

---

# **Aktuelle Forschung Medizintechnik – Latest Research in Medical Engineering**

**Editor-in-Chief:**

Th. M. Buzug, Lübeck, Deutschland

Unter den Zukunftstechnologien mit hohem Innovationspotenzial ist die Medizintechnik in Wissenschaft und Wirtschaft hervorragend aufgestellt, erzielt überdurchschnittliche Wachstumsraten und gilt als krisensichere Branche. Wesentliche Trends der Medizintechnik sind die Computerisierung, Miniaturisierung und Molekularisierung. Die Computerisierung stellt beispielsweise die Grundlage für die medizinische Bildgebung, Bildverarbeitung und bildgeführte Chirurgie dar. Die Miniaturisierung spielt bei intelligenten Implantaten, der minimalinvasiven Chirurgie, aber auch bei der Entwicklung von neuen nanostrukturierten Materialien eine wichtige Rolle in der Medizin. Die Molekularisierung ist unter anderem in der regenerativen Medizin, aber auch im Rahmen der sogenannten molekularen Bildgebung ein entscheidender Aspekt. Disziplinen übergreifend sind daher Querschnittstechnologien wie die Nano- und Mikrosystemtechnik, optische Technologien und Softwaresysteme von großem Interesse.

Diese Schriftenreihe für herausragende Dissertationen und Habilitationsschriften aus dem Themengebiet Medizintechnik spannt den Bogen vom Klinikingenieurwesen und der Medizinischen Informatik bis hin zur Medizinischen Physik, Biomedizintechnik und Medizinischen Ingenieurwissenschaft.

**Editor-in-Chief:**

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug  
Institut für Medizintechnik,  
Universität zu Lübeck

**Editorial Board:**

Prof. Dr. Olaf Dössel  
Institut für Biomedizinische Technik,  
Karlsruhe Institute for Technology

Prof. Dr.-Ing. Tim C. Lüth  
Micro Technology  
and Medical Device Technology,  
TU München

Prof. Dr. Heinz Handels  
Institut für Medizinische Informatik,  
Universität zu Lübeck

Prof. Dr.-Ing. Dietrich Paulus  
Institut für Computervisualistik,  
Universität Koblenz-Landau

Prof. Dr.-Ing. Joachim Hornegger  
Lehrstuhl für Mustererkennung,  
Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim  
Institut für Simulation und Graphik,  
Universität Magdeburg

Prof. Dr. Marc Kachelrieß  
German Cancer Research  
Center, Heidelberg

Prof. Dr.-Ing. Georg Schmitz  
Lehrstuhl für Medizintechnik,  
Universität Bochum

Prof. Dr. Edmund Koch  
Klinisches Sensoring und Monitoring,  
TU Dresden

---

Svitlana Ens

# Bewegungsdetektion und -korrektur in der Transmissions- Computertomographie

Svitlana Ens  
Lübeck, Deutschland

Dissertation Universität zu Lübeck, 2014

ISBN 978-3-658-07692-4                      ISBN 978-3-658-07693-1 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-07693-1

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

# Vorwort des Reihenherausgebers

Das Werk Bewegungsdetektion und -korrektur in der Transmissions-Computertomographie von Dr. Svitlana Ens ist der 17. Band der Reihe exzellenter Dissertationen des Forschungsbereiches Medizintechnik im Springer Vieweg Verlag. Die Arbeit von Dr. Ens wurde durch einen hochrangigen wissenschaftlichen Beirat dieser Reihe ausgewählt. Springer Vieweg verfolgt mit dieser Reihe das Ziel, für den Bereich Medizintechnik eine Plattform für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zur Verfügung zu stellen, auf der ihre Ergebnisse schnell eine breite Öffentlichkeit erreichen.

Autorinnen und Autoren von Dissertationen mit exzellentem Ergebnis können sich bei Interesse an einer Veröffentlichung ihrer Arbeit in dieser Reihe direkt an den Herausgeber wenden:

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug  
Reihenherausgeber Medizintechnik

Institut für Medizintechnik  
Universität zu Lübeck  
Ratzeburger Allee 160  
23562 Lübeck

Web: [www.imt.uni-luebeck.de](http://www.imt.uni-luebeck.de)  
Email: [buzug@imt.uni-luebeck.de](mailto:buzug@imt.uni-luebeck.de)

# Geleitwort

Das vorliegende Werk *Bewegungsdetektion und -korrektur in der Transmissions-Computertomographie* fasst die Forschungsarbeiten am Institut für Medizintechnik der Universität zu Lübeck im Bereich der Computertomographie zusammen. Es behandelt insbesondere die Methoden der Bildverbesserung bei CT-Aufnahmen mit inkonsistenten Projektionsdaten. Hierbei werden durch Bewegungen des zu untersuchenden Objektes Störungen in den rekonstruierten Bildern verursacht, die die medizinisch-diagnostische Beurteilung stark beeinträchtigen oder sogar unmöglich machen.

Die Computertomographie (CT) stellt das Verfahren dar, das als erstes axiale überlagerungsfreie Schnittbilder aus dem menschlichen Körper erzeugen konnte, ohne ihn dafür aufschneiden zu müssen. Diese neue Technik war in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts ein enormer Schritt innerhalb der diagnostischen Möglichkeiten der Medizin. Artefakte in der CT sind Bildfehler die durch die Art der Rekonstruktion – das ist heute in der Praxis die gefilterte Rückprojektion (FBP) – oder durch den Einsatz spezieller Technologien oder Anordnungen bei der Messwerterfassung entstehen. Die Kenntnis der Ursachen von Artefakten ist die Voraussetzung für Gegenmaßnahmen. Diese Gegenmaßnahmen sind umso wichtiger, da es in der Natur der gefilterten Rückprojektion liegt, Artefakte über das gesamte Bild zu verschmieren.

Das Werk von Svitlana Ens behandelt die Problematik der Patientenbewegungen während einer CT-Akquisition. Es wird ausgeführt, dass insbesondere bei Dental-CT-Akquisition das Auftreten der Patientenbewegungen ein großes Problem darstellt. Dabei ist es so, dass Kopfbewegungen eines Patienten durch mehrere spezifische Aspekte der Dental-CTs wie Konstruktionsweise, lange Akquisitionszeit oder auch die aufrechte Position der Patienten während der Akquisition begünstigt werden. Ein Dental-CT weist eine Reihe von Eigenschaften auf, die dazu führen, dass die bekannten Methoden der Bewegungsdetektion und -korrektur nicht angewendet werden können.

Frau Ens entwickelte Verfahren, mit denen sowohl die Detektion der Bewegungspunkte als auch die Korrektur der Bewegungsartefakte trotz der besonderen Eigenschaften des verwendeten Dental-CTs möglich ist. Die vorgestellten Methoden können aber auch für die Detektion und Korrektur rigider Bewegungen bei anderen CT-Typen verwendet werden.

Die mathematische Ursache für die Bewegungsartefakte ist die Inkonsistenz der Projektionswerte aus unterschiedlichen Richtungen während einer Aufnahme. Artefakte verlaufen oft streifenartig durch das ganze Bild. Dies hat seine geometrische Ursache in der gefilterten Rückprojektion, die die fehlerhaften Werte über das gesamte Bild verschmiert. Wie oben bereits erwähnt kann die diagnostische Beurteilung dadurch erschwert werden bzw. in einigen Fällen nicht mehr durchführbar sein und im schlimmsten Fall zu einer Fehldiagnose führen. Aus diesem Grund besteht ein großes Interesse in der Reduktion der Bewegungsartefakte.

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug  
Institut für Medizintechnik  
Universität zu Lübeck

# Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde die Problematik der Patientenbewegungen während einer CT-Akquisition behandelt. Insbesondere bei Dental-CT-Akquisition stellt das Auftreten der Patientenbewegungen ein großes Problem dar. Die Kopfbewegungen eines Patienten werden durch mehrere spezifische Aspekte der Dental-CTs wie Konstruktionsweise, lange Akquisitionszeit, aufrechte Position der Patienten während der Akquisition usw. begünstigt. Ein Dental-CT weist eine Reihe von Eigenschaften auf, die dazu führen, dass die bekannten Methoden der Bewegungsdetektion und -korrektur nicht angewendet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, mit denen sowohl die Detektion der Bewegungspunkte als auch die Korrektur der Bewegungsartefakte trotz der besonderen Eigenschaften des verwendeten Dental-CTs möglich ist. Die vorgestellten Methoden können aber auch für die Detektion und Korrektur rigider Bewegungen bei anderen CT-Typen verwendet werden.

In dieser Arbeit wurde die Bestimmung der Bewegungspunkte als Ausreißer der Distanzmaßwerte entwickelt. Mit der vorgestellten Vorgehensweise können sowohl abrupte als auch längere Bewegungen mit höherem Bewegungsinkrement detektiert werden. Außerdem wurde gezeigt, wie mit Hilfe eines Metallmarkers die Bewegungsdetektion mit hohem Zuverlässigkeitsgrad durchgeführt werden kann. Besonders im Fall von sonst schwer zu detektierenden langsamen Bewegungen sind die Detektionsergebnisse bei Verwendung eines Metallmarkers sehr gut. Zusätzlich wurde untersucht, ob die Ermittlung der stattgefundenen 2D-Bewegung zwischen den Projektionen, die den unterschiedlichen Objektpositionen entsprechen, mit Hilfe von Registrierung, Optische Fluss oder landmarkenbasierten Registrierung möglich ist. Durch den Vergleich der Projektionen der Bewegungsvektoren der 3D-Bewegungen mit den ermittelten planaren Bewegungen können viele Bewegungen ausgeschlossen werden, was sowohl die Geschwindigkeit der Korrektur als auch die Güte der Korrektur positiv beeinflusst.

Ein neuer Ansatz der Bewegungskorrektur wurde vorgestellt, bei welchem die Ermittlung der Bewegungsparameter durch Minimieren einer Funktion stattfindet, welche die Anzahl der Bewegungsartefakte einer Rekonstruktion widerspiegelt. In dieser Arbeit stand vor allem die Identifizierung der dafür verwendbaren Maße im Fokus. Durch Verwendung von drei Maße konnten gute Korrekturergebnisse erzielt werden (mehr als 20 wurden getestet). Zusätzlich wurde die Verwendung eines



Metallmarkers zur Bewegungskorrektur getestet. Dafür wurden mehrere referenzbasierten Metriken und referenzfreie Maße getestet.

Alle in dieser Arbeit entwickelten Methoden wurden an realen Daten getestet. Dabei wurden Akquisitionen eines Dental-CTs verwendet. Um die Aussagen über die Richtigkeit der ermittelten Bewegungspunkte und Bewegungsprojektion testen zu können, wurden ein Roboterarm und ein anthropomorphes Kopfphantom verwendet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Computertomographie</b>	<b>7</b>
2.1	Parallelstrahlgeometrie . . . . .	9
2.2	Fächerstrahlgeometrie . . . . .	13
2.3	Kegelstrahlgeometrie . . . . .	15
2.4	FDK-Algorithmus für planare Detektoren . . . . .	17
2.5	Bewegungsartefakte in der Computertomographie . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Dental-CT</b>	<b>25</b>
3.1	Technische Realisierung . . . . .	26
3.2	Diskretisierung und Rückprojektion . . . . .	28
3.3	Projektionsmatrix und deren Bestimmung . . . . .	33
3.4	Rekonstruktion mit Projektionsmatrizen . . . . .	37
3.5	Spezielle Herausforderungen eines Dental-CT . . . . .	39
3.5.1	Short-Scan Geometrie . . . . .	40
3.5.2	Begrenztes FOV . . . . .	44
3.6	Details der Implementierung des FDK-Algorithmus für das Galileos Dental-CT . . . . .	51
3.7	Vorwärtsprojektion . . . . .	53
3.8	Bewegung in der Dental-CT: Eingrenzung des Problems . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Bisherige Arbeiten zur Bewegungsdetektion und Bewegungskorrektur</b>	<b>61</b>
4.1	Verwendung externer Sensoren . . . . .	63
4.2	Bewegungsdetektion basierend auf Konsistenzbedingungen . . . . .	65
4.3	Sinogrammbasierte Verfahren . . . . .	66
4.4	Vergleichen der aufeinanderfolgenden Projektionen . . . . .	69
4.5	Verwendung der Vorwärtsprojektion . . . . .	70
4.6	Verwendung mehrerer Metallmarker . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Erstellung einer Datenbank mit Bewegungsartefakten</b>	<b>77</b>
5.1	Durchführung der Datenerstellung . . . . .	78

5.2	Ergebnisse . . . . .	79
5.3	Simulierte Daten . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Detektion der Bewegungspositionen</b>	<b>89</b>
6.1	Bewegungspositionen Detektion mit referenzbasierten Metriken . .	91
6.1.1	Vorgehensweise . . . . .	91
6.1.2	Referenzbasierte Metriken . . . . .	94
6.1.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	106
6.2	Beschränkung des Raumes möglicher Bewegungen . . . . .	113
6.2.1	Massezentrum und landmarkenbasierte Registrierung . . . . .	113
6.2.2	Grauwertbasierte Registrierung . . . . .	119
6.2.3	Optischer Fluss . . . . .	129
6.2.4	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	141
6.3	Verwendung eines Markers . . . . .	147
6.3.1	Vorgehensweise der Bewegungsdetektion . . . . .	148
6.3.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	161
6.4	Zusammenfassung . . . . .	170
<b>7</b>	<b>Bewegungskorrektur</b>	<b>173</b>
7.1	Verwendung der Vorwärtsprojektion . . . . .	174
7.1.1	Vorgehensweise . . . . .	174
7.1.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	188
7.2	Korrektur basierend auf der Rekonstruktion eines Metallmarkers . .	195
7.2.1	Verwendung eines Referenzvolumens . . . . .	195
7.2.2	Referenzfreie Maße . . . . .	198
7.2.3	Ergebnisse . . . . .	199
7.3	Korrekturen durch Beurteilung der Stärke der Bewegungsartefakte .	201
7.3.1	Vorgehensweise . . . . .	204
7.3.2	Referenzlose Maße . . . . .	205
7.3.3	Ergebnisse . . . . .	212
7.4	Zusammenfassung . . . . .	228
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>231</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	231
8.2	Ausblick . . . . .	233
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>235</b>