

Kapitel 7

Diskussion und Schlußfolgerung

In den vorangegangenen beiden Kapiteln wurde ein Ansatz zur modellbasierten Bildverarbeitung von MRT- und CT-Daten der Orbita beschrieben und evaluiert. Die modellbasierte Bildverarbeitung umfaßt die Segmentierung, Interpolation und Registrierung der auszuwertenden Datensätze. Die Konzeption der modellbasierten Bildverarbeitung basiert auf der Nutzung von umfangreichem Wissen über das Bildmaterial in Form von Referenzmodellen. Die Referenzmodelle bestehen aus segmentierten Datensätzen, die weitgehend mit dem zu bearbeitenden Bildmaterial übereinstimmen. Das Wissen wird von den Referenzmodellen auf den aktuellen Datensatz übertragen, indem anhand von Landmarken, die im Referenzmodell und dem aktuellen Datensatz vorliegen, beide Datensätze miteinander registriert werden. Die Anwendung des Wissens findet durch die Anwendung des modellbasierten Snake, die oberflächenbasierte Interpolation oder die oberflächenbasierte Registrierung statt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die einzelnen Komponenten, anschließend das Gesamtkonzept des modellbasierten Bildverarbeitungsansatzes beschrieben.

7.1 Modellbasierte Segmentierung

Zur Beurteilung der modellbasierten Segmentierung ist zu untersuchen, inwieweit die in den Abschnitten 2.4 und 2.5 definierten Anforderungen an die Konzeption, Kodierung des Wissens und die allgemeine Performance erfüllt werden.

7.1.1 Konzeption

Es ist die Konzeption der modellbasierten Segmentierung in ihrer funktionalen Struktur zu untersuchen, um festzustellen, inwieweit sie die Anforderungen an ein wissensbasiertes System erfüllt. Entsprechend der einführenden Erläuterungen zu den Grundlagen wissensbasierter Systeme in Abschnitt 3.6 ist die modellbasierte Segmentierung als eine fallbasierte Herangehensweise an das Segmentierungsproblem anzusehen. Dabei besteht das deklarative Wissen aus den Referenzmodellen in der Falldatenbank. Das prozedurale Wissen wurde im Form des modellbasierten Snake umgesetzt und ist in der Lage, das deklarative Wissen kontextspezifisch zur Lösung des aktuellen Bildverarbeitungsproblems anzuwenden. Die Anpassung des Problemlöseverfahrens wird über die Auswahl des Referenzmodells vorgenommen. Die Auswahl des Referenzmodells wird durch die Anwendung von rigiden und weichen Ähnlichkeitskriterien erreicht. Rigide Ähnlichkeitskriterien sind beispielsweise der Bildmodus, die Aufnahmeparameter und die Schichtorientierung. Weiche Ähnlichkeitsparameter sind statistische Parameter wie mittlerer Grauwert und Standardabweichung, die für ausgewählte Bildausschnitte des aktuellen Datensatzes berechnet und mit den Werten der Referenzmodelle verglichen werden.

Auch die in Abschnitt 3.6.2 erwähnten Anforderungen an die Wissensrepräsentation nach Fikes werden durch die modellbasierte Segmentierung weitgehend erfüllt. So werden die typischen dreidimensiona-

len Formen und Konstellationen der Augenstrukturen durch die Referenzmodelle umfassend und direkt nutzbar beschrieben. Ein Punkt, der durch die modellbasierte Segmentierung nicht abgedeckt werden kann, ist der Umgang mit unerwarteten Situationen. Hierunter ist in erster Linie die Segmentierung von unbekanntem Objekten, insbesondere aber auch die Segmentierung der Tumore zu verstehen. Wie bereits erläutert ist die Erscheinungsform von Tumoren so variabel, daß deren Segmentierung nicht ohne weiteres durch einen allgemeinen Algorithmus abgedeckt werden kann. Insofern muß festgestellt werden, daß die Epistemologische Adäquanz (siehe Abschnitt 3.6.3) nicht vollständig erreicht werden konnte. Die Ergonomische Adäquanz ist hingegen aufgrund der leichten Konstruktion und Nutzung der Referenzmodelle durchaus als erfüllt anzusehen.

Anders als bei Clancey [Cla85] gefordert, werden keine interpretativen Zwischenschritte durchgeführt, um das Problemlösungsverfahren dynamisch an das gegebene Bildmaterial anzupassen. Die Umsetzung eines solch komplexen Systems ist als außerordentlich schwierig anzusehen, während die Stabilität aller Voraussicht nach nicht gesichert ist. Stattdessen wird als einziger Problemlösemechanismus der modellbasierte Snake angesetzt. Eine Erweiterung des Ansatzes um weitere Segmentierungsverfahren ist jedoch problemlos möglich. So könnte ohne größeren Arbeitsaufwand ein Region Growing integriert werden, um beispielsweise den Hintergrund zu segmentieren. Unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung wurde im Rahmen dieser Arbeit auf eine solche Erweiterung verzichtet. Eine dynamische Segmentierung ist jedoch in jedem Fall für den Tumor vorzusehen, sollten die Entwicklungsarbeiten fortgesetzt werden. Derzeit muß für die Segmentierung irregulärer Strukturen auf die manuelle Segmentierung zurückgegriffen werden. Aufgrund des vergleichsweise geringen Anteils dieser Strukturen am Gesamtarbeitsaufwand (vergleiche Abschnitt 6.3.1.1), ist diese Einschränkung als akzeptabel anzusehen.

Die modellbasierte Segmentierung ist als weiches Problemlösungsverfahren anzusehen, da auch andere Organe mit diesem Ansatz segmentiert werden können. Die Anpassung an andere Aufgabenfelder ist jedoch an die Regelmäßigkeit der zu segmentierenden Organe gebunden und muß über die Anpassung der Referenzmodelle vorgenommen werden. Zusätzlich zu der flexiblen Auswahl der Referenzmodelle kann der Anwendungsbereich der modellbasierten Segmentierung erweitert werden, indem die Registrierungsfunktion oder der Segmentierungsmechanismus modifiziert wird. Berücksichtigt man außerdem die modulare Trennung von Wissen und Problemlösungsmechanismus, kann festgestellt werden, daß mit dem Entwurf der modellbasierten Segmentierung die für die Konzeption eines wissensbasierten Systems aufgestellten Anforderungen weitgehend erfüllt wurden.

Um festzustellen, inwieweit durch die Definition der Referenzmodelle den in Abschnitt 3.6.3 definierten Anforderungen an die Wissensrepräsentation entsprochen wird, ist vor allem die Konzeption und die Nutzung der Referenzmodelle zu betrachten. Die Wissensrepräsentation mittels Referenzmodellen erwies sich als eine außerordentlich prägnante Form, umfassende Informationen über die allgemeine und individuelle Anatomie, eine korrekte Segmentierung, das der Segmentierung zugrunde liegende Bildmaterial und Variationen in diesen Punkten kodieren zu können. Das Anlegen von Referenzmodellen erfordert keine besonderen Kenntnisse des Benutzers. Liegt ein Datensatz bereits mit seiner korrekten Segmentierung vor, ist nur ein unbedeutender zusätzlicher Arbeitsaufwand nötig, um daraus ein anwendbares Referenzmodell zu erstellen. Die Anpassung des im Referenzmodell kodierten Wissens an einen zu bearbeitenden Datensatz durch die landmarkenbasierte Registrierung arbeitet außerordentlich stabil und weist bereits eine hohe Korrelation mit den korrekten Segmentierungsergebnissen auf (siehe Abschnitt 6.3.2.2). Für die Segmentierung des aktuellen Datensatzes stehen mit dem angepaßten Referenzmodell umfangreiche, konkrete und direkt nutzbare Informationen für die Anfertigung der finalen Segmentierung zur Verfügung. Durch die explizite Kodierung des Wissens in Form einer korrekten Segmentierung werden keine gegebenenfalls verfälschenden oder pauschalisierenden Projektionen des Wissens in abstraktere Darstellungsformen vorgenommen. Auch der Umweg über einen Knowledge Engineer wird damit überflüssig. Darüber hinaus wird ähnlich wie bei MYCIN durch das fallbasierte Lösungskonzept der modellbasierten

Bildverarbeitung eine saubere Trennung vom Wissen und den Verfahren zur Anwendung des Wissens vorgenommen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit der Darstellungsform des Vorwissens über das zu bearbeitende Bildmaterial in Form von Referenzmodellen sämtliche in Abschnitt 3.6.3 definierten Anforderungen an die Wissensrepräsentation erfüllt wurden.

Neben der Erfüllung der konzeptionellen Vorgaben läßt sich der Erfolg der modellbasierten Segmentierung am besten daran messen, inwieweit die angestrebten Zielsetzungen bezüglich der Performance des Systems erreicht wurden. Die Anforderungen an die Performance der modellbasierten Segmentierung lassen sich mit den Schlagworten geringer interaktiver Arbeitsaufwand, hohe Ergebnisqualität, dreidimensionale Segmentierungsstrategie und leichte Anpassung an andere Aufgabenstellungen zusammenfassen. In den nachfolgenden Abschnitten wird untersucht, inwieweit die modellbasierte Segmentierung in diesen Punkten die gestellten Anforderungen erfüllt.

7.1.2 Bewertung der Testergebnisse

Die Segmentierung der Testdatensätze hat gezeigt, daß der manuelle Segmentierungsansatz für zukünftige medizinische Problemstellungen, die unweigerlich mit der Auswertung von immer umfangreichem Bildmaterial verbunden sind, nicht mehr geeignet ist. Es besteht sogar die Gefahr, daß mögliche Neuerungen in der Therapie und Diagnose von Krankheiten nicht genutzt werden können, weil die hierzu erforderliche Bildauswertung den akzeptablen Arbeits- und Kostenrahmen sprengen würde. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der manuellen Segmentierung so inkonsistent, daß eine quantitative Nutzung der Ergebnisse für Therapieplanungen und –simulationen grundlegend in Frage gestellt werden muß. Die Projektpartner haben sogar die Konsistenz der Segmentierungen über die Korrektheit der Segmentierung gestellt, da es die „korrekte Segmentierung“ in medizinischer Hinsicht nicht gibt. Auch bei dem zugrunde liegenden Projekt fällt so umfangreiches Bildmaterial an, daß eine vollständige Nutzung der zur Verfügung stehenden Informationen im Bildmaterial fraglich ist, wenn die Datensätze langfristig manuell segmentiert werden müßten.

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Testergebnisse haben gezeigt, daß die modellbasierte Segmentierung eine aussichtsreiche Option zur Bewältigung dieser Probleme darstellt. Die Konzeption der modellbasierten Segmentierung ermöglicht eine drastische Reduzierung des Arbeitsaufwandes, indem die interaktiven Eingaben auf ein Minimum reduziert werden und aufwendige Berechnungen unüberwacht automatisch durchgeführt werden können. Die wenigen erforderlichen Eingaben beschränken sich auf komplexe Interpretationsprozesse, die allein durch den Menschen mit unübertroffener Korrektheit durchgeführt werden können. Dadurch wird einerseits eine hohe Ergebniskorrektheit der modellbasierten Segmentierung sichergestellt, andererseits die automatische Akquisition von zusätzlichem Wissen ermöglicht. Die modellbasierte Segmentierung nutzt durch die Verwendung der Referenzmodelle umfangreiches anatomisches Vorwissen und explizite Beschreibungen der Darstellungseigenschaften der Organe im jeweiligen Bildmaterial. Das Kodieren des Vorwissens in Form von Referenzmodellen erfordert wenig zusätzlichen Arbeitsaufwand, vermeidet das Verfälschen des Wissens durch abstrakte Beschreibungen und ermöglicht den flexiblen Austausch und die Auswahl von kontextabhängigem Wissen.

Sowohl das Gesamtsystem als auch die einzelnen Module der modellbasierten Segmentierung erwiesen sich als stabil und produzierten gute Ergebnisse. Auswahl und Anpassung der Referenzmodelle zeigten die erwarteten Ergebnisse. Vor allem die zentrale Funktion der landmarkenbasierten Registrierung erreichte allein durch die Anpassung der Referenzsegmentierung an den aktuellen Datensatz außerordentlich gute Segmentierungsergebnisse, die bereits an die Ergebnisse einer interindividuellen Segmentierung heranreichen. Diese guten Anpassungsergebnisse erhöhten die Stabilität des Systems und erlaubten die Verkleinerung der Suchbereiche, wodurch der Rechenaufwand gering gehalten werden konnte. Die mo-

dellbasierte Segmentierung verbesserte die Ergebnisse der landmarkenbasierten Registrierung weiter und erreichte eine hohe Übereinstimmung der berechneten Segmentierungen mit den Mustersegmentierungen, die allein von einer intraindividuellen Segmentierung übertroffen wird.

Die auf den ersten Blick selbstverständliche Feststellung, daß der modellbasierte Snake die Ergebnisse der landmarkenbasierten Registrierung weiter verbesserte ist bei genauerer Betrachtung durchaus als Erfolg zu sehen. Es zeigt, daß das sogenannte globale Minimum des modellbasierten Snake tatsächlich auf die korrekte Segmentierung der Augenstrukturen ausgerichtet ist. Bei der Anwendung eines herkömmlichen Snake wäre stattdessen mit einer Verschlechterung der Ergebnisse der landmarkenbasierten Registrierung zu rechnen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, daß ein nicht unbedeutender Anteil des Abstandes der modellbasierten Segmentierung von der intraindividuellen Segmentierung durch die Unterschiedlichkeit der manuell segmentierten Referenzmodelle verursacht wurde. Gegebenenfalls sind die Ergebnisse sogar besser einzuschätzen als es zunächst die Statistiken im vorangegangenen Kapitel darstellen.

Durch die Verwendung von Registrierungsfunktionen zur Detektion der Objektkanten wird eine individuelle und kontextabhängige Segmentierung ermöglicht. Die entscheidende Problemstellung für den Segmentierungsalgorithmus stellt nicht mehr die Komplexität des Bildmaterials, sondern die Einheitlichkeit der Bildstrukturen dar. Mit dem hier beschriebenen Segmentierungsansatz wird ein Algorithmus vorgestellt, der komplexes Bildmaterial immer dann auswerten kann, sobald adäquate Segmentierungsvorlagen vorhanden sind.

Die guten Ergebnisse der modellbasierten Segmentierung lassen darauf hoffen, daß mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Segmentierungsansatz ein grundsätzliches Segmentierungskonzept entwickelt wurde, das bei weitergehender Optimierung und Ergänzung Ergebnisse erzielt, die der manuellen Segmentierung in der Konsistenz und Korrektheit der Segmentierungen und dem dafür aufzubringenden Arbeitsaufwand überlegen ist. Die aktuellen Entwicklungen auf dem PC-Hardwaremarkt lassen außerdem darauf hoffen, daß die aktuellen Rechenzeiten mittelfristig so weit reduziert werden können, daß eine vollständig interaktive Nutzung des Bildverarbeitungssystems möglich wird. Da bisher bei der Implementation der Algorithmen noch keine Geschwindigkeitsoptimierung vorgenommen wurde, könnte eine deutliche Beschleunigung der Berechnungen durch eine Optimierung der rechenaufwendigen Schritte unterstützt werden. Hierzu gehören die Reduzierung von Funktionsaufrufen, eine Parallelberechnung, die Verwendung von lauffzeitoptimierten Compilern, die Straffung des Programmcodes oder die mögliche Umsetzung von Programmen im Assembler-Code.

Neben diesem positiven Gesamtergebnis zeigten die Tests einige Möglichkeiten auf, um die Ergebnisqualität bei weiterführenden Forschungsarbeiten zu steigern. Einerseits haben die Tests belegt, daß dreidimensionale Segmentierungsstrategien deutlich bessere Segmentierungen ermöglichen als zweidimensionale Ansätze. Andererseits wurde jedoch auch klar, daß die Schichten eines dreidimensionalen Datensatzes nicht mit einem einheitlichen Segmentierungsalgorithmus ausgewertet werden können. Vor allem die gravierenden Unterschiede zwischen den zentralen Schichten des Bulbus und den durch Partialvolumeneffekte stark verfälschten Randschichten zeigten, daß den kontextabhängigen Bildeigenschaften mit lokalen Interpretationsmechanismen begegnet werden muß. Es ist davon auszugehen, daß eine Segmentierung des Bulbus in den durch Partialvolumeneffekten verfälschten Schichten anhand des Bildmaterials nicht möglich ist. Um die Bulbusoberfläche in diesen Schichten dennoch zu rekonstruieren, könnten die fehlenden Oberflächensegmente anhand der zuverlässigen Segmentierungen aus den zentralen Schichten des Bulbus fortgesetzt werden. Hierzu wäre die Anwendung eines geeigneten Oberflächensplines notwendig, der in den Schichten des Datensatzes, in denen eine Segmentierung nicht möglich ist, die Oberfläche nach anatomischen Gesichtspunkten sinnvoll ergänzt. Die Umsetzung eines solchen Oberflächensplines ist jedoch nicht trivial. Vor allem die Definition der Anpassungsvorschriften und der lokalen Kontrolle der Spline-

Funktion stellen ein komplexes Problem dar. Die Anpassung der Oberflächensegmente des Referenzmodells müßte durch anatomisch sinnvolle Vorgaben bezüglich der Transformationsfreiheitsgrade eingegrenzt werden. Die Einhaltung solcher Transformationsfreiheitsgrade ist außerordentlich wichtig, um sicherzustellen, daß keine anatomisch unmöglichen Verzerrungen der Organoberflächen erzeugt werden. Wie eine solche Oberflächenanpassung umgesetzt werden müßte und welche Freiheitsgrade wie eingeschränkt werden müßten, könnte in weiterführenden Forschungsprojekten untersucht werden.

Die Rekonstruktion von Objektoberflächen durch Verwendung von Oberflächensplines ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn das rekonstruierte Oberflächensegment eine regelmäßige Struktur aufweist. Sofern der Tumor in den Randschichten lokalisiert ist, wäre eine Rekonstruktion von Bulbus und Tumor in diesem Bereich nicht sinnvoll. Diese Problemstellung wird jedoch bereits während der Bildakquisition vermieden, indem die Schichtausrichtung derart vorgegeben wird, daß die Bilddaten den Tumor möglichst orthogonal schneiden.

Neben den Partialvolumeneffekten hat sich gezeigt, daß vor allem das Plazieren der Landmarken fünf und sechs die Korrektheit der berechneten Segmentierungen in den Randschichten maßgeblich beeinflusst. Unterschiede bei der Eingabe dieser Landmarken führen unweigerlich zu umfassenden Abweichungen bei den Segmentierungsergebnissen, da diese Eingaben vorgeben, in welcher Schicht segmentiert wird und in welcher Schicht nicht. Neben dem grundsätzlichen Problem, daß einheitliche Regeln entwickelt werden müssen, um MRT-Daten auszuwerten, wäre gegebenenfalls die Entwicklung eines Algorithmus sinnvoll, der den Benutzer bei der Bestimmung der korrekten Berandung unterstützt.

Erschwerend wies sich in diesem Zusammenhang die Tatsache aus, daß nicht in allen Datensätzen das Auge vollständig durch das Datensatzvolumen eingefafßt wurde. Dadurch wurde eine korrekte Anpassung des Modells an den Datensatz unmöglich, was sich wiederum direkt auf die Segmentierungsergebnisse auswirkte. Zur Behebung dieses Problems müßten entweder die Aufnahmebedingungen der Datensätze vereinheitlicht werden oder alternative Anpassungsstrategien entwickelt werden, bei denen eine flexible Auswahl der verwendeten Landmarken möglich ist. Generell muß jedoch davon ausgegangen werden, daß die Konturen der angepaßten Referenzsegmentierung in den Randschichten aufgrund der schwierigeren Bildeigenschaften deutlich weiter von den korrekten Konturen entfernt sind als in den zentralen Schichten. Diesem Problem sollte beim modellbasierten Snake dadurch begegnet werden, daß der Suchraum in diesen Schichten größer gewählt wird als in den zentralen Schichten. Dies birgt natürlich auch die Gefahr in sich, daß die Segmentierung im ungünstigen Fall noch weiter von der korrekten Segmentierung weg wandern kann. Eine dreidimensionale Einbeziehung aller Segmentierungskonturen scheint daher ebenfalls sinnvoll zu sein, um die Konsistenz der Gesamtsegmentierung zu erhöhen.

Bei der Anwendung des modellbasierten Snake hat sich gezeigt, daß nicht nur in den Randschichten, sondern auch in den zentralen Schichten die lokalen Variationen des Bildmaterials so ausgeprägt sind, daß dadurch die Ergebnisse beeinträchtigt werden. Es scheint daher sinnvoll zu sein, eine kontextspezifische Auswahl der Punkte vorzunehmen, die für die Berechnung der externen Energie herangezogen werden, um dadurch die Stabilität des Algorithmus weiter zu erhöhen. Hierzu wäre die Entwicklung von Verfahren notwendig, die lokale Bildeigenschaften qualitativ und quantitativ beschreiben und dadurch eine Auswahl der geeigneten Punkte erlauben.

Neben den funktionalen Aspekten der modellbasierten Segmentierung wurden im Rahmen der Entwicklungsarbeiten eine Reihe weiterer Erkenntnisse offensichtlich. Die Testergebnisse der CT-Daten haben gezeigt, daß eine Segmentierung der Augenstrukturen in den CT-Daten nicht sinnvoll ist. Sowohl die interindividuelle als auch die intraindividuelle Segmentierung wiesen beträchtliche Unterschiede in den segmentierten Oberflächen auf. Der Grund für diese Segmentierungsprobleme ist in dem außerordentlich geringen Grauwertkontrast im Bereich der anatomischen Strukturen der Orbita zu sehen, der eine Segmentierung wesentlicher Abschnitte des Auges anhand des Bildmaterials unmöglich macht. Da zur Kom-

pensation der fehlenden Informationen die Bulbus-Kontur lediglich aufgrund von unzuverlässigen und fragwürdigen Plausibilitätsüberlegungen ergänzt werden kann, scheint eine sinnvolle Nutzung der CT-Daten für die Rekonstruktion des Augenmodells nicht möglich zu sein. Von Interesse ist stattdessen die landmarkenbasierte Registrierung der Ergebnisse der MRT-Daten mit jenen der CT-Daten, um die zuverlässige Rekonstruktion der anatomischen Strukturen aus den MRT-Daten mit der Beschreibung der Absorptionseigenschaften der Gewebestrukturen aus den CT-Daten zu kombinieren. Dabei ist jedoch darauf zu achten, daß bei dieser Registrierung das Augenmodell aus den MRT-Daten lediglich in der Orientierung und der Position an den CT-Datensatz angepaßt wird, um eine Verfälschung der Segmentierung zu vermeiden.

Jedoch auch mit den aktuell vorliegenden hochaufgelösten MRT-Daten wird die für das Projekt zunächst geforderte Genauigkeit des Modells im Millimeterbereich nicht erreicht werden. Der Grund hierfür liegt weniger in der Auflösung der Datensätze an sich als vielmehr in der Tatsache, daß das aktuelle Bildmaterial nicht eine Identifikationsgenauigkeit im Millimeterbereich erlaubt. Artefakte, ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis und das nicht eindeutige Verhältnis zwischen Grauwerten und Gewebeidentitäten sind nur einige Gründe, warum trotz des verbesserten Bildmaterials eine präzise Zuordnung der Bildpixel zu den verschiedenen Organstrukturen nicht möglich ist. Um dieses Ziel mittelfristig zu erreichen ist es nicht nur notwendig, die Bildverarbeitungsalgorithmen allein weiter zu entwickeln. Stattdessen müssen auch Richtlinien für eine korrekte Segmentierung entwickelt werden, die eine eindeutige Identifikation und damit Segmentierung der Augenstrukturen ermöglichen. Solange diese Segmentierungsrichtlinien nicht vorliegen, können auch keine Segmentierungsverfahren angewandt werden, die eine entsprechend korrekte Segmentierung anfertigen können. Selbst bei den konsultierten ophthalmologischen Fachkräften waren die interindividuellen Segmentierungsansätze außerordentlich unterschiedlich und unterlagen ausgeprägten individuellen und nicht objektiven Interpretationsstrategien, die auch beträchtlichen zeitlichen Schwankungen unterliegen.

7.1.3 Oberflächendesign und Benutzerfreundlichkeit

Vor der Durchführung von Tests mit unterschiedlichen Testpersonen wurde eine kurze Einweisung von zirka drei Minuten vorgenommen. Bei den sich anschließenden Tests hat keine Testperson länger als ein bis zwei Versuche benötigt, um den Umgang mit der Software und die Nutzung der modellbasierten Segmentierung zu erlernen. Für die Durchführung dieser zwei Tests wurden in der Regel weniger als eine Minute benötigt. Damit war eine vollständige Nutzung der modellbasierten Segmentierung nach bereits fünf Minuten möglich. In Anbetracht der Komplexität der Aufgabenstellung ist diese kurze Lernphase eine Bestätigung der beabsichtigten hohen Benutzerfreundlichkeit der modellbasierten Bildverarbeitung.

Damit scheint sich einerseits die Konzeption der Softwareoberfläche, andererseits aber auch die Konzeption der modellbasierten Segmentierung zu bestätigen. Die Beschränkung der manuellen Eingaben auf Informationen, die zu erarbeiten für die Bildverarbeitungssoftware außerordentlich schwierig wären, für die Testpersonen hingegen vergleichsweise einfach waren, verhindert ein Ermüden der Nutzer aufgrund von eintönigen und anspruchslosen Segmentierungsarbeiten. Andererseits schienen die mit wenig Arbeitsaufwand verbundenen Ergebnisse ein gewisses Interesse der Testpersonen für die Bildverarbeitung zu erzeugen. Unter Berücksichtigung dieser Erfahrung ist davon auszugehen, daß die Anforderungen an die Software bezüglich Oberflächendesign und Benutzerfreundlichkeit erfüllt wurden.

7.1.4 Anpassung an andere Aufgabenstellungen

Bei der Festlegung der Zielsetzungen für den in dieser Arbeit entwickelten Bildverarbeitungsansatz wurde unter anderem gefordert, daß die Algorithmen leicht an unterschiedliche Aufgabenstellungen angepaßt werden können. Aufgrund der modularen Konzeption der modellbasierten Bildverarbeitung können sämt-

liche Verfahrensmodule wie beispielsweise das Bestimmen des Bildkontextes, das Übertragen des Vorwissens und das Anwenden des Wissens individuell an variierende Bild- und Organeigenschaften angepaßt werden. Die einzige Einschränkung stellt die Voraussetzung dar, daß das zu segmentierende Organ eine mehr oder weniger einheitliche Anatomie besitzt.

Die wichtigste funktionale Einheit zur Bestimmung des Bildkontextes stellt die landmarkenbasierte Registrierung dar. Die guten Ergebnisse des in dieser Arbeit beschriebenen proprietären Anpassungsverfahrens resultieren unter anderem aus der Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Anatomie des Auges und des zugrunde gelegten Bildmaterials. Dementsprechend wird das Bestimmen des Bildkontextes bei anderem Bildmaterial vor allem von der konzeptionellen Anpassung der landmarkenbasierten Registrierung an die veränderten Bedingungen der Anatomie und des Bildmaterials abhängen. Eine solche Anpassung des Registrierungsverfahrens ist vor allem dann angezeigt, wenn das zu segmentierende Organ spezifische Variationseigenschaften in Form und Größe aufweist, die von den weitgehend symmetrischen Veränderungen des Auges abweichen. Sollten beispielsweise Bilddaten von Leber oder Gehirn mit der modellbasierten Segmentierung ausgewertet werden, wäre ein Anpassungsverfahren sinnvoll, das die typische Ausbildung der Leberlappen oder der einzelnen Sulci und Gehirnhälften berücksichtigt. Insbesondere beim Gehirn wäre es notwendig, lokale Transformationen zur Anpassung an unterschiedliche Sulci-Ausprägungen zu berücksichtigen. Bei der Definition der Ähnlichkeitskriterien hingegen sollten die typischen Variationen der Bildeigenschaften bei der Darstellung der Organgrenzen berücksichtigt werden.

Die Anpassung des Referenzmodells an den aktuellen Datensatz wird wie das Bestimmen des Bildkontextes maßgeblich durch die landmarkenbasierte Registrierung beeinflusst. In der Regel werden keine weiterführenden Änderungen gegenüber dem Verfahren zur Bestimmung des Bildkontextes notwendig sein. Die Berechnung der korrespondierenden Bildschichten muß nur dann verändert werden, falls sich der grundsätzliche Charakter des Bildmaterials verändern sollte. Für die Auswertung von CT- und MRT-Daten werden aller Voraussicht nach jedoch keine Weiterentwicklungen erforderlich sein.

Ein großer Spielraum für die Anpassung an unterschiedliche Aufgabenstellungen bietet die Anwendung des Wissens durch den modellbasierten Snake. Um diesen Verarbeitungsschritt an unterschiedliches Bildmaterial und Organe anzupassen, kann die Definition der internen und externen Energie grundsätzlich modifiziert werden. Bei der internen Energie kann beispielsweise die Bewertung von globalen und lokalen Konturänderungen anders als bei dem hier dargestellten Ansatz gewichtet werden. Bei dem Gehirn können beispielsweise lokale translatorische Verschiebungen der einzelnen Sulci als übliche Variation akzeptiert, das Ausbleiben von Sulci jedoch bestraft werden. Bei der Segmentierung der Leber hingegen könnten verwinkelte Organkonturen besonders stark bestraft werden, während globale Vergrößerungen oder Verkleinerungen nicht zu einer Veränderung der Kraftvektoren führt. Bei der Definition der externen Energie könnten Such- und Referenzbereich an die Textur- oder Grauwerteigenschaften des Bildmaterials und die typischen Modifikationen lokaler Konturelemente angepaßt werden. Durch die Verwendung einer anderen Korrelationsfunktion als Mutual Informationen kann gezielt auf sich verändernde Bild- oder Objekteigenschaften eingegangen werden. Die Anwendung der Kreuzkorrelation könnte beispielsweise bei der Verwendung von Bildmaterial mit einheitlichen Grauwerteigenschaften sinnvoll sein. Cepstrale Korrelationsfunktionen könnten gegebenenfalls bei Bildmaterial, das in erste Linie Kanten und klare Grauwertübergänge abbildet, vorteilhafter als andere Korrelationsfunktionen sein.

Welche Teilalgorithmen der modellbasierten Segmentierung in welcher Form an sich ändernde Aufgabenstellungen angepaßt werden, sollte individuell und auf der Basis von komparativen Untersuchungen der Segmentierungsergebnisse festgestellt werden. Selbst bei der Segmentierung des in dieser Arbeit gegebenen Bildmaterials existiert noch ein beträchtlicher Spielraum, die Segmentierungsergebnisse und die Performance zu optimieren. Ein interessanter Ansatzpunkt ist dabei vor allem bei der Definition der internen und externen Energie des modellbasierten Snake zu sehen. Die flexiblen Definitionsmöglichkeiten

der Energien ermöglichen eine Anpassung an die spezifischen Oberflächen- und Darstellungseigenschaften des Auges oder anderer Organe. Darüber hinaus stellt die Auswertung der Randschichten eine über die Segmentierung hinausgehende Problemstellung dar. Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit müssen solche weitergehenden Untersuchungen auf nachfolgende Forschungsvorhaben verschoben werden. Tests mit Kernspindaten vom Gehirn zeigten, daß der aktuelle Entwurf für die modellbasierte Segmentierung ein sehr hohes Maß an Stabilität und Ergebnisqualität bietet.

7.1.5 Gesamtbeurteilung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die an die modellbasierte Segmentierung gerichteten Anforderungen erfüllt wurden. Der interaktive Arbeitsaufwand zur Nutzung der modellbasierten Bildverarbeitung ist einschließlich der Nachbearbeitung deutlich geringer als der Aufwand, der für eine entsprechende manuelle Segmentierung aufgebracht werden müßte. Die erreichte Ergebnisqualität ist so hoch, daß die Übereinstimmung mit den Mustersegmentierungen größer sind als jene zwischen interindividuellen manuellen Segmentierungen. Gegenüber der manuellen Segmentierung weist die modellbasierte Segmentierung außerdem ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit und Konsistenz der Segmentierungsergebnisse auf. Eine weiterführende Optimierung und Stabilisierung der Ergebnisqualität könnte zu weiteren Einsparungen des Arbeitsaufwandes führen, indem der Aufwand für die Nachbearbeitung weiter reduziert wird.

Diese bereits erreichten Einsparungen im Arbeitsaufwand wirken sich nicht nur positiv auf den Kostenaufwand der Bildverarbeitung aus, sondern auch auf die Bereitschaft der klinischen Partner, die aufwendigen Bildverarbeitungsschritte durchzuführen. Damit könnte die semi-automatische modellbasierte Bildverarbeitung eine wichtige Grundlage für die Nutzung der Vorteile moderner medizinischer Bildverarbeitung darstellen.

7.1.6 Aussicht

Durch die modulare Struktur bestehen vielfältige Möglichkeiten, den modellbasierten Bildverarbeitungsansatz weitergehend zu optimieren. Vor allem der dreidimensionale Charakter des Segmentierungsproblems wird in dieser Arbeit bisher nur durch die Anpassung der Referenzmodelle an den aktuellen Datensatz ausgenutzt. Es bestehen jedoch mehrere Optionen, auch in anderen funktionalen Bereichen die spezifischen Eigenschaften der Organe und des Bildmaterials zu nutzen.

Das bereits erwähnte Problem mit der Segmentierung der Randschichten der Organe kann nicht nur während der Registrierung von Referenzmodell und aktuellem Datensatz durch einen Oberflächenspline angegangen werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den modellbasierten Snake sowohl in der Definition der internen als auch der externen Energie auf die dritte Dimension zu erweitern. Bei der internen Energie könnten die Verbindungen zwischen den zweidimensionalen Segmentierungskonturen genutzt werden, um nicht nur eine Kontinuität innerhalb, sondern auch zwischen den Schichten sicherzustellen. Auf diese Weise könnten die Segmentierungsprobleme in den Randschichten reduziert werden, indem die zuverlässigen Ergebniskonturen der zentralen Organschichten bei der Segmentierung der Randschichten einbezogen werden. Dadurch könnte einerseits die hohe Ergebnisqualität der Segmentierung auf die Randschichten übertragen werden, andererseits könnten lokalen Variationen in den Bildeigenschaften, beispielsweise durch Artefakte, stabiler begegnet werden. Darüber hinaus könnten Suchbereiche, Referenzbereiche, Registrierungsfunktionen und andere Parameter für die einzelnen Bereiche der Organe individuell angepaßt und gegebenenfalls über das Referenzmodell oder den Systementwurf definiert werden.

Langfristig erscheint sogar die Möglichkeit realistisch, den modellbasierten Bildverarbeitungsansatz vollständig zu automatisieren, indem Verfahren zur automatischen Detektion der Landmarken entwickelt werden. Dieses bereits in der medizinischen Bildverarbeitung behandelte Thema der automatischen Er-

kennung von anatomischen Landmarken hat zwar bisher noch nicht die Ergebnisse gezeigt, die für die Ersetzung des Benutzers bei der Platzierung der Landmarken im aktuellen Datensatz erforderlich wären. Aufgrund der bereits im Header des zu bearbeitenden Datensatzes enthaltenen Informationen über Bildmodus, Schichtorientierungen und das dargestellte Organ bestehen jedoch durchaus realistische Ansatzpunkte für die Umsetzung neuer Ansätze zu Lokalisation der gesuchten Landmarken. So könnten beispielsweise die Landmarken dadurch bestimmt werden, daß aus zuvor bestimmten Referenzmodellen Referenzvolumina vorgegeben werden, die dann anhand von geeigneten Registrierungsfunktionen im aktuellen Datensatz gesucht werden. Die Erfolgsaussichten eines solchen Ansatzes sind besser als bei einem auf pauschalen Kriterien basierenden Verfahren, das nach Kanten oder spezifischen Grauwertstrukturen sucht.

Aufgrund der Erfahrungen mit der manuellen Segmentierung der Testdatensätze besteht die begründete Hoffnung, daß mit dem in dieser Arbeit beschriebenen modellbasierten Bildverarbeitungsansatz bei weiterer Optimierung sogar bessere Ergebnisse erzielt werden können als mit der intraindividuellen Segmentierung. Vor allem bei Datensätzen oder Bildschichten mit geringem Grauwertkontrast oder verschwommenen Konturen war die manuelle Segmentierung deutlich erschwert, da ein Einzeichnen der Augenstrukturen allein anhand der Grauwerte nicht mehr möglich war. Stattdessen mußte in vielen Fällen die globale und regionale Form des bisher segmentierten Organs einbezogen werden, um den möglichen Verlauf der korrekten Segmentierungskontur zu erraten. In vielen Fällen mußte man etwas vom Bild wegtreten, um die globale Objektform zu erkennen. Zusätzlich mußte das Problem gelöst werden, daß es Menschen unmöglich ist, lokale Grauwerteigenschaften, regionale und globale Konturform gleichzeitig und gleichberechtigt bei der Segmentierung zu berücksichtigen (vergleiche Abschnitt 3.1). Das Hauptaugenmerk wechselte regelmäßig zwischen diesen drei Teilaspekten hin und her. Eine Berücksichtigung der angrenzenden Schichten erleichterte die Aufgabe nur bedingt, da aus den zusätzlichen Konturen nicht die dreidimensionale Form des bisher segmentierten Organs ersichtlich war.

Der Computer hingegen ist bei geschickter Programmierung in der Lage, beliebig viele und beliebig unterschiedliche Parameter gleichzeitig auszuwerten und bei der Segmentierung zu berücksichtigen. Der modellbasierte Snake bietet dementsprechend umfangreiche Möglichkeiten, diese unterschiedlichen Parameter durch die Definition der internen und externen Energie bei der Segmentierung einfließen zu lassen. Da mit diesen beiden Faktoren zumindest theoretisch die Anforderungen erfüllt sind, um ein Bildverarbeitungssystem zu entwickeln, das der manuellen Segmentierung durch einen Menschen überlegen ist, sollte es ausschließlich eine Frage der methodischen Weiterentwicklung sein, ob die modellbasierte Bildverarbeitung zu einem solchen Segmentierungswerkzeug wird.

7.2 Modellbasierte Interpolation

Mit der Umsetzung der modellbasierten Interpolation konnten ähnlich wie für die modellbasierte Segmentierung die Anforderungen bezüglich Arbeitsaufwand und Ergebnisqualität erfüllt werden. Durch die Konzeption der modellbasierten Interpolation und die Verwendungen des oberflächenbasierten Interpolationsansatzes kommt allein durch die Eingabe der Landmarken ein Interpolationsverfahren zur Anwendung, das entsprechend der aktuellen Literatur derzeit die besten Ergebnisse bei der Interpolation von medizinischen Datensätzen erzielt (vergleiche Abschnitt 3.10). Der für die Durchführung erforderliche Arbeitsaufwand ist dabei so gering wie bei keinem anderen Ansatz der aktuellen Literatur.

7.3 Modellbasierte Registrierung

Nach den Ergebnissen der aktuellen Literatur bieten oberflächenbasierte Registrierungsverfahren eine hohe Ergebnisqualität, sind jedoch mit einem hohen Interaktionsaufwand oder mit komplexen Matching-Verfahren verbunden (vergleiche Abschnitt 3.11). Durch die Konzeption der modellbasierten Registrie-

rung können die guten Ergebnisse der oberflächenbasierten Registrierungsverfahren mit einem geringen Arbeitsaufwand erzielt werden. Durch die direkte Korrelation der segmentierten Oberflächen über ein gemeinsames Referenzmodell werden umfangreiche primäre Korrespondenzvektoren erzeugt, ohne daß dabei die Verfälschung eines Matching-Verfahrens in Kauf genommen wird. Da jeder Oberflächenpunkt der Segmentierung des einen Datensatzes mit genau einem Punkt im zweiten Datensatz korrespondiert, wird sichergestellt, daß ausschließlich anatomisch übereinstimmende Strukturen miteinander korreliert werden. Dadurch kann gleichzeitig die Qualität der Registrierung optimiert und der für die Konstruktion der Oberflächenkorrespondenzen erforderliche Arbeitsaufwand minimiert werden.

7.4 Beurteilung des Gesamtkonzeptes

Der in dieser Arbeit beschriebene Ansatz zur modellbasierten Bildverarbeitung weicht von den in der aktuellen Literatur beschriebenen Vorgehensweisen ab, indem das Vorwissen über das Bildmaterial und der algorithmische Entwurf der Bildverarbeitungsverfahren modular voneinander getrennt wurden. Darüber hinaus wurde mit der Verwendung von Korrelationsfunktionen zur Positionierung der Segmentierungskontur beim modellbasierten Snake die feste Vorgabe der relevanten Segmentierungskriterien aufgegeben. Korrekte Segmentierungsergebnisse können unabhängig davon erzielt werden, ob sich das gesuchte Objekt durch spezifische Grauwertspektren, Kanten oder Texturen vom Rest des Bildes abgrenzt. Zusätzlich ermöglicht die modellbasierte Bildverarbeitung die flexible Anpassung des Betrachtungsraumes, der bei der Segmentierung einbezogen wird. Anstatt die Segmentierungskriterien allein auf ein Pixel oder auf das ganze Bild anzuwenden, kann mit der Definition von Such- und Referenzbereich auf die individuellen Darstellungseigenschaften des Bildmaterials und der dargestellten Organe eingegangen werden.

Durch die Verwendung von Referenzmodellen konnte eine einfache Repräsentation des für die Bildverarbeitung notwendigen Wissens erreicht werden. Sämtliche mit der Akkumulation und Nutzung des Wissens verbundenen Arbeitsschritte wie Erstellen, Sammeln und Übertragen des Wissens auf aktuelle Datensätze können ohne spezielle Vorkenntnisse des Benutzers mit wenig Aufwand vorgenommen werden. Die hohe Stabilität der modellbasierten Bildverarbeitung ermöglicht eine hohe Benutzerfreundlichkeit bei der Umsetzung der Software, die sich in kurzen Einarbeitungszeitungen und einer hohen Konsistenz der Ergebnisse widerspiegelt.

Der erforderliche Interaktionsaufwand war durchweg deutlich geringer als bei einer entsprechenden manuellen Segmentierung. Die Ergebnisqualität war andererseits vergleichbar gut, so daß nur eine geringe, in einigen Fällen sogar keine Nachbearbeitung der Segmentierungskonturen erforderlich wurde. Positiv ist außerdem die Reproduzierbarkeit und Konsistenz der Ergebnisse zu beurteilen.

Die klare Trennung von deklarativem Wissen in Form von Referenzmodellen und prozeduralem Wissen in Form der angewandten Bildverarbeitungsalgorithmen erlaubt ebenfalls eine leichte Anpassung und Erweiterung der modellbasierten Bildverarbeitung auf andere Anwendungsbereiche, in denen das zu segmentierende Objekt Regelmäßigkeiten bezüglich der Form und der Darstellungseigenschaften aufweist.

Darüber hinaus wird ein beträchtlicher Zugewinn durch die enge Integration von Segmentierung, Interpolation und Registrierung erreicht. Die Ergebnisse der Einzelverfahren können untereinander synergetisch genutzt werden, ohne daß damit ein zusätzlicher Arbeitsaufwand verbunden wäre. Der Arbeitsaufwand für sämtliche Verarbeitungsschritte besteht lediglich in der Eingabe der Landmarken in sämtliche Datensätze, die segmentiert und miteinander registriert werden sollen. Alle weiteren Schritte werden automatisch durchgeführt und machen keine funktionellen Eingriffe durch den Benutzer erforderlich. Auf der anderen Seite kommen mit der oberflächenbasierten Interpolation und Registrierung die derzeit erfolgreichsten Verfahren zur Interpolation und Registrierung von multimodalen Datensätzen zu Anwendung.

Die Neuartigkeit der in dieser Arbeit beschriebenen modellbasierten Bildverarbeitung besteht vor allem in dem Ausmaß, in dem Vorwissen über das auszuwertende Bildmaterial genutzt wird. Es wird nicht nur das Wissen über die Form des zu segmentierenden Organs oder die Eigenschaften des zugrunde liegenden Bildmaterials ausgenutzt. Es wird auch nicht das gleiche Vorwissen auf alle Datensätze in gleicher Weise angewandt. Stattdessen nutzt die Bildverarbeitung gleichzeitig anatomische Eigenschaften, Oberflächeneigenschaften und die typische Erscheinungsform der dargestellten Strukturen aus. Es werden keine pauschalen Annahmen über Form und Darstellung vorausgesetzt, sondern die Informationen direkt aus Musterlösungen bezogen. Darüber hinaus wird das Wissen individuell durch die automatische Auswahl eines geeigneten Referenzmodells an den aktuellen Datensatz angepaßt. In dieser Weise stellt die hier beschriebene modellbasierte Bildverarbeitung eine Symbiose von Konzepten der Künstlichen Intelligenz und bekannten Ansätzen der medizinischen Bildverarbeitung dar, die in dieser Form einen neuen Bildverarbeitungsansatz bildet.