

Biomechanische Optimierung individueller craniofazialer Implantate

Evgeny Gladilin¹, Alexander Ivanov² und Vitaly Roginsky²

¹ Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), TBI,
Im Neuenheimer Feld 580, 69120 Heidelberg,

² Moscow Center of Children's Maxillofacial Surgery,
Timura Frunse 16, 119992 Moscow, Russia,
Email: e.gladilin@dkfz.de

Zusammenfassung. In dieser Arbeit beschreiben wir eine physikalisch basierte Methode zur Formoptimierung individueller Implantate in der craniofazialen Chirurgie, mit deren Hilfe eine ästhetische Korrektur des Weichgewebes erzielt werden kann. Im Unterschied zur Weichgewebepreparatur bei knochenumstellenden Operationen impliziert die Frage nach einer optimalen Implantatform ein inverses Problem der Strukturmechanik, bei dem die einer vorgegebenen Deformation zugrunde liegenden Randbedingungen bestimmt werden sollen. Wir präsentieren einen allgemeinen Finite-Elemente-basierten Ansatz zur numerischen Lösung inverser Randwertprobleme für das optimale Implantatdesign in der craniofazialen Chirurgie und Ergebnisse einer klinischen Studie zur implantatbasierten ästhetischen Korrektur einer bilateralen asymmetrischen Anophthalmie.

1 Einleitung

Craniofaziale Implantate finden zunehmend Anwendung in der plastischen und rekonstruktiven Gesichtschirurgie zur ästhetischen Korrektur des Patientenaussehens. Für die korrigierende Verformung und Neuordnung des Gesichtswachsgewebes spielt die Implantatform eine entscheidende Rolle. Bei betragsmäßig kleinen Umstellungen wird die für die Weichgewebekorrektur notwendige Implantatform von Chirurgen aufgrund von Erfahrung und Intuition in der Regel gut abgeschätzt. Im Falle größerer Deformationen oder komplexerer chirurgischer Eingriffe kann eine optimale Implantatform schwer anhand einfacher Plausibilitätsbetrachtungen schwer vorausgesagt werden. Folglich führen die konventionellen Methoden für das Implantatdesign, die die mechanischen Eigenschaften von biologischen Geweben ignorieren, zu unbefriedigenden Ergebnissen. In dieser Arbeit präsentieren wir eine anatomisch-physikalisch basierte Methode für das optimale Design individueller craniofazialer Implantate und die Ergebnisse einer klinischen Studie zur implantatbasierten Korrektur einer bilateralen asymmetrischen Anophthalmie.

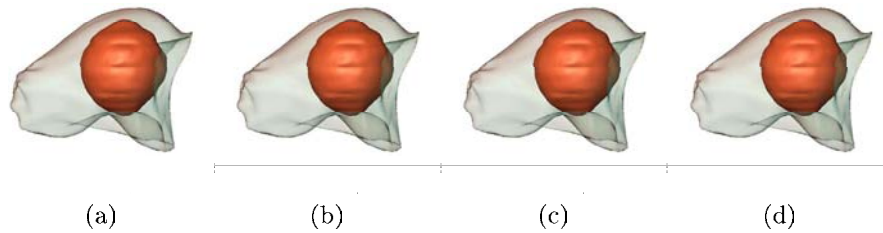
Abb. 1. Links: Das präoperative Erscheinungsbild eines Patienten mit einer bilateralen asymmetrischen Anophthalmie. Rechts: Ergebnis der chirurgischen Korrektur der Augäpfel mit Hilfe biomechanisch optimierter orbitaler Implantate.



2 Stand der Kunst

Moderne Methoden der 3D-Bildgebung in Kombination mit den Methoden der computerbasierten Modellierung und Simulation ermöglichen heutzutage eine realistische Vorhersage von biologischen Geweben für die präoperative chirurgische Planung. Die bisherigen Arbeiten zur numerischen Modellierung biologischer Gewebe für die computergestützte Chirurgieplanung (engl. CASP) befassen sich mit der Berechnung von Weichgewebedeformationen für die vorgegebenen Umstellungen der Gesichtsknochen (z.B. Distraction des Unterkiefers) [1-3]. Solche Randwertprobleme (RWP) entsprechen einer direkten kausalen Abfolge der Ereignisse bei einer Operation, z.B. Knochenumstellung (Ursache) führt zur Weichgewebeverformung (Folge), und werden im weiteren als direkte RWP bezeichnet. Im Falle eines individuellen Implantatdesigns entspricht die Fragestellung einer inversen Abfolge der Ereignisse, bei der das Ergebnis einer chirurgischen Korrektur (postoperatives Patientenaussehen) zurück auf seine Ursache (Implantatform) verfolgt werden soll. Solche RWP bezeichnen wir weiter als inverse RWP. In dieser Arbeit befassen wir uns mit der Lösung eines inversen biomechanischen RWP für das optimale Implantatdesign in der craniofazialen Chirurgie.

Abb. 2. Finite Elemente Modellierung des linken Auges: (a) FE Oberflächenmodell des linken Auges einschließlich der Augenhöhle und des Augapfels, (b) Ansatzfläche für das Implantat auf der oberen Wand der Augenhöhle, (c) simulierte Verformung der Ansatzfläche entsprechend der Verschiebung des linken Augapfels um 1.1 cm, (d) Überlappung der ursprünglichen und der mittels der Simulation berechneten Oberflächen der linken Augenhöhle. Der Überlappungsbereich zwischen der ursprünglichen und der verformten Ansatzfläche entspricht der gesuchten optimalen Implantatform.



3 Methoden

Unser Ansatz basiert auf der Rekonstruktion der Patientenanatomie aus 3D CT Daten und der numerischen Simulation der Gewebeverformung entsprechend dem gegebenen chirurgischen RWP. Das geometrische Modell der Patientenanatomie besteht aus triangulierten Oberflächen, die den Rändern der Weichgewebe- und Knochenregionen entsprechen. Das Oberflächengitter wurde weitgehend automatisch mit Hilfe von *Materialise Mimics 6.3* [6] erzeugt und anschließend unter Verwendung von *Amira 3.1* [5] mit einem Tetraedergitter gefüllt. Zur numerischen Berechnung der Gewebedeformationen wurde ein nichtlinearelastisches Finite Elemente Modell auf der Basis einer hyperelastischen Materialapproximation eingesetzt [3,4].

4 Experimentelle Ergebnisse

Abb. 1 zeigt einen jungen Patienten mit einer bilateralen asymmetrischen Anophthalmie, die infolge einer Komplikation nach der vorhergehenden chirurgischen Behandlung einer Gehirnzyste entstanden ist. Zur Korrektur der Position beider Augäpfel wurde entschieden, geeignete intraorbitale Implantate einzusetzen. Das optimale Design dieser intraorbitalen Implantate wurde mit Hilfe der inversen Finite Elemente Analyse durchgeführt. Im ersten Schritt wurden geometrische Modelle beider Augen des Patienten einschließlich Augenhöhlen und Augäpfel auf der Basis von CT Daten erstellt (siehe Abb. 2a). Um eine eindeutige Lösung des biomechanischen RWP zu erhalten, wurden von den behandelnden Chirurgen auf den oberen Wänden beider Augenhöhlen ein geeigneter Ansatzbereich für die Implantate definiert (siehe Abb. 2b). Die Randbedingungen für dieses RWP sind durch die Form von angestrebten Verschiebungen des linken bzw. rechten Augapfels um 1.1 cm bzw. 0.7 cm gegeben. Die numerische Lösung des

Abb. 3. Links: 3D lithografisches Modell des Patientenschädels. Rechts: biomechanisch optimierte individuelle intraorbitale Implantate.

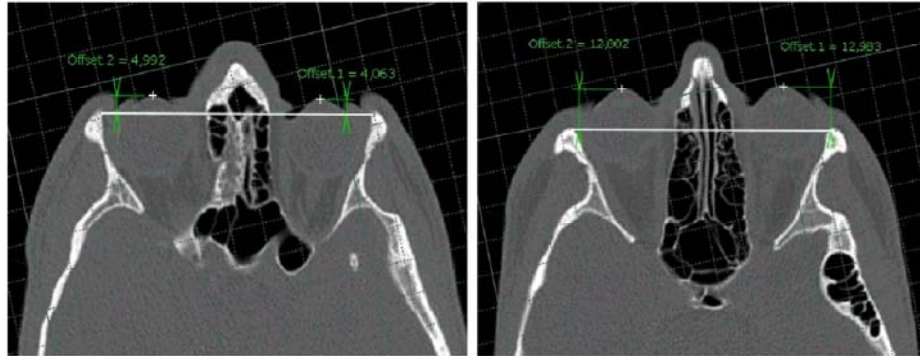


inversen RWP mittels der Finite Elemente Methode liefert die Verformungen der Ansatzflächen für die Implantate, die den vorgegebenen Verschiebungen der Augäpfel entsprechen (siehe Abb. 2c). Abb. 2d zeigt die räumliche Überlappung der ursprünglichen und der in der Simulation berechneten Oberflächen der linken Augenhöhle. Der Überlappungsbereich zwischen der ursprünglichen und der verformten Ansatzfläche entspricht der gesuchten optimalen Implantatform. Auf der Basis dieser Berechnungen wurden mit Hilfe von Stratasys FDM 3000 Rapid Prototyping Systemen zwei PMMA/HA (polymethylmethacrylate & hydroxiapatite) Implantate für die entsprechenden Ansatzbereiche in den Augenhöhlen hergestellt (siehe Abb. 3). Abb. 1 (rechts) zeigt eine bemerkenswerte Verbesserung der ästhetischen Erscheinung des Patienten sechs Monate nach der Operation. Ein quantitativer Vergleich mit den postoperativen CT Daten hat ergeben, dass bei der Computersimulation der relative Fehler des Betrags der Verschiebungen der Augäpfel für das linke und das rechte Auge bei jeweils 5-6% liegt (siehe Abb. 4).

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit haben wir einen neuen Ansatz zur inversen Optimierung craniofazialer Implantate auf der Basis individueller 3D Patientenmodelle und der Finite Elemente Analyse der Gewebemechanik präsentiert. Unsere Methode ermöglicht die Berechnung einer optimalen Implantatform, die zur erwünschten Korrektur der Weichgewebeanordnung führt. Die bemerkenswerten Ergebnisse der präsentierten klinischen Studie zur Behandlung einer bilateralen asymmetrischen Anophthalmie mittels biomechanisch optimierter individueller intraorbitaler Implantate zeigen ein großes Anwendungspotential des beschriebenen Verfahrens zur Optimierung individueller Implantate und zur Verbesserung der Chirurgieplanung.

Abb. 4. Prä- (links) bzw. postoperatives (rechts) CT Querschnittsbild des Augenbereichs. Der relative Fehler des Betrags der Verschiebungen der Augäpfel bei der Computersimulation liegt bei jeweils 5-6% für das linke und das rechte Auge.



Literaturverzeichnis

1. Bro-Nielsen M, Cotin S. Real-time volumetric deformable models for surgery simulation using finite elements and condensation. vol. 15. Eurographics; 1996. p. 57–66.
2. Koch RM, Gross MH, Carls FR, von Bren DF, Parish YIH. Simulating Facial Surgery Using Finite Element Models. SIGGRAPH; 1996. p. 421–428.
3. Gladilin E, Zachow S, Deuffhard P, Hege HC. Adaptive nonlinear elastic FEM for realistic soft tissue prediction in craniofacial surgery simulations. vol. 4681. SPIE Medical Imaging; 2002. p. 1–8.
4. Ciarlet PG. Mathematical Elasticity. Volume I: Three-Dimensional Elasticity, volume 20 of Studies in Mathematics and its Applications. North-Holland, Amsterdam; 1988.
5. Amira. Indeed - Visual Concepts. URL: <http://www.amiravis.com>.
6. Materialise Mimics. Materialise. URL: <http://www.materialise.com>.