Modellbasierte Rekonstruktion von Organoberflächen auf der Basis von zweidimensionalen Schnittdaten

Sebastian von Klinski, Andreas Glausch, Claus Derz und Thomas Tolxdorff

Institut für Medizinische Statistik, Epidemiologie und Informatik
Universitätsklinikum Benjamin Franklin (UKBF)
Freie Universität Berlin, Hindenburgdamm 30, D-12200 Berlin
Email: vonklinski@medizin.fu-berlin.de

Zusammenfassung. Für die Durchführung einer oberflächenbasierten Interpolation, Registrierung, Bestrahlungsplanung und Visualisierung ist eine präzise Rekonstruktion der Organoberflächen unverzichtbar. Hierzu müssen die zweidimensionalen Segmentierungen in CT- oder MRT-Schnittdaten für eine Rekonstruktion der Oberflächen herangezogen werden. Aktuelle Rekonstruktionsalgorithmen basieren auf der Anwendung von Triangulationsverfahren, die anhand von globalen Regelvorgaben die Korrelation der Umrißlinien vornehmen. Die verbundenen Umrißlinien stellen die rekonstruierte Organoberfläche dar. Die Oberflächeneigenschaften variieren jedoch zwischen anatomischen Strukturen wie Knochen, Gehirn oder Bulbus. Wir haben daher einen modellbasierten Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt, der unter anderem durch die Verwendung von anatomischen Spline-Modellen an die Oberflächeneigenschaften der jeweiligen Organe angepaßt werden kann und aufgrund von Artefakten fehlenden Informationen kompensiert.

Schlüsselwörter: Modellbasierte Rekonstruktion, Registrierung, Interpolation

1 Einleitung

Aktuelle Rekonstruktionsalgorithmen basieren auf der Anwendung von Triangulationsverfahren, die anhand von globalen Regelvorgaben die zweidimensionalen Umrißlinien miteinander korrelieren. Die in der Literatur beschriebenen Triangulationsansätze können in Optimierungsverfahren [1,2], Delauny Triangulation [3], und topologiebasierte Verfahren [4] unterteilt werden. Alle Verfahren verfolgen globale und vertikal ausgerichtete Korrelationsansätze, die auf jedes Objekt gleichermaßen angewandt werden. Diese Verfahren können nicht an die Unterschiede in den Oberflächeneigenschaften zwischen den einzelnen anatomischen Strukturen wie Knochen, Gehirn oder Bulbus angepaßt werden. Es können weder Metallartefakte, Partialvolumeneffekte oder fehlende Bereiche kompensiert werden, noch werden die meist runden Objektformen korrekt rekonstruiert.

Um eine stabile und präzise Rekonstruktion der Organoberflächen möglich zu machen, ist eine angepaßte Rekonstruktion notwendig, die darüber hinaus in der Lage ist, auf spezifische Darstellungseigenschaften und Artefakte einzugehen.

Wir haben einen modellbasierten Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt, der Spline-Modelle der jeweiligen anatomischen Strukturen an die Segmentierungen anpaßt und dabei Artefakte und fehlende Bereiche kompensiert. Wichtiges a priori Wissen über die jeweilige Anatomie wird durch die Parametrisierung des Modells in seiner Form, der lokalen Kantenstruktur und den Freiheitsgraden der Modellparameter integriert. Darüber hinaus kann der Benutzer durch interaktive Eingaben von Korrespondenzen die Korrelation der Konturen und Oberflächen gezielt ausrichten.

2 Methoden

Die gesamte Verarbeitungspipeline zur modellbasierten Rekonstruktion ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

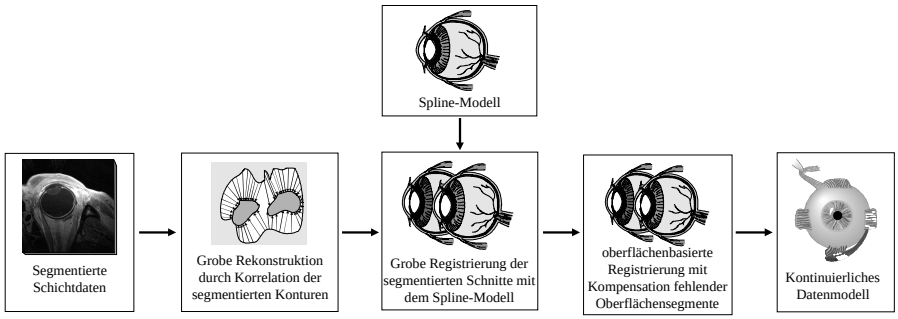

Abbildung 2.1: Verarbeitungspipeline zur modellbasierten Rekonstruktion.

Im ersten Schritt wird eine grobe Rekonstruktion der Objektoberflächen auf der Basis der zweidimensionalen Segmentierungen durchgeführt. Dabei werden die Konturen angrenzender Schichten miteinander korreliert und zu Oberflächen zusammengefaßt. Die Korrespondenzvektoren der Korrelation werden in einem iterativem Prozeß durch die Optimierung eines von uns entworfenen Parameters, dem „Degree of Correspondence“ (DOC), gewonnen. Der DOC beschreibt den Grad der Übereinstimmung der Umrißlinien in zwei betrachteten Punkten und beinhaltet Orientierungsdifferenz, Distanz und Vektorwinkel (siehe Abbildung 2.2a):

$$DOC(a,b) = F_{Dist} e^{-\sigma_{Dist}\alpha_{Dist}} + F_{Orientdiff} e^{-\sigma_{Orientdiff}\alpha_{Orientdiff}} F_{Vektwink} e^{-\sigma_{Vektwink}\alpha_{Vektwink}} \quad (1)$$

a und b sind die betrachteten Punkte. Dist steht als Abkürzung für Distanz, Orientdiff für Orientierungsdifferenz und Vektwink für Vektorwinkel. F_{Dist}, $F_{Orientdiff}$ und $F_{Vektwink}$ sind Normierungsfaktoren für die Wichtung der jeweiligen Parameter. $б_{Dist}$, $б_{Orientdiff}$ und $б_{Vektwink}$ sind Normierungsfaktoren für die Exponentialfunktion. Sie sind so konditioniert, daß die e-Funktion ihr Maximum dort hat, wo der jeweilige Parameter seinen optimalen Wert annimmt. Optimale Werte sind die minimale Distanz, eine Orientierungsdifferenz von null Grad und ein Vektorwinkel von 90 Grad (siehe Abbildung 2.2a).

Bei dieser ersten Rekonstruktion der Organoberflächen kann durch manuelle Vorgabe von Korrespondenzvektoren die Korrelation der Umrißlinien beliebig ausgerichtet werden. Sinnvoll ist diese Vorgehensweise beispielsweise bei stark gefalteten Objekten, deren Falten von Schicht zu Schicht durch eine translatorische Verschiebung leicht verwechselt werden können, da keine eindeutigen topologischen Referenzen gegeben sind. Dieses Problem würde beispielsweise bei der Rekonstruktion des Gehirns auftreten, bei der die verschiedenen Sulci schnell verwechselt und somit fälschlich verbunden werden könnten. Durch die Vorgabe von zusammengehörigen Falten kann ein Springen der Rekonstruktionslinien zwischen den einzelnen Sulci und ein vertikales Verwischen der Oberflächenstrukturen vermieden werden.
Im zweiten Schritt wird eine grobe Registrierung der so gewonnen Oberflächen mit den Spline-Modellen vorgenommen. Die Modelle werden durch den Catmull-Rom Oberflächen-Spline beschrieben. Sie bestehen aus Referenzpunkten, deren Anzahl beliebig gewählt werden kann, und Richtungsvektoren, die die lokale Krümmung und Oberflächenform bestimmen. Vorbereitend werden zunächst für alle Objekte die Massenzentren berechnet. Anschließend werden objektweise die Massenzentren der Segmentierungen und des jeweiligen Modells gematcht, um den translatorischen Unterschied zu kompensieren. Danach werden zwei weitere Massenzentren andere Objektstrukturen herangezogen, um den Rotationsunterschied zu eliminieren. Anschließend wird eine Anpassung der Skalierung vorgenommen. Hierzu wird die Massenträgheit der segmentierten Oberfläche und der korrespondierenden Modelloberfläche berechnet und durch Skalierung des Gesamtmodells angepaßt. Da bei dieser Berechnung nur die korrespondierenden Oberflächensegmente des Modells zu der segmentierten Oberfläche betrachtet werden dürfen, werden die korrespondierenden Massenpunkte durch Verlängerung der Strecke Massenzentrum-Oberflächenpunkt ermittelt (siehe Abbildung 2.2b).

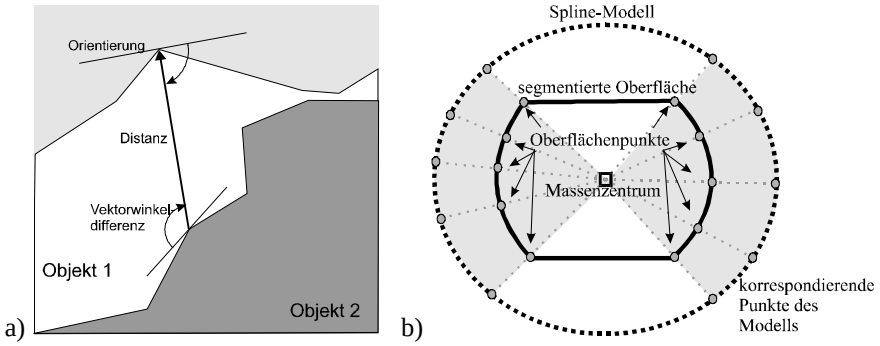

Abbildung 2.2: a) Die Parameter des DOC zur Korrelation der segmentierten Konturen.
b) Berechnung der korrespondierenden Punkte auf der Modelloberfläche für die globale Skalierung.

Im dritten Schritt wird eine oberflächenbasierte Registrierung für die Feinanpassung durchgeführt. Sie wird getrennt für die korrespondierenden Oberflächen und für die Lücken in dem segmentierten Modell durchgeführt. Die korrespondierenden Oberflächen des Spline-Modells werden durch Anwendung des auf drei Dimensionen erwei-

terten DOC mit der segmentierten Oberfläche korreliert. Anschließend wird die Modelloberfläche entlang der Korrespondenzvektoren auf die segmentierte Oberfläche „gemorpht“, um eine kontinuierliche Beschreibung der Oberflächen unabhängig von den segmentierten Konturen zu erreichen. Hierzu werden die Korrespondenzvektoren mittels Radial-Basis-Interpolation für das gesamte Modell berechnet und auf die Oberflächenpunkte inklusive der Richtungsvektoren angewandt. Fehlende Oberflächensegmente werden anschließend detektiert und um die entsprechenden, angepaßten Segmente des Spline-Modells ergänzt. Auf diese Weise können auch bei sehr unvollständigen Segmentierungen eine Übereinstimmung der Gesamtoberfläche mit dem anatomischen Modell sichergestellt werden. Fehlende Oberflächensegmente werden ermittelt, indem jene Polygone in der Oberfläche ausgewählt werden, deren Flächen oberhalb eines vorgegebenen Schwellwertes liegen, oder wenn eine Kontur keiner korrespondierenden Kontur in der anliegenden Schicht zugewiesen ist. Auf diese Weise gefundene Lücken im Oberflächenmodell werden durch das entsprechende Segment des bereits registrierten Spline-Modells geschlossen. Um das Oberflächensegment des Modells an die segmentierte Oberfläche anzupassen wird eine Skalierung des Modellsegments auf der Basis der Größenproportion der beiden Grenzflächen vorgenommen. Anschließend werden die beiden Grenzkonturen mittels DOC miteinander korreliert. Die Korrelation wird mittels Radial-Basis-Interpolation auf die gesamte Schnittfläche erweitert und dann vertikal auf das gesamte Modell-Segment angewandt. Das auf diese Weise angepaßte Oberflächensegment wird dann mit der Oberfläche zu einem Gesamtmodell zusammengefügt (vergleiche Abbildung 2.3).

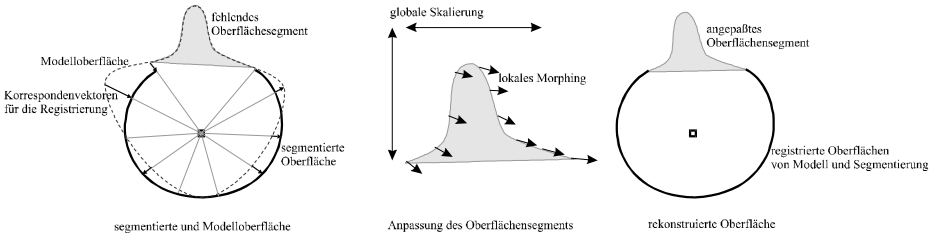

Abbildung 2.3: Modellbasierte Rekonstruktion der Oberfläche. Ersetzen der Segmentierungslücke durch Anpassung des Modellsegments.

3 Ergebnisse

Die in diesem Artikel beschriebene modellbasierte Rekonstruktion wurde im Rahmen eines Projektes mit dem Thema „Bildverarbeitung für die Bestrahlungsplanung von Augentumoren“ entwickelt. Die Aufgabenstellung bestand in der modellbasierten Segmentierung, oberflächenbasierten Interpolation und Registrierung von CT- und MRT-Daten. Die modellbasierte Rekonstruktion wurde auf den Orbitabereich von CT-Schnittbildern des Kopfes und auf hochaufgelösten MRT-Daten der Orbita angewandt. Relevante Strukturen sind Bulbus, Linse, Sehnerv, Cornea und auf der Bulbusoberfläche aufgenähte Marker. Typische Hindernisse bei der Rekonstruktion stellen Partialvolumeneffekte bei Bulbus, Linse und Sehnerv, und Artefakte durch die Marker dar.

Das Modell des Bulbus bestand aus dem Gullstrandschen Normalauge, die Linse aus einem konvexem Linsenmodell, der Sehnerv aus einem Tubusmodell und die Marker aus einem Zylinder mit vorgegebenem Durchmesser und Höhe. Die Grobregistrierung wurde anhand der Massenzentren von Bulbus, Linse und dem Ansatzpunkt des Sehnervs ermittelt. Die Skalierung des Gesamtmodells wurde durch Normierung des Bulbus erreicht. Bei der Feinregistrierung wurden jeweils noch die einzelnen Objekte anhand ihrer eigenen Oberflächen normiert. Die modellbasierte Rekonstruktion konnte erfolgreich für die Segmentierung, die oberflächenbasierte Interpolation und die oberflächenbasierte Registrierung angewandt werden. Durch die weitgehend einheitliche Anatomie der betreffenden Strukturen konnten die Segmentierungsergebnisse gegenüber herkömmlichen Verfahren verbessert werden, indem lediglich Bilder mit sehr guten Darstellungseigenschaften für die Rekonstruktion der Objektoberflächen herangezogen wurden. Durch die kontinuierliche und von Löchern befreiten Oberflächen konnten sehr gute Interpolationsergebnisse gewonnen werden und Artefakte wie Partialvolumeneffekt kompensiert werden. Da trotz der grundsätzlich unterschiedlichen Bildeigenschaften von CT- und MRT-Daten alle Strukturen durch die Modelle mit gleicher Qualität rekonstruiert wurden, wies auch die oberflächenbasierte Registrierung deutlich bessere Ergebnisse auf, als bei herkömmlicher Rekonstruktion (siehe Abbildung 3.1).

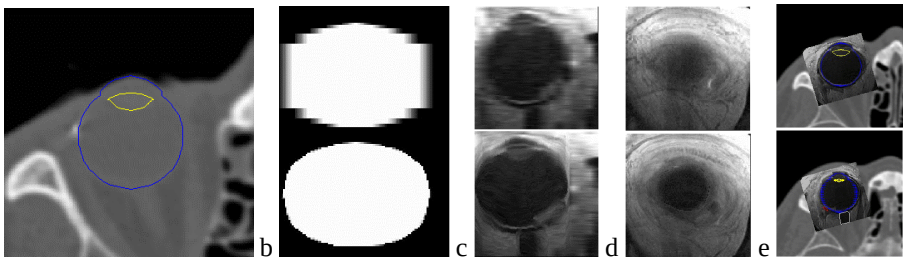

Abbildung 3.1: a) Modellbasierte Segmentierung b) Modellbasierte Interpolation von synthetischen Daten c) Modellbasierte Interpolation MRT-Daten d) Kompensation von Partialvolumeneffekten e) Registrierung von CT- und MRT-Daten

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Projektes unter der Fördernummer (To 108/7-1).

4 Literatur

1. H Fuchs, ZM Kedem, and SP Uselton. Optimal Surface Reconstruction form Planar Contours. Communications of the ACM, 20:693-702, 1977
2. S Ganapathy and TG Dennehy. A New General Triangulation Method for Planar Contours. Computer Graphics, 16:69-75, 1982
3. J-D Boissonnat. Shape Reconstruction from Planar Cross Sections. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 44:1-29, 1988
4. K Anjyo, T Ochi, Y Usami, and Y Kawashima. A Practical Method of Constructing Surfaces In Three-dimensional Digitized Space. The Visual Computer, 3:4-12, 1987