Erstellung eines statistischen Atlas des Craniums

S. Däuber[1], P. Heinze[1], R. Krempien[2], T. Welzel[2], J. Brief[3], St. Hassfeld[3], H. Wörn[1]

[1]Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Universität Karlsruhe (TH)
[2]Institut für Klinische Radiologie, Universität Heidelberg
[3]Mund-Kiefer-Gesichts-Chirurgie, Universität Heidelberg
Email: daeuber@ira.uka.de

Zusammenfassung. Umstellungsosteotomien dienen in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie zur Rekonstruktion sowohl der Funktion als auch der gesund erscheinenden Optik u.a. des Schädels. Sog. normative Daten unterstützen dabei die Planung und Simulation der Eingriffe. Diese werden i.d.R. mit Hilfe von Landmarken erstellt. Insbesondere am Hinterkopf ist jedoch die Anzahl der homologen Landmarken beschränkt, weshalb die Methode zur Erstellung eines Atlasses typischer Schädelformen als normative Daten nicht geeignet erscheint. In dieser Arbeit stellen wir ein Verfahren vor, dass mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen und der Reihenentwicklung einer Formfunktion, das Landmarkenproblem am Schädel lösen kann.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Skelettstrukturen des Kopfes können aus verschiedenen Gründen geschädigt sein. Unfälle, Tumorresektionen oder (bei Kleinkindern) durch sog. Craniosynosthosen, frühzeitige Verknöcherungen einer oder mehrerer Schädelnähte, die u.a. zu einer Missbildung der Schädelknochen führen.

Ziel eines operativen Eingriffs ist es, sowohl eine funktionale als auch eine optische Rekonstruktion des Schädels zu erreichen. In der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie an der Universität Heidelberg werden in sog. Umstellungsosteotomien, einzelne Knochensegmente des Schädels osteotomiert, verformt und in einer Konfiguration refixiert, die den funktionalen und optischen Anforderungen entspricht. Bei der Rekonstruktion des Schädels nach optischen Gesichtspunkten lässt sich der Chirurg von seiner Erfahrung und seinem ästhetischen Empfinden leiten. Das Ergebnis ist grundsätzlich subjektiv.

In dieser Arbeit sollen Referenzmodelle (Dreiecksnetze) des Schädels erstellt werden, die die typische, gesunde Form der Schädelknochen repräsentieren. Diese sog. normativen Daten sollen den Chirurgen bei der Rekonstruktion einer möglichst natürlichen und harmonischer Schädelform in objektiver Weise unterstützen. Altobelli et. al [1] konstatieren das Fehlen solcher normativer Daten als größtes Hindernis in der Planung und Simulation kraniofazialer Eingriffe.

1.2 Stand der Technik

Verschiedene Autoren schlagen daher Methoden vor, objektive Informationen über die Form oder Anatomie medizinischer Strukturen zu erstellen. Popovich et al. verwenden z.B. genormte Fernröntgenseitenaufnahmen zur Wachstumskontrolle (Burlington Growth Study). In der sogenannten Kephalometrie werden seit 80 Jahren Längen- und Winkelmessungen anhand zweidimensionaler Röntgenaufnahmen vorgenommen und mit Normlängen und Normwinkeln einer morphologisch unauffälligen Gruppe verglichen.

Die weitaus meisten Arbeiten beschäftigen sich mit Landmarken. Christensen et al. [5] erstellten einen Atlas des Schädels, bei dem das Wissen über Form und Anatomie durch 26 Landmarken und den segmentierten Einzelknochen repräsentiert wird. Andere Arbeiten finden sich bei [2,3,7]. Grundsätzlich treten hierbei zwei Probleme auf:

- *Stochastik*: Die Auswahl der Landmarken definiert die erfasste Form. Um eine genaue Beschreibung der Form zu erreichen, benötigt man daher eine große Anzahl von Landmarken, die gleichmäßig über das Objekt verteilt sind. Eine vollständige Form-Beschreibung des Objektes ist nicht möglich.
- *Homologie-Problem*: Die Landmarken lassen sich nicht immer sicher in allen Datensätzen wiederfinden.

1.3 Ziele

In dieser Arbeit sollen die Referenzmodelle aus dem Formdurchschnitt einer Reihe von, als CT vorliegenden, physiologischer (gesunder) Schädel gebildet werden. Da unterschiedliche Schädelformen auch unabhängig von „äußeren“ Klassifizierungsmerkmalen wie Alter und Geschlecht zu erwarten sind [6], sollen idealerweise auch unterschiedliche Formtypen erkannt werden, um eine möglichst differenzierte Klassifizierung zu erhalten. Endziel ist eine Referenzdatenbank, die einem individuellen Patienten ein Referenzmodell des Schädels zuordnet, der in der Planung des chirurgischen Eingriffs als objektiver Anhaltspunkt für das Operationsziel hinsichtlich der Schädelform dient.

Wir schlagen ein Landmarken-freies, deterministisches, vollautomatisches Verfahren vor. Es ist in der Lage, die Form eines beliebigen Objektes durch einen automatischen (keine Interaktion notwendig) Algorithmus vollständig mathematisch zu erfassen. Es ermöglicht die statistische Behandlung der Form des Objektes, d.h. Mittelwertbildung und Klassifikation.

2 Methode

Ausgangspunkt der Berechnungen sind Tomographien des Kopfes, d.h. dreidimensionale Voxelbilder. In einer Reihe von Arbeitsschritten wird nun ein Modell des Schädels erstellt. Dabei handelt es sich um ein Dreiecksnetz, das mit Hilfe des Marching Cubes Algorithmus aus den vorher segmentierten Bilddaten erstellt wird. Um die Durchschnittsformen zu berechnen und um die Formen zu klassifizieren, be-

Abb. 1: Mittelwertbildung eines Würfels und einer Pyramide

nötigt man eine mathematische Beschreibung der Form, die statistische Operationen möglich macht.

Eine solche Beschreibung stellt die Entwicklung der interessierenden Form in eine Reihe dar. Dies geschieht durch eine lineare Transformation der Dreiecksnetze (vgl. Taylorreihe, Fourierreihe). Als Basisfunktionen verwenden wir Kugelflächenfunktionen, die auf Grund der Ähnlichkeit des Schädels mit einer Kugel die kanonische Wahl sind. Die Entwicklungskoeffizienten bezeichnen wir als Formparameter [8].

Die Mittelwertbildung erfolgt nun durch direkte Mittelung der Formparameter und anschließende Rekonstruktion des Dreiecksnetzes durch Umkehrung der Reihenentwicklung.

Zur Klassifikation wird ein hochdimensionaler Formenraum durch die Kugelflächenfunktionen aufgespannt. Eine Form nimmt in diesem Raum genau einen Punkt ein. Nun werden alle vorhanden Schädel in diesen Raum eingetragen. Durch statistische Auswertung der Abstände lassen sich nun Häufungen der Formen im Formenraum erkennen und klassifizieren. Eine Häufung (Cluster) entspricht einem bestimmten Formentyp. Die Referenzform wird nun durch Mittelwertbildung aller im Cluster enthaltenen Formen oder durch den Schwerpunkt bestimmt.

3 Ergebnisse

Die Arbeit ist Teil des Projektes „Aufbereitung medizinischer Bilddaten“ des Sonderforschungsbereichs 414 „Rechner- und sensorgestützte Chirurgie“. Es wurden bereits Methoden zur o.g. Reihenentwicklung erstellt. Da die Reihenentwicklung praktischerweise nur mit einer endlichen Anzahl von Entwicklungskoeffizienten durchgeführt werden kann, wurden die Schädel zunächst in die Formparameter zerlegt und anschließend wieder rekonstruiert. Die Güte der Zerlegung erschließt sich dabei durch den Vergleich der Originalform und der, aus den Formparametern rekonstruierten Form. Es zeigt sich, dass die Entwicklung in etwa 10^3 Formparameter eine ausreichend genaue Beschreibung (Abweichungen < 1mm) der Form resultiert. Für höhere Genauigkeitsanforderungen kann die Berechnung beliebig fortgesetzt werden, wobei eine Limitierung nur durch Speicherbedarf und Rechenzeit gegeben ist. Augenblickliche Arbeiten beschäftigen sich mit der Reduzierung der Anzahl der

notwendigen Formparameter, um die statistische Analyse im Formenraum zu erleichtern.

Mit den Formparametern lassen sich bereits Mittelwertformen berechnen und visualisieren. Abbildung 1 verdeutlich den Prozess am Beispiel einfacher geometrischer Objekte. Dabei wurde das Formmittel (Mitte) aus einem Würfel (links) und einer Pyramide (rechts) berechnet und visualisiert.

Es stehen bereits ca. 400 Schädelscans zur Verfügung, wobei wir uns bemühen, von den radiologischen Abteilungen der Kliniken aus ganz Deutschland weitere anonymisierte Scans zu erhalten.

4 Schlussfolgerung

Die Möglichkeiten der statistischen Formbeschreibung werden durch die hier vorgestellte deterministische, interaktionsfreie, skalierbare (in der Genauigkeit) Methode erweitert. Es lassen sich auch Objekte erfassen, die bisher durch das Fehlen ausreichend vieler homologer Landmarken (man denke an den Hinterkopf) nicht beschreibbar waren. Das Verfahren scheint grundsätzlich auch für andere Objekte anwendbar, etwa zur Klassifikation von Mikrokalzifikationen der Mamma oder Lungenrundherden. Auch die Erfassung zeitlicher Entwicklungen, etwa Tumorwachstum, ist denkbar.

Die erstellten Referenzmodelle des Schädels unterstützen den Chirurgen bei der Planung der konkreten Umsetzung einer Umstellungsosteotomie durch objektive Zielvorgaben der postoperativen Schädelform.

5 Literatur

1. Altobelli DE, Kikines R, Mulliken JB, et al.: Computer-assisted three dimensional planning in craniofacial surgery, Plat Reconstr Surg 1993; 92:576-584
2. Per Rønsholt Andresen et. al: Surface-Bounded Growth Modeling Applied to Human Mandibles, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 19, no. 11, November 2000
3. Beil W, Rohr K und Stiehl S: Investigation of Approaches for the Localization of Anatomical Landmarks in 3D Medical Images, Comp Ass Rad Surg. Proc 11th Internat Symposium and Exhibition: 265-270. 1997
4. Bühner: Craniofacial Surgery Planning, Freiburg: Howmedica Leibinger GmbH, 1996
5. G. E. Christensen, S. C. Joshi, M. I. Miller: Individualizing Anatomical Atlases of the Head, in: K. Höhne, R. Kikinis (Hrsg.) Proceedings of 4th International Conference on Visualization in Biomedical Computing, Hamburg Germany, Lecture Notes in Computer Science 1131, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Sept. 1996, S. 343 - 348
6. Dean D et. al: Average African American three-dimensional computed tomography skull images: the potential clinical importance of ethnicity and sex; J Craniofac Surg 1998 Jul; 9(4): (Page(s): 348-358)
7. Heinze, P et. al: Statistischer Atlas zur Segmentierung des Kniegelenkes; Rechner- und Sensorgestützte Chirurgie; Proceedings zum Workshop 19.-20. Juli, Heidelberg, 2001
8. Sascha Däuber, R. Krempien, Michael Kraetz, Thomas Welzel and Heinz Wörn: *Creating a statistical atlas of the cranium*; In: Medicine Meets Virtual Reality 2002; J.D. Westwood et al. (Eds.); IOS Press, 2002