Aktuelle Forschung Medizintechnik –
Latest Research in Medical Engineering

RESEARCH

Sebastian T. Gollmer

3D-Bildsegmentierung mittels statistischer Formmodelle

Korrespondenzfindung, Modellierung, Segmentierung und ihre wechselseitigen Abhängigkeiten

Springer Vieweg

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. Heinz Handels
Institut für Medizinische Informatik,
Universität zu Lübeck

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

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

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

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

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

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

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

Sebastian T. Gollmer

3D-Bildsegmentierung mittels statistischer Formmodelle

Korrespondenzfindung, Modellierung, Segmentierung und ihre wechselseitigen Abhängigkeiten

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Thorsten M. Buzug

Springer Vieweg

Sebastian T. Gollmer
Universität zu Lübeck, Deutschland

Dissertation Universität zu Lübeck, 2015

Aktuelle Forschung Medizintechnik – Latest Research in Medical Engineering
ISBN 978-3-658-09810-0 ISBN 978-3-658-09811-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-09811-7

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)

Vorwort des Reihenherausgebers

Das Werk *3D-Bildsegmentierung mittels statistischer Formmodelle. Korrespondenzfindung, Modellierung, Segmentierung und ihre wechselseitigen Abhängigkeiten* von Dr. Sebastian Gollmer ist der 20. Band der Reihe exzellenter Dissertationen des Forschungsbereiches Medizintechnik im Springer Vieweg Verlag. Die Arbeit von Dr. Gollmer 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
Email: buzug@imt.uni-luebeck.de

Geleitwort

Das vorliegende Werk *3D-Bildsegmentierung mittels statistischer Formmodelle: Korrespondenzfindung, Modellierung, Segmentierung und ihre wechselseitigen Abhängigkeiten* behandelt die Methoden der Segmentierung tomografischer Bilddaten unter Verwendung statistischer Formmodelle. Hierbei wird auf Fragestellungen der wechselseitigen Abhängigkeit von Modellerstellung bzw. Korrespondenzfindung, Formmodellierung und 3D-Bildsegmentierung fokussiert und jeweils neue Lösungsvorschläge entwickelt, implementiert und evaluiert.

Dr. Gollmer gibt nach einer Einleitung in das Thema zunächst einen generellen Überblick über deformierbare Modelle und die Grundlagen zu Formen und deren Repräsentation. Es werden die Methoden der linearen statistischen Formmodellierung und Formrekonstruktion darüber hinaus formal eingeführt. Im Werk wird dann die für die Modellerstellung zentrale Korrespondenzfindung, die letztlich auch deren wesentliche Herausforderung darstellt, diskutiert. In diesem Zusammenhang werden der neuartige, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Distmin-Algorithmus sowie die wesentlichen Aspekte der populationsbasierten Korrespondenzoptimierung vorgestellt. Tatsächlich stellt die populationsbasierte Korrespondenzoptimierung einen wesentlichen Baustein für die daran anschließende Evaluierung der Korrespondenzgüte dar.

Dabei werden zum einen die eigenen Beiträge zur Evaluierungsmethodik vorgestellt. Zum anderen wird konzeptionell vorgestellt, wie der Grad der Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussfaktoren auf die Korrespondenzoptimierung experimentell evaluiert werden kann. Es wird dabei auch auf die Bedeutung einer geeigneten Initialisierung hingewiesen, wobei sich das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Distmin-Verfahren als vorteilhaft herauskristallisiert. Darüber hinaus konnte Dr. Gollmer ein neues, auf der Segmentierung von Binärbildern basierendes Evaluierungsverfahren entwickeln. Dieses Verfahren ermöglicht die unmittelbare Bewertung unterschiedlicher Korrespondenzverfahren auf die zu erwartende Segmentierungsgüte.

Das Werk beschäftigt sich folgend mit der nichtlinearen Formmodellierung als Erweiterung der linearen statischen Formmodellierung. Die Grenzen des linearen Modells werden von ihm anhand künstlicher Phantomdaten gezeigt und motivieren die Untersuchung der dem linearen Modell zugrundeliegenden Normalverteilungsannahme für unterschiedliche anatomische Strukturen mit Hilfe von univariaten und multivariaten statistischen Test-

verfahren. Eine solche Untersuchung erfolgte überhaupt erstmals im Rahmen der Arbeit von Sebastian Gollmer. Die konkreten Ergebnisse der Evaluierung motivieren insbesondere die formale Einführung nichtlinearer Methoden der Formmodellierung, welche im Anschluss daran diskutiert werden.

Dr. Gollmer diskutiert den Stand der Wissenschaft hinsichtlich der formmodellbasierten Segmentierung medizinischer Bilddaten. Anschließend wird ein neuartiger Algorithmus für die formmodellbasierte Segmentierung eingeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Potenzial dieses relaxierten aktiven Formmodells zur Generierung exzellenter Segmentierungsergebnisse gezeigt. Im hinteren Teil des Werkes entwickelt Dr. Gollmer einen neuen Algorithmus für die vollautomatische Unterkiefersegmentierung und setzt das relaxierte aktive Formmodell erfolgreich für die simultane Segmentierung unterschiedlicher abdominaler Organe ein. Aus dem Vergleich der mit unterschiedlichen Korrespondenzverfahren und Formmodellen jeweils erzielten Segmentierungsergebnisse bewertet er die praktische Relevanz dieser Komponenten und die zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten.

Das Werk von Dr. Sebastian Gollmer ist in vielerlei Hinsicht als überragend zu beurteilen. Sprachlich schnörkellos und mit hoher Präzision reihen sich Originalbeiträge in dieser Arbeit aneinander.

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

Danksagung

An dieser Stelle danke ich all jenen, die mich unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Prof. Dr. Thorsten M. Buzug danke ich herzlich dafür, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat am Institut für Medizintechnik der Universität zu Lübeck zu promovieren. Außerdem danke ich ihm sehr für die Freiheit, die er mir stets bei der Ausrichtung meiner Forschungstätigkeit gegeben hat. Meinen ehemaligen Kollegen am Institut für Medizintechnik danke ich für die Zusammenarbeit, viele schöne Erinnerungen an die Lübecker Zeit und so manchen geselligen Kneipenabend.

Besonderer Dank gilt meinen Kooperationspartnern für die stets konstruktive Zusammenarbeit. Insbesondere bedanke ich mich bei Dr. Matthias Kirschner und Dr. Stefan Wesarg für die jederzeit offene Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Graphisch-Interaktive Systeme der Technischen Universität Darmstadt. Arpad Bischof, IMAGE Information Systems Europe Ltd., und Prof. Dr. med. Jörg Barkhausen, Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin des UKSH Campus Lübeck danke ich für Ihre Bereitschaft, abdominale Computertomographieaufnahmen zur Verfügung zu stellen. Dr. med. Martin Simon und Florian Schierp danke ich für ihre Zeit und Energie, die sie für die manuelle Segmentierung dieser Computertomographieaufnahmen aufgewendet haben. Weiterhin danke ich Dr. Johannes Ulrici und Christian Beckhaus von der Firma Sirona für die Bereitstellung diverser Dental-Computertomographieaufnahmen.

Für das fleißige Korrekturlesen dieser Arbeit bedanke ich mich sehr herzlich bei Dr. Konstantin Ens, Volker Gerdes, Alina Gollmer, Benjamin Gollmer, Dominik Gollmer, Katharina Gollmer und Matthias Kleine.

Meinen Eltern und Geschwistern danke ich dafür, dass sie mich stets unterstützt und mir aufmunternd zur Seite gestanden sind. Schließlich danke ich meiner lieben Frau Alina für ihr (fast) immer vorhandenes Verständnis für viele Wochenend- und Abend- bis Nachtschichten, ihre ständige und bedingungslose Unterstützung, Hilfe und Motivation und vor allem für ihre grenzenlose Liebe, die mir immer wieder Kraft gibt.

Kurzfassung

Die Segmentierung medizinischer Volumenbilddaten spielt in der modernen computergestützten Diagnose und Therapie eine essentielle Rolle. Sie wird beispielsweise für die Quantifizierung von Form- oder Volumenänderungen, die präoperative Planung komplexer chirurgischer Eingriffe oder die Erstellung eines Bestrahlungsplans für die Radiotherapie benötigt. Aus Gründen der Effizienz und zur Vermeidung subjektiver Einflüsse ist eine automatisierte Segmentierung wünschenswert. Eine Möglichkeit, dies zu realisieren ist die Verwendung statistischer Formmodelle. Diese integrieren die zu erwartende Formvariabilität einer bestimmten Objektklasse und zeichnen sich daher durch eine hohe Robustheit gegenüber unterschiedlichsten, die Segmentierung erschwerende Einflussfaktoren aus.

Ein wesentlicher Aspekt und gleichzeitig Voraussetzung für die Modellerstellung ist die vergleichsweise komplexe Korrespondenzfindung. Ein weiterer Gesichtspunkt ist, dass die Beschreibung der Formvariabilität mittels unterschiedlicher Modelle erfolgen kann. Sowohl der Einfluss der Korrespondenzfindung als auch der Modellierung werden in dieser Arbeit erstmals hinsichtlich ihrer praktischen Relevanz für die Segmentierungsgüte evaluiert. Zu diesem Zweck wird ein neues Evaluierungsverfahren entwickelt, welches den Prozess der Segmentierung quasi simuliert. Im Gegensatz zu bisherigen Evaluierungsverfahren ist es dadurch möglich, den Einfluss unterschiedlicher Segmentierungsverfahren bzw. deren Komponenten auf die zu erwartende Segmentierungsgüte unmittelbar zu quantifizieren. So wird in dieser Arbeit der Vorteil der populationsbasierten Korrespondenzoptimierung gegenüber paarweisen Korrespondenzverfahren demonstriert und durch die im Rahmen realer Segmentierungsanwendungen erzielten Ergebnisse bestätigt. Dies belegt die Relevanz des neuen Evaluierungsverfahrens und weist erstmals die praktische Bedeutung der populationsbasierten Korrespondenzoptimierung für die Segmentierung nach.

Die dem klassischen statistischen Formmodell zugrunde liegende Annahme einer multivariaten Normalverteilung der Formvariabilität wird in dieser Arbeit erstmals mittels multivariater statistischer Testverfahren quantitativ untersucht. Die Ergebnisse belegen, dass die Formparameter in vielen Fällen nicht normalverteilt sind, was eine bedeutende formale Erweiterung zu der qualitativen Motivation in bisherigen Arbeiten darstellt. Die Überlegenheit nichtlinearer Modelle gegenüber dem klassischen linearen Formmodell

wird bei der Segmentierung unterschiedlicher Daten demonstriert, wodurch die Ergebnisse der statistischen Testverfahren in einer realen Applikation bestätigt werden.

In Erweiterung des aktiven Formmodells wird in dieser Arbeit das relaxierte aktive Formmodell (rAFM) entwickelt und dessen statistisch signifikante Überlegenheit in unterschiedlichen Anwendungen der Segmentierung demonstriert. Im Vergleich zu alternativen Verfahren aus der Literatur zeichnet sich das rAFM durch seine einfache Anwendung aus, da nur ein einziger Parameter festgelegt werden muss. Wie das aktive Formmodell ermöglicht es die simultane Segmentierung mehrerer Objekte unter Verwendung eines Multi-Objekt-Formmodells, wobei mit dem rAFM signifikant bessere Ergebnisse erzielt werden. Des Weiteren wird am Beispiel der Unterkiefersegmentierung gezeigt, dass mit dem rAFM eine exzellente, dem Stand der Technik entsprechende Segmentierungsgenauigkeit möglich ist. Unter Verwendung eines in dieser Arbeit entwickelten Korrespondenzverfahrens gelingt letzteres, im Unterschied zu bisherigen formmodellbasierten Ansätzen, von der Korrespondenzfindung bis zur Segmentierung gänzlich ohne manuelle Interaktion. Dies unterstreicht zum einen die praktische Relevanz der entwickelten Methoden und ist zum anderen ein Indiz dafür, dass sie das Potenzial besitzen, eine tragende Rolle für zukünftige Anwendungen statistischer Formmodelle in der (medizinischen) Bildverarbeitung zu spielen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **1**

1.1 Motivation . . . 1

1.2 Gliederung und eigene Beiträge . . . 2

2 Formmodellierung **5**

2.1 Deformierbare Modelle . . . 5

2.2 Form und Formrepräsentation . . . 8

2.3 Statistische Formmodelle . . . 10

2.3.1 Ausrichtung der Formen . . . 11

2.3.2 Lineare Formmodellierung . . . 13

2.3.3 Formrekonstruktion und Formenergie . . . 16

2.4 Korrespondenzfindung . . . 20

2.4.1 Stand der Technik . . . 20

2.4.2 Korrespondenzfindung mittels Oberflächenparametrisierung . . . 22

2.4.3 Korrespondenzoptimierung . . . 26

3 Evaluierung der Korrespondenzgüte **33**

3.1 Stand der Technik . . . 33

3.2 Evaluierungsmethoden . . . 35

3.2.1 Korrespondenzgüte . . . 36

3.2.2 Parametrisierungsgüte . . . 37

3.2.3 Formbasierte Metriken . . . 38

3.2.4 Segmentierungsgüte . . . 39

3.3 Experimente . . . 41

3.3.1 Oberflächenparametrisierung . . . 41

3.3.2 Korrespondenzoptimierung . . . 42

3.3.3 Studiendesign . . . 44

3.4 Ergebnisse und Diskussion . . . 46

3.4.1 Oberflächenparametrisierung . . . 46

3.4.2 Korrespondenzoptimierung . . . 49

3.4.3 Vergleich von Korrespondenz- und Segmentierungsevaluierung . . . 55

3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . . 59

4 Nichtlineare Formmodellierung 63
4.1 Nichtlineare Modellierungsansätze . . . 63
4.2 Untersuchung der Normalverteilungsannahme . . . 66
4.2.1 Univariate Testverfahren . . . 68
4.2.2 Multivariate Testverfahren . . . 70
4.2.3 Experimente . . . 74
4.2.4 Ergebnisse und Diskussion . . . 76
4.3 Kernbasierte Formmodellierung . . . 78
4.3.1 Kern-PCA . . . 79
4.3.2 Formrekonstruktion und Formenergie . . . 82
4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . . 87

5 Formmodellbasierte Segmentierung medizinischer Bilder 89
5.1 Stand der Technik . . . 89
5.2 Relaxiertes aktives Formmodell . . . 95
5.3 Regularisierung im aktiven Formmodell . . . 98
5.3.1 Parameterregularisierung . . . 98
5.3.2 Glättung des Verschiebungsvektorfeldes . . . 99
5.4 Modellierung lokaler Bildmerkmale . . . 100
5.4.1 Heuristisches Intensitätsmodell . . . 101
5.4.2 Nichtlineares Modell . . . 103

6 Anwendungen 107
6.1 Unterkiefersegmentierung . . . 108
6.1.1 Modellerstellung . . . 109
6.1.2 Unterkieferlokalisation . . . 111
6.1.3 Experimente . . . 112
6.1.4 Ergebnisse und Diskussion . . . 114
6.2 Segmentierung abdominaler Organe . . . 121
6.2.1 Modellerstellung . . . 122
6.2.2 Experimente . . . 125
6.2.3 Ergebnisse und Diskussion . . . 129
6.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . . 140

7 Zusammenfassung und Ausblick 143

A Gradient der Kernfunktion 147
A.1 RBF-Kern . . . 148
A.2 Polynom-Kern . . . 148

Abkürzungsverzeichnis 149

Publikationen 151

Literaturverzeichnis 155

1 Einführung

1.1 Motivation

Mit der steigenden Verbreitung digitaler Bilder im letzten Viertel des vergangenen Jahrhunderts, rückte deren Verarbeitung und Analyse zunehmend in das Interesse der Forschung. Insbesondere die automatische Erkennung bzw. Detektion, Extraktion bzw. Segmentierung, Rekonstruktion und Verfolgung (engl.: tracking) bestimmter Objekte und Strukturen waren und sind bis heute wesentliche Fragestellungen der Computervision[1].

Im Laufe der 1980er Jahre setzte sich zunehmend die Erkenntnis durch, dass unter ausschließlicher Verwendung von auf Pixelebene extrahierter Bildinformation häufig keine zufriedenstellende Bildinterpretation möglich ist. Ursachen dafür sind z.B. Rauscheinflüsse, relevante Information verbergende Artefakte oder ein geringer Kontrast zwischen unmittelbar benachbarten Objekten. Erfolgversprechender ist dagegen das Einbringen von a priori-Wissen über die gesuchte Struktur wie z.B. deren Form, Lage oder bildelementbasierte Merkmale.

Parallel dazu fanden in der Medizin dreidimensionale Bildgebungsmodalitäten wie z.B. die Computertomographie (CT) [32] oder die Magnetresonanztomographie (MRT) [213] zunehmend Verbreitung in der klinischen Anwendung. Heute eröffnen die Qualität und Quantität dieser dreidimensionalen Bilddaten ganz neue Anwendungsfelder für die computergestützte Diagnostik und Therapie [120]. Dabei spielt die Bildsegmentierung, d.h. die Zusammenfassung aller zu einem bestimmten Objekt gehörenden Bildelemente, in

[1] Wissenschaftsdisziplin, die sich mit der Akquisition, Verarbeitung, Analyse und dem Verstehen digitaler Bilder beschäftigt.

S. T. Gollmer, *3D-Bildsegmentierung mittels statistischer Formmodelle,*
Aktuelle Forschung Medizintechnik – Latest Research in Medical Engineering,
DOI 10.1007/978-3-658-09811-7_1, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

vielen Fällen eine essentielle Rolle (vgl. Kapitel 6). Gleichzeitig ist die manuelle Durchführung dieses Verarbeitungsschrittes durch den Mediziner aus Effizienz- und damit Kostengründen quasi nicht praktikabel und zudem unweigerlich subjektiven Einflüssen unterworfen.

Eine Möglichkeit der automatisierten und vergleichsweise effizienten Bildsegmentierung stellt die Verwendung statistischer Formmodelle [52] dar. Diese integrieren die zu erwartende Formvariabilität einer bestimmten Objektklasse und erlauben somit die Trennung benachbarter Strukturen mit ähnlichen Intensitätswerten, die Verbesserung der Robustheit gegenüber Bildrauschen sowie die Extrapolation bei fehlender Bildinformation. In den vergangenen Jahren wurden bereits einige, die formmodellbasierte Bildsegmentierung betreffende Fragestellungen, in wissenschaftlichen Veröffentlichungen beleuchtet (z.B. [126] und Referenzen darin). Nichtsdestoweniger besteht Handlungsbedarf, um die Lücke zu schließen zwischen der Forschung einerseits und andererseits dem tatsächlichen Einsatz statistischer Formmodelle für die Bildsegmentierung in einer als Medizinprodukt zugelassenen Software. Denn erst das Schließen dieser Lücke ermöglicht den Einsatz dieser Technologie für die Diagnostik, Behandlung oder Therapie von Patienten und damit zu deren Vorteil. Die in dieser Arbeit adressierten Fragestellungen bezüglich

- der automatisierten Modellerstellung,
- dem Zusammenhang zwischen Modellerstellung und Segmentierungsgüte sowie
- der automatischen Segmentierung

sollen helfen, dieses Ziel zu erreichen.

1.2 Gliederung und eigene Beiträge

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Im Anschluss an die vorliegende Einführung wird in Kapitel 2 ein genereller Überblick über deformierbare Modelle gegeben. Außerdem werden Grundlagen bezüglich Formen und deren Repräsentation erörtert und die Methoden der linearen statistischen Formmodellierung und Formrekonstruktion formal eingeführt. Des Weiteren wird die Korrespondenzfindung diskutiert, welche die wesentliche Herausforderung bei der Modellerstellung darstellt. In diesem Zusammenhang werden der neuartige, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und in den Konferenzbeiträgen [P11, P18] veröffentlichte Distmin-Algorithmus sowie die wesentlichen Aspekte der populationsbasierten Korrespondenzoptimierung vorgestellt.

Die populationsbasierte Korrespondenzoptimierung ist ein wesentlicher Baustein für die daran anschließende Evaluierung der Korrespondenzgüte in Kapitel 3. Aufbauend auf der Evaluierungsmethodik, welche erstmals auf der Konferenz *International Symposium on Biomedical Imaging* vorgestellt wurde [P5], werden dort in einer hochschulübergreifenden Studie zwischen der TU Darmstadt, Fachbereich Graphisch-Interaktive Systeme (GRIS) und der Universität zu Lübeck, Institut für Medizintechnik, der Grad

der Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussfaktoren auf die Korrespondenzoptimierung experimentell evaluiert. Die Ergebnisse zur Bedeutung einer geeigneten Initialisierung, wobei sich das in dieser Arbeit entwickelte Distmin-Verfahren als vorteilhaft herauskristallisierte, wurde auf der Konferenz *Information Processing in Medical Imaging* vorgestellt [P18]. Weiterhin wird in diesem Kapitel ein neues, auf der Segmentierung von Binärbildern basierendes Evaluierungsverfahren entwickelt. Dieses ermöglicht die unmittelbare Bewertung unterschiedlicher Korrespondenzverfahren für die zu erwartende Segmentierungsgüte und wurde in einem Zeitschriftenartikel veröffentlicht [P14].

In Erweiterung des linearen statistischen Formmodells beschäftigt sich Kapitel 4 mit der nichtlinearen Formmodellierung. Limitierungen des linearen Modells werden anhand artifizieller Daten veranschaulicht und nichtlineare Alternativen diskutiert. Anschließend wird die dem linearen Modell zugrundeliegende Normalverteilungsannahme für unterschiedliche anatomische Strukturen mit Hilfe von univariaten und multivariaten statistischen Testverfahren untersucht. Eine solche Untersuchung erfolgte überhaupt erstmals im Rahmen der vorliegenden Arbeit und wurde zu Teilen in einem Konferenzbeitrag veröffentlicht [P1]. Die Erkenntnisse dieser Evaluierung motivieren die formale Einführung nichtlinearer Methoden der Formmodellierung und Formrekonstruktion, durch die Kapitel 4 abgerundet wird.

In Kapitel 5 wird zunächst der Stand der Technik bezüglich der formmodellbasierten Segmentierung medizinischer Bilddaten diskutiert. Anschließend wird das relaxierte aktive Formmodell eingeführt, ein neuartiger, im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Algorithmus für die formmodellbasierte Segmentierung, der zunächst auf dem *International Symposium on Biomedical Imaging* vorgestellt [P10] und in weiterentwickelter und verbesserter Form als Zeitschriftenartikel veröffentlicht wurde [P12]. Abschließend führt das Kapitel verschiedene Ansätze der Modellierung lokaler Bildmerkmale ein, welche in den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendungen zum Einsatz kommen.

Schließlich werden in Kapitel 6 die zuvor entwickelten Verfahren für die Segmentierung unterschiedlicher anatomischer Strukturen bzw. Organe eingesetzt. Zunächst wird ein neues Verfahren für die vollautomatische Segmentierung des Unterkiefers aus Niedrigdosis-CT-Aufnahmen mit Kegelstrahlgeometrie vorgestellt. Dieses benötigt im Unterschied zu bisherigen Arbeiten weder für die Korrespondenzfindung, noch für die Unterkieferlokalisation, noch für die Segmentierung manuelle Interaktion. Im Rahmen dieser Anwendung wird zudem erstmals der Einfluss des Verfahrens zur Korrespondenzfindung auf die erzielbare Segmentierungsgüte untersucht. Dies stellt eine konsequente Erweiterung der Evaluierungsstudie in Kapitel 3 für reale Applikationen dar. Die genannten Aspekte wurden in unterschiedlichen Konferenzbeiträgen veröffentlicht [P8, P9]. Des Weiteren konnte im Rahmen dieser Anwendung das Potenzial des relaxierten aktiven Formmodells zur Generierung exzellenter Segmentierungsergebnisse demonstriert werden. Eine weitergehende Evaluierung der Robustheit der Unterkiefersegmentierung sowie der Möglichkeit, diese zukünftig in einer als Medizinprodukt zugelassenen Software zu nutzen, erfolgt derzeit bei der Sicat GmbH & Co. KG, Standort Bonn. Im zweiten Teil von Kapi-

tel 6 wird die Segmentierung abdominaler Organe untersucht, wobei das relaxierte aktive Formmodell erfolgreich für simultane Segmentierung unterschiedlicher Organe eingesetzt wird. Diese Multi-Objekt-Segmentierung wurde in Teilen auf Konferenzbeiträgen veröffentlicht [P16, P17]. Motiviert durch die Erkenntnisse aus Kapitel 3 bzw. Kapitel 4 zum Einfluss des Korrespondenzfindung bzw. zur Normalverteilungsannahme, werden in den genannten Applikationen unterschiedliche Korrespondenzverfahren sowohl für die lineare als auch für die nichtlineare Formmodellierung eingesetzt. Aus dem Vergleich der jeweils erzielten Segmentierungsergebnisse wird am Ende von Kapitel 6 zum einen die praktische Relevanz dieser Komponenten bewertet und zum anderen werden zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Das abschließende Kapitel 7 fasst die gewonnenen Erkenntnisse und die geleisteten Entwicklungen zusammen und identifiziert deren Potenzial für zukünftige Anwendungen. Außerdem werden Zielsetzungen für nachfolgende Arbeiten formuliert.

2 Formmodellierung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und Konzepte der statistischen Formmodellierung dargestellt. Statistische Formmodelle (SFM) gehören zu den deformierbaren Modellen, wobei zu dieser Arbeit verwandte Ansätze dieser Kategorie zunächst in Abschnitt 2.1 kurz dargestellt werden. Anschließend erfolgt die Darstellung der den SFM zugrunde liegenden Formrepräsentation (Abschnitt 2.2) sowie die Einführung der statistischen Formmodelle in Abschnitt 2.3. Schließlich wird in Abschnitt 2.4 die Korrespondenzfindung, welche die wesentliche Herausforderung bei der statistischen Formmodellierung darstellt, erörtert.

2.1 Deformierbare Modelle

Die automatische Detektion und Segmentierung von Strukturen in digitalen Bildern ist eine relevante Problemstellung für die Analyse medizinischer Bilddaten. Beispielsweise zeigt Abb. 2.1(a) eine Computertomographie-Aufnahme eines menschlichen Kopfes. Klassischerweise sind bei dieser auf der Schwächung von Röntgenstrahlung basierenden Bildgebungsmodalität [32, 155] die drei Gewebeklassen „Weichgewebe“, „Knochen“ und „Luft“ gut durch die im Bild dargestellten Intensitätswerte unterscheidbar. Von praktischer Relevanz für Diagnose oder Therapie ist allerdings die Identifikation einer oder mehrerer bestimmter anatomischer Strukturen, wie z.B. des Unterkieferknochens (Abb. 2.1(b)). Sofern kein automatisches Verfahren zur Verfügung steht, erfordert dies die manuelle Identifikation der einzelnen, zur interessierenden anatomischen Struktur gehörenden Elemente der Volumenaufnahme bzw. Voxel (von engl.: volume

S. T. Gollmer, *3D-Bildsegmentierung mittels statistischer Formmodelle,*
Aktuelle Forschung Medizintechnik – Latest Research in Medical Engineering,
DOI 10.1007/978-3-658-09811-7_2, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

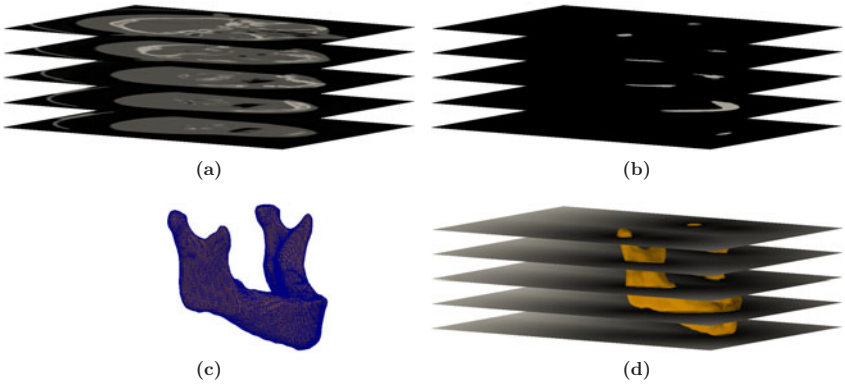

Abb. 2.1: CT-Aufnahme des Kopfes (a) und Segmentierung des Unterkieferknochens (Binärvolumen) (b). Diese (Knochen-) Kontur kann entweder explizit repräsentiert werden, z.B. als Oberflächentriangulierung (c), oder implizit als die Nullstellenmenge (orange markierte Oberfläche) einer Hyperfläche (d), die hier durch den euklidischen Abstand definiert ist.

element in Anlehnung an Pixel für engl.: picture element). Aufgrund unmittelbar benachbarter Strukturen mit ähnlichem Intensitätswert, im Fall des Unterkieferknochens sind dies z.B. die Zähne oder der Oberkieferknochen, ist eine solche Isolation selbst bei einem augenscheinlich unkomplizierten Fall wie in Abb. 2.1(a) mit einfachen Mitteln (z.B. Schwellwert basiert) nicht immer erfolgreich. Weiterhin wird die Bildqualität häufig durch Artefakte oder Bildrauschen negativ beeinflusst, weshalb sich in den letzten Jahren zunehmend modellbasierte Segmentierungsansätze etabliert haben.

Ausgangspunkt für den Einsatz deformierbarer Modelle für die automatische Detektion und Segmentierung von Strukturen in digitalen Bildern ist die wegweisende Arbeit von Kass et al. [158]. Seitdem wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Modellierungsansätze vorgeschlagen. Deren wesentliche Gemeinsamkeit ist die Integration von a priori-Wissen über die gesuchte Struktur, um auf diese Weise die Anpassung des Modells unter Berücksichtigung von geeigneten Bildmerkmalen zu steuern. Die Art des Vorwissens kann dabei von ganz unterschiedlicher Natur sein. Zudem unterscheiden sich die Modelle hinsichtlich der zugrunde liegenden Repräsentation (s. auch Abschnitt 2.2), sowie in der Art und Weise der Anpassung an die Bildinformation. In [221] findet sich eine vergleichende Übersicht unterschiedlicher Modellierungsansätze.

In der Arbeit von Kass et al. [158] wird eine (mindestens) $\mathcal{C}_1$-kontinuierliche, parametrisierte Kontur („Snake“) durch Lösung eines geeigneten Systems partieller Differentialgleichungen (PDEs von engl.: partial differential equations) derart evolviert, dass ein sich aus interner und externer Energie zusammensetzendes Funktional minimiert wird.

Formal bedeutet diese Art der Repräsentation die Abbildung einer Parameterdomäne Ω auf eine Kontur C, $\boldsymbol{\omega} : \Omega \rightarrow C$. Für den Fall, dass die Kontur C eine Kurve repräsentiert, d.h. $C = \boldsymbol{\omega}(\Omega) \subset \mathbb{R}^2$ gilt beispielsweise $\Omega = [0\,,1] \subset \mathbb{R}$. Die Parameterdomäne Ω bietet den Vorteil der Dimensionsreduktion, muss jedoch topologisch mit C übereinstimmen. Die Übertragung des Ansatzes von Kass et al. auf eine Oberfläche erfordert somit die Erstellung einer $\mathcal{C}_1$-kontinuierlichen, zweidimensionalen Parametrisierung. Für dieses nicht-triviale Problem wird in [292] eine Lösung für tubuläre und in [287] für geschlossene Strukturen vorgeschlagen, während der Fourier-basierte Ansatz in [278] für beide Topologien adaptiert werden kann. Dagegen umgehen Delingette et al. [75] das Problem durch die Einführung des sogenannten Simplexnetzes, einer diskreten, frei deformierbaren Oberflächenrepräsentation. Im Simplexnetz wird die aktuelle Position jedes Vertex durch räumlich und zeitlich veränderliche Parameter beschrieben und unter dem Einfluss von internen und externen Kräften evolviert. Ein Simplexnetz ist die topologisch duale Repräsentation einer Oberflächentriangulierung (vgl. Abb. 2.1(c)). Jeder Vertex des Simplexnetzes lässt sich einem Dreieck der entsprechenden Oberflächentriangulierung zuweisen und jede Zelle des Simplexnetzes einem Dreiecksknoten. Die feste Konnektivität der Vertices eines Simplexnetzes bietet den Vorteil, deren Verteilung und damit die Glattheit des Netzes besser kontrollieren und auf diese Weise Einfluss auf die internen Kräfte nehmen zu können [74]. [212] gibt eine Übersicht über frei deformierbare Modelle und deren Anwendungen.

Ein Nachteil parametrischer Modelle ist die Festlegung auf eine bestimmte Topologie in Abhängigkeit von der Parameterdomäne Ω. Um diese Einschränkung zu umgehen, wird in [211] die Einbettung der „Snake“ in eine regelmäßige Gitterstruktur vorgeschlagen und auf Basis dieses Gitters einer iterativen, potenziell topologieveränderlichen Reparametrisierung unterzogen.

Im Gegensatz zu der zuvor skizzierten, expliziten Repräsentation einer Kontur, wird diese bei den nicht-parametrischen Modellen implizit durch die Nullstellenmenge einer skalaren Funktion ω repräsentiert. Formal gilt $\omega : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}, C = \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3 \,|\, \omega(\mathbf{v}) = 0\}$, für den Fall, dass es sich bei der Kontur $C \subset \mathbb{R}^3$ um eine Oberfläche handelt. Im Level-Set-Ansatz [232], der durch [33, 205] in die Computervision und (medizinische) Bildanalyse eingeführt wurde, wird, ähnlich zu den deformierbaren Modellen, eine Kontur durch Minimierung eines Energiefunktionals über die Zeit evolviert. Allerdings wird die Kontur C in einen höherdimensionalen Raum bzw. eine Hyperfläche eingebettet, welche durch die Funktion $\omega(\mathbf{v}) = \mathrm{s}(\mathbf{v})\ \|\mathbf{v} - \boldsymbol{\rho}\|$ definiert ist, wobei $\boldsymbol{\rho} \in C^t$, und C^t ist die Kontur zum Entwicklungszeitpunkt t. Mit $\|\cdot\|$ wird in dieser Arbeit, sofern nicht anders angegeben, die 2-Norm bezeichnet. Die Funktion $\mathrm{s}(\mathbf{v})$ weist allen Punkten $\mathbf{v}$ innerhalb der Kontur ein negatives Vorzeichen zu. Abb. 2.1(d) zeigt diese Funktion exemplarisch für den Unterkieferknochen, allerdings ohne Berücksichtigung des Vorzeichens. Zur besseren Interpretation der Distanzkarte ist die den Knochen repräsentierende Nullstellenmenge orange markiert.