte, sind: (1) Mensch-äquivalenter Aufbau, (2) Mensch-äquivalente Bewegungen, (3) umfassende Messfähigkeiten, (4) universelle Einsetzbarkeit und (5) effizienter Gebrauch. Das in dieser Arbeit vorgestellte 4D-Phantom weist erstmalig hohe Performanz hinsichtlich jedes dieser Hauptmerkmale auf. Das 4D-Phantom ist modular konzipiert, ermöglicht eine sechsdimensionale Bewegung des bestrahlten Volumens und verwendet einen neuartigen parallelkinematischen Roboter, der eine Einstellung der erzeugten Bewegung in drei Freiheitsgraden ermöglicht. In der klinischen Praxis wurde das 4D-Phantom erfolgreich zur Validierung verschiedener Verfahren der Bildgebung und Radiotherapie eingesetzt.

Verschiedene Prädiktionsverfahren, die auf adaptiven linearen Filtern, lokaler Regression, adaptiven Intervall Typ zwei Neuro Fuzzy Inferenz Systemen oder Modellen des erwarteten Verlaufs des prädizierten Wertes basieren, wurden implementiert und unter Berücksichtigung der Anforderungen der 4D-Radiotherapieanwendung erprobt, bewertet und miteinander verglichen. Dies erfolgte auf Basis von realen Beispielbewegungen sowie elf Bewertungskriterien, die auf insgesamt achtunddreißig Eigenschaftswerten basieren. Filter mit endlicher Impulsantwort, deren Koeffizienten mit Hilfe des Verfahrens der rekursiven kleinsten Quadrate gleitend adaptiert werden, wurden als bestgeeignet identifiziert.

Zur Realisierung einer robotergestützten inertialen Stilllegung von respirationsbedingt bewegten Tumoren kommen prinzipiell die folgenden Regelungsverfahren in Betracht: (1) Adaptive Identifikation und Kompensation der Latenzzeit des Roboters, (2) kombinierte Vorsteuerung und Regelung, (3) modellbasierte prädiktive Regelung und (4) periodenrobuste repetitive Regelung. Die theoretischen Vor- und Nachteile dieser Regelungsverfahren wurden durch eine Auswertung der mit diesen Verfahren unter realen Bedingungen erzielten Regelungsergebnisse ergänzt. In diesem Zusammenhang wurden die in realen Atembewegungen auftretenden Abweichungen von einem periodischen Verlauf statistisch quantifiziert. Aufgrund der hohen Ausprägung dieser Abweichungen erscheint eine gewinnbringende Einsetzbarkeit von Varianten der repetitiven Regelung fraglich. Kombinierte Vorsteuerung und Regelung sowie modellbasierte prädiktive Regelung wurden als

bestgeeignet identifiziert.

Der Roboter des 4D-Phantoms, ein ausgewähltes Prädiktionsverfahren, ein ausgewähltes Regelungsverfahren, ein Knickarmroboter und ein optisches Trackingsystem wurden zu einem repräsentativen Ersatzsystem zur robotergestützten Gegenführung respirationsbedingter Bewegungen kombiniert. Darauf aufsetzend wurden die Realisierbarkeit und der Nutzen eines solchen Systems unter realen Bedingungen demonstriert.

Zusammenfassung Englisch

Kurzzusammenfassung

Radiotherapy of moving tumors is currently undergoing a generation shift towards 4D techniques. These techniques allow a both volume and time conformal application of radiation dose and correspondingly require an intra fractional closed loop control of dose application. A 4D radiotherapy can be realized by positioning of the couch, which carries the patient under radiation, by a serial industrial robot with the aim of eliminating the inertial motion of the irradiated volume. This principle allows a high accuracy of motion compensation. Also, the large working space of a serial industrial robot enables efficient patient logistics and extended degrees of freedom of the radiation program.

In this work, a novel 4D phantom, which generates high dimensional motion of the irradiated volume relative to its surrounding human equivalent environment, is presented. Also, prediction and control methods, which allow robot-based compensation of respiratory motion, are presented and compared based on both theory and experiments.

Zusätzliche Details

The main desired features of a 4D phantom are: (1) Human equivalent structure, (2) human equivalent motion, (3) comprehensive measurement capabilities, (4) universal applicability and (5) efficient practical use. The 4D phantom presented in this work displays high performance with respect to each of these features. The 4D phantom is modularly structured, allows a sixdimensional physiological motion of the irradiated volume and employs a new kind of parallel robot, which allows a customization of the generated motion in three degrees of freedom. The 4D phantom was successfully employed in clinical practice for validation of various techniques of medical imaging and radiotherapy.

Various prediction methods, which are based on adaptive linear filters, local regression, adaptive interval type two neuro fuzzy inference systems or models of the expected propagation of the predicted value, were implemented, benchmarked and compared considering the requirements of the 4D radiotherapy application. For this purpose, exemplary human motions and eleven benchmark criteria, which were evaluated based on thirty-eight different property-values, were employed. Finite impulse response filters, whose coefficients are continuously updated using the recursive least squares method, were identified as best suited.

Robot based inertial compensation of respiratory motion can be realized based on: (1) Adaptive identification and compensation of robot latency, (2) combined feedforward and feedback control, (3) model based predictive control and (4) period robust repetitive control. The theoretical advantages and disadvantages of these control methods were complemented by an analysis of the practical results obtained with these methods. In that context, the

deviations from a periodic characteristic of human respiratory motion were statistically quantified. The extent of these deviations rendered repetitive control variants unprofitable. Combined feedforward and feedback control and model based predictive control were identified as best suited.

The robot of the 4D phantom, a selected prediction method, a selected control method, a serial industrial robot and an optical tracking system were combined to a representative substitute system of robot based patient couch positioning for compensation of respiratory motion. Feasibility and benefit of such system were demonstrated under real conditions.