

Parametrisierung geschlossener Oberflächen für die Erzeugung von 3D-Formmodellen

Mareike Schönig, Tobias Heimann und Hans-Peter Meinzer

Abteilung für Medizinische und Biologische Informatik,
Deutsches Krebsforschungszentrum, 69120 Heidelberg
Email: m.schoenig@dkfz.de

Zusammenfassung. Statistische Formmodelle sind eine populäre Methode um den Segmentierungsprozess in der medizinischen Bildverarbeitung zu automatisieren. Dafür ist es notwendig, zuerst korrespondierende Landmarken auf den Oberflächen von Trainingsformen zu finden. Ein erfolgversprechender automatischer Ansatz hierzu [1] basiert auf Parametrisierungen: Dabei werden die dreidimensionalen Punkte auf den Trainingsformen zweidimensionalen Punkten auf der Einheitskugel zugeordnet. In dieser Arbeit erweitern wir ein Parametrisierungsverfahren für Voxeldaten [2] auf triangulierte Gitternetze. Durch Nutzung von Diffusionsgleichungen entsteht ein einfaches, schnelles und robustes Parametrisierungsverfahren. Damit können wir statistische Modelle auch von Formen wie dem Unterkieferknochen erzeugen, für die der bisher verwendete Parametrisierungsalgorithmus keine Lösung fand.

1 Einleitung

Die Segmentierung von 3D-Daten ist in der medizinischen Bildverarbeitung ein essentieller Schritt für die Diagnose- und Therapieunterstützung bei der Behandlung von Tumorpatienten. Ein rein manueller Segmentierungsprozess nimmt viel Zeit in Anspruch, während automatische Verfahren oftmals ungenügende Ergebnisse liefern. Als vielversprechende automatische Methode sollen in der Abteilung MBI des DKFZ statistische Formmodelle [3] für die Organsegmentierung eingesetzt werden.

Um statistische Formmodelle zu erzeugen, werden eine Anzahl von Trainingsdatensätzen benötigt, aus denen jeweils das gleiche Organ vorsegmentiert wurde. Mit Hilfe des Marching-Cubes-Algorithmus entsteht pro Trainingsdatensatz ein trianguliertes Gitternetzmodell (Mesh), welches die Oberfläche des segmentierten Organs darstellt. Auf den unterschiedlichen Formen der Trainingsdatensätze müssen nun eine Anzahl korrespondierende Punkte (Landmarken) gefunden werden, aus denen das statistische Formmodell erzeugt wird. Ein erfolgreiches Verfahren zur automatischen Erzeugung von Landmarken [1] basiert auf Parametrisierungen: Hierbei wird jedem beliebigen Punkt auf dem Mesh ein anderer Punkt auf der Einheitskugel zugeordnet. Über die inverse Funktion kann eine Menge von Punkten von der Kugeloberfläche auf die parametrisierten Meshes abgebildet werden. In [1] werden die initialen Parametrisierungen mit Hilfe von Warping

modifiziert, um die minimale Beschreibungslänge (MDL) zu minimieren und die optimal korrespondierenden Landmarken zu erstellen. Voraussetzung ist, dass zuerst eine initiale Parametrisierung für jeden Trainingsmesh erstellt wird.

2 Stand der Forschung und Fortschritt durch den Beitrag

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Ansätze für die Parametrisierung von geschlossenen dreidimensionalen Objektflächen [4]. Bei der Erstellung von Parametrisierungen sind zwei Eigenschaften von Bedeutung: Winkel- und Flächentreue. Bei triangulierten Meshes bilden drei Punkte auf der Oberfläche des Organs ein Dreieck, welches pro Ecke einen bestimmten Winkel aufweist und eine spezifische Fläche hat. Geht durch die Parametrisierung einer dieser Werte verloren, ist die Parametrisierung winkel- oder flächenverzerrend. Im Allgemeinen kann maximal eine der beiden Eigenschaften erhalten werden.

Gu et al. [5] beschreiben ein einfaches Verfahren für winkeltreue Parametrisierungen, welches in der Praxis aber für stark konkave Formen (wie Unterkieferknochen) nicht funktioniert. Die Methode nach [2] ist ebenso einfach und sogar robuster als [5], doch bisher nur für Voxeldaten beschrieben. In diesem Beitrag wird das Verfahren auf triangulierte Gitternetzmodelle erweitert. Es ist auf Genus-0 Topologien (kugelförmige Oberflächen) beschränkt.

3 Methoden

Der Parametrisierungsvorgang nach [2] gliedert sich in drei Schritte: Initialisierung, Breitengrad- und Längengradbestimmung. Zuerst werden bei der Initialisierung zwei Punkte des Meshes als Nord- bzw. Südpol bestimmt (p_n und p_s). In dieser Arbeit verwenden wir dafür die beiden Punkte mit dem größten Abstand bezüglich der x-Achse.

Das Problem der Breitengradbestimmung kann durch die Laplace'sche Gleichung

$$\nabla^2 \cdot \theta = 0 \quad (1)$$

formal beschrieben werden. Im diskreten Fall wird es durch Differenzen approximiert und durch folgendes Gleichungssystem dargestellt:

$$A \cdot \theta = \mathbf{b} \quad (2)$$

Jeder Punkt $p(i)$ hat über die von ihm ausgehenden Kanten eine Menge $N(i)$ direkter Nachbarnpunkte. Während bei dem Originalverfahren (auf isotropen Voxeldaten) alle Kanten gleich lang sind, weisen wir den Kanten im Mesh individuelle Gewichte entsprechend dem Kehrwert ihrer Länge zu. Für die Matrix A gilt: An die Diagonale a_{ii} wird die Summe der Kantengewichte zu den direkten Nachbarn gesetzt:

$$a_{ii} = \sum_{j \in N(i)} \frac{1}{|p(i) - p(j)|} \quad (3)$$

Das negative Gewicht der Kante zwischen dem Punkt $p(i)$ und dem Nachbar $p(j)$ wird in a_{ij} geschrieben:

$$a_{ij} = -\frac{1}{|p(i) - p(j)|} \quad (4)$$

Der Vektor \mathbf{b} erhält in allen Zeilen i , die direkte Nachbarn des Südpols sind, das Produkt aus π und dem Gewicht der Kante zwischen ihnen.

$$\mathbf{b}_i = \frac{\pi}{|p(i) - p_s|} \quad (5)$$

Der Rest wird auf 0 gesetzt. Der Lösungsvektor $\boldsymbol{\theta}$ des Gleichungssystems 2 spezifiziert dann für jeden Punkt im Mesh den zugehörigen Breitengrad.

Für das Problem der Längengradbestimmung kann ebenfalls Gleichung 1 genutzt werden. Es gilt:

$$C \cdot \boldsymbol{\phi} = \mathbf{d} \quad (6)$$

Für Matrix C gilt: Die Werte von A werden übernommen und etwas modifiziert. Für Punkte $p(i)$, die direkte Nachbarn des Nord- bzw. Südpols sind, wird das Gewicht zwischen dem Punkt und dem jeweiligen Pol von der Diagonalen abgezogen, also

$$c_{ii} = a_{ii} - \frac{1}{|p(i) - p_s|} \quad (7)$$

für den Südpol und entsprechend für den Nordpol p_n . Wegen der Regularität muss die additive Konstante $2\phi_1 = 0$ zu einer beliebigen Zeile summiert werden. Im Gegensatz zum Breitengrad ist der Längengrad ϕ ein zyklischer Parameter. Der Längengrad nimmt im Verlauf auf einer Breitengradlinie stetig bis 2π zu und fällt am Nullmeridian auf 0 zurück. Dieser Meridian umfasst alle Punkte, an denen der Längengrad den Wert 0 besitzt und windet sich vom Nord- zum Südpol. Die Berechnung des Vektors \mathbf{d} hängt vom Verlauf des Nullmeridians ab.

Der Nullmeridian wird mit Hilfe von drei Kontrollpunkten (*here*, *prevPos* und *nextPos*) bestimmt. Von *here* ausgehend wird *nextPos* als direkter Nachbar mit dem größten Breitengrad gewählt; *prevPos* ist der direkte vorangehende Punkt auf dem Meridian. Das erste *here* ist breitengradhöchster, direkter Nachbar des Nordpols. Dies wird solange wiederholt, bis die Wahl von *nextPos* auf den Südpol trifft. Die Ansammlung von *here* spezifiziert die Punkte des Nullmeridians auf dem triangulierten Gitternetzmodell.

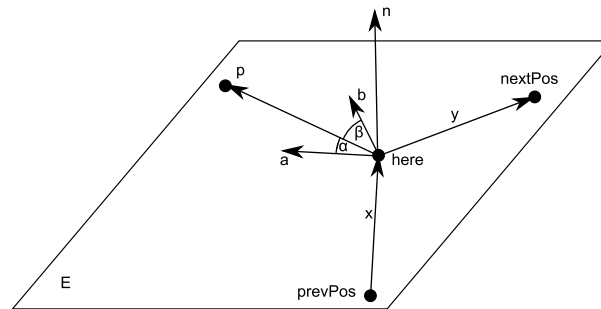
Punkte $p(i)$, die auf dem Nullmeridian liegen, reduzieren die Werte aus b_i für den Vektor d_i um 2π multipliziert mit dem Gewicht der Kante. Es gilt:

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{b}_i - \sum_{j \in N_{ost}(i)} \frac{2\pi}{|p(i) - p(j)|} \quad (8)$$

Die direkten östlichen Nachbarn $N_{ost}(i)$ der Punkte des Nullmeridians $p(i)$ dagegen addieren 2π multipliziert mit dem Gewicht der Kante zwischen den Nachbarpunkten $p(j)$:

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{b}_j + \frac{2\pi}{|p(i) - p(j)|} \quad (9)$$

Abb. 1. Skizze zur Bestimmung der Punkte östlich des Nullmeridians



Um zu erkennen, ob ein Nachbarpunkt östlich oder westlich des Nullmeridians liegt, haben wir folgendes Verfahren entwickelt: Jeder Punkt auf dem Nullmeridian besitzt einen Normalenvektor \mathbf{n} zu einer durch seine Nachbarn festgelegten Ebene E (siehe Abb. 1). Mit den Vektoren \mathbf{x} und \mathbf{y} aus den nach E projizierten Punkten $prevPos$ und $nextPos$ wird $\mathbf{a} = \mathbf{n} \times \mathbf{x}$ und $\mathbf{b} = \mathbf{n} \times \mathbf{y}$ berechnet. In dieser Situation kann \mathbf{a} links von \mathbf{b} liegen oder umgekehrt. Ist das Ergebnis von $(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{n} < 0$, so liegt \mathbf{a} links von \mathbf{b} . Tritt ein Skalarwert > 0 auf, liegt \mathbf{a} rechts von \mathbf{b} . Der zu überprüfende Nachbarpunkt wird nach E projiziert und dort als \mathbf{p} bezeichnet. Zu \mathbf{a} bildet er den Winkel α und zu \mathbf{b} den Winkel β . \mathbf{p} liegt östlich des Meridians, wenn \mathbf{a} links von \mathbf{b} liegt und gilt:

$$\alpha < \frac{\Pi}{2} \vee \beta < \frac{\Pi}{2} \quad (10)$$

Liegt \mathbf{a} rechts von \mathbf{b} , dann liegt \mathbf{p} östlich des Nullmeridians falls:

$$\alpha < \frac{\Pi}{2} \wedge \beta < \frac{\Pi}{2} \quad (11)$$

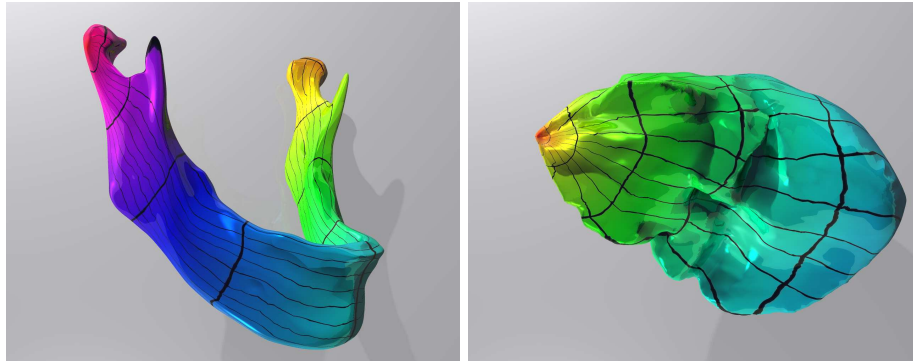
4 Ergebnisse

Das beschriebene Parametrisierungsverfahren wurde auf Oberflächenmodellen von mehreren anatomischen Formen getestet, u.a. Leber, Lungenflügel und Unterkieferknochen. Für die Leber und den Unterkieferknochen sind die berechneten Längen- und Breitengrade in 2 visualisiert. Der zeitliche Aufwand einer Parametrisierung hängt proportional von der Anzahl der gegebenen Punkte im Mesh ab und dauert nur wenige Sekunden.

5 Diskussion

Die vorgestellte Methode ist ein einfaches, schnelles und robustes Verfahren für die Parametrisierung von triangulierten Gitternetzen. Auch die Oberflächen, bei

Abb. 2. Verlauf der Breiten- und Längengrade auf einer Leber und einem Unterkieferknochen. Die Breitengrade sind zusätzlich farblich von rot zu gelb kodiert



denen das iterative Verfahren nach [5] bisher nicht konvergierte, können so parametrisiert werden und für die Erstellung von statistischen Formmodellen genutzt werden.

Um mit dem beschriebenen Verfahren noch weniger verzerrte Ergebnisse zu erzielen, werden wir in Zukunft die Auswahl der beiden Pole zu Beginn des Verfahrens optimieren: Die beiden Punkte, die unter allen Punkten im Mesh den maximalen geodätischen Abstand zueinander haben, führen zur minimalsten Verzerrung. Diese beiden Punkte können z.B. mit einer Graphensuche auf dem Gitternetz des Meshes gefunden werden. Eine exakte Aufrechterhaltung der Winkel- und Flächentreue ist für die in [1] verwendete Methode nicht notwendig, da im nachfolgenden Schritt der Korrespondenzoptimierung alle Parametrisierungen sowieso modifiziert werden.

Literaturverzeichnis

1. Heimann T, Wolf I, Williams T, Meinzer HP. 3D active shape models using gradient descent optimization of description length. In: Procs IPMI; 2005. 566–577.
2. Brechbühler C, Gerig G, Kübler O. Parametrization of closed surfaces for 3-D shape description. *Comp Vis Image Underst* 1995;61:154–170.
3. Cootes TF, Taylor CJ, Cooper DH, Graham J. Active shape models: Their training and application. *Comp Vis Image Underst* 1995;61(1):38–59.
4. Floater MS, Hormann K. Surface parameterization: A tutorial and survey. In: Dodgson NA, Floater MS, Sabin MA, editors. *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling. Mathematics and Visualization*. Springer; 2005. 157–186.
5. Gu X, Wang Y, Chan TF, Thompson PM, Yau ST. Genus zero surface conformal mapping and its application to brain surface mapping. In: Procs IPMI; 2003. 172–184.