

Virtuelle Segmentierung und Fragmentpositionierung zur Planung navigationsgestützter operativer Eingriffe in der rekonstruktiven Chirurgie

R. Stelzer¹, A. Koßler¹, M. Funke¹, U. Eckelt², M. Schneider²

1: Technische Universität Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion

2: Technische Universität Dresden, Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer und Gesichtschirurgie

Summary

The navigation supported planning for surgical intervention is so far based on computer tomographies and two- dimensional segmentation of the individual layers. The use of navigation technologies for the treatment of fractures and defects as well as for the planning of implants is however considerably limited by lacking possibilities of data set manipulation. In order to meet the requirements of the surgeon on the virtual planning situation and simulation of the operation, the integration of an efficient CAD-System from the engineering field might be considered.

Methods: We introduce the CAD platform CATIA® for using in the fragment positioning , defect reconstruction and implant planning. The virtual modifications can be now realized immediately on the three-dimensional planning model. Therefore, the time-consuming and very difficult segmentation of the individual layers of the tomographies is avoidable.

Fracture fragments can be three-dimensionally segmented and positioned on the right place. Osteosynthesis material is selected preoperatively and virtually integrated on the screen in the correct dimension. The processing of the data sets in the CAD and VR-environment is facilitated by modern multidimensional visualization concepts (5 side CAVE). The reconstructed data record is fed into a navigation system and is the basis for an accurate reconstruction of the osseous structures.

Conclusion: Furthermore, the expansion of the surgical planning tools due to the virtual reality environment and the specific use of navigation supported methods minimize the operative accesses for the surgeon. The preoperative virtual planning of multiple fragment fractures and defect fractures, particularly in the periorbital middle face, is very important for the precise reconstruction of form and function. Due to integration of modern visualization concepts the often difficult construction of individual implants will be facilitated considerably.

Keywords

Computertomografie, Operationsplanung, CAD-System, Segmentierung, Fragmentpositionierung, VR-Umgebung

1. Stand der Forschung in der Operationsplanung und Navigationstechnologie

Computerbasierte quasi-3-dimensionale Visualisierungstechniken auf 2-dimensionalen Bildschirmen haben im letzten Jahrzehnt Einzug in die Medizin gehalten. Dies ist auf die ständig wachsende Bedeutung und Weiterentwicklung der bildgebenden Verfahren wie der Computertomographie (CT) und der Magnetresonanztomographie (MRT) zurückzuführen. Die immer leistungsfähigere Computertechnik schafft zudem die Möglichkeit, die große Menge anfallender Daten in kurzer Zeit zu verarbeiten.

Ein wesentliches Einsatzgebiet für Computersysteme in der Chirurgie ist die Planung und Simulation von Operationen. Die mit Hilfe eines bildgebenden Verfahrens gewonnenen Daten können mit Bildverarbeitungsroutinen bearbeitet werden und dienen Medizinern in verschiedenen Einsatzgebieten zur Diagnose und Therapie. Neben der Operationsplanung werden diese Techniken vor allem auch in der Bestrahlungsplanung eingesetzt.

Operationen am Gesichtschädel, wie die Wiederherstellung von schweren Gesichtschädelfrakturen oder die Korrektur von angeborenen Missbildungen, erfordern aufgrund ihrer Komplexität eine besonders sorgfältige und kreative Planungstechnik. Angestrebt wird dabei eine Wiederherstellung der Funktion sowie eine Verbesserung des eben so wichtigen äußeren Erscheinungsbildes des Gesichtes. Bisher wurden diese Planungen konventionell mit Hilfe von Gipsmodellen, Röntgenbildern, Photographien und cephalometrischen Analysen durchgeführt [1]. Seit mehreren Jahren stehen zur Operationsplanung CT- und/oder MRT-Daten zur Verfügung. Die CT- und MRT-Scanner sind mit einer Visualisierungs- und Nachbereitungssoftware ausgerüstet. Mittels dieser Software können die Daten quasi-3-dimensional visualisiert sowie über Schwellwerte das Hartgewebe vom Weichgewebe getrennt werden.

Die verarbeiteten Datensätze können im Dicom-Format in Navigationssysteme eingelesen werden und erlauben dem Operateur eine intraoperative Orientierung am präoperativen Datensatz. Darüber hinaus können die Dicom-Daten mit kommerziellen Softwaresystemen (z.B. Mimics) in ein STL-Format konvertiert und daraus ein Stereolithografiemodell erstellt werden [2]. Diese physischen Modelle werden ebenfalls zur Operationsplanung eingesetzt. An diesen Modellen ist aber keine interaktive Modifikation möglich.

Die Software für die Operationsplanung und Navigation erlaubt eine multiplanare Rekonstruktion (Fig. 1) in den Standard-Ebenen (coronal, sagittal und axial). In diesen Ebenen können Bereiche (z.B. Tumore, Knochenfragmente) markiert und segmentiert werden [3,4]. Diese Segmentierung ist nur schichtweise möglich, wobei kein Zusammenhang zwischen den Schichten besteht. Die quasi-3-dimensionale Visualisierung [5] dient nur einer zusätzlichen Veranschaulichung. Diese Segmentierung erfordert ein hohes Expertenwissen vom Chirurgen. Eine gezielte Veränderung der Daten, beispielsweise zur Vorschau auf ein späteres Operationsergebnis, ist bisher nicht möglich. Dieses Defizit ist besonders im Gesichtsbereich gravierend, wo neben funktionellen besonders ästhetische Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle spielen.

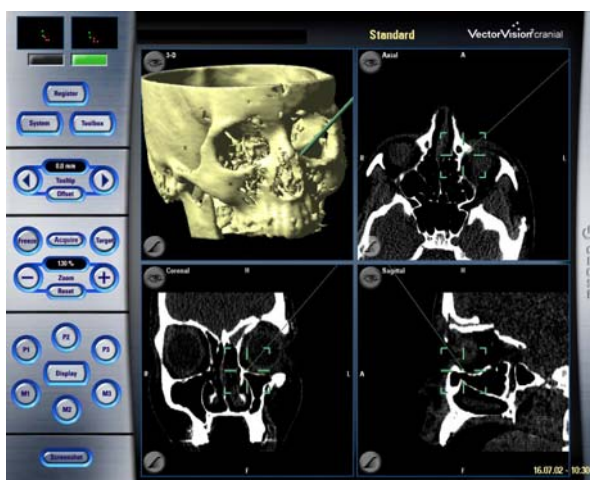


Fig. 1: Darstellung der CT-Daten in einem Operationsplanungssystem (Software Brainlab)

Auf dem Gebiet der Operationsnavigation gibt es ein Projekt [6], das durch Einsatz erweiterter Realität die Operation unterstützt. Die Operationsplanung erfolgt aber weiterhin am 2-dimensionalen Bildschirm.

2. Schaffung einer Planungsumgebung zur virtuellen Operationssimulation

Um die Anforderungen der Chirurgen an eine virtuelle Planungsumgebung zur Operationssimulation erfüllen zu können, kommt der Einsatz leistungsfähiger CAD-Systeme (z.B. CATIA V5) aus dem Ingenieurbereich in Frage. Diese CAD-Systeme sind grundsätzlich dreiminensional ausgerichtet, weil in diesem Bereich das Design eine dominierende Rolle spielt. Damit sind sie den medizinischen Softwaresystemen, die auf der Basis der schichtweisen 2-dimensionalen Abbildung der Computertomografen basieren, überlegen.

Dabei ist es naheliegend, die notwendigen virtuellen Veränderungen nicht mehr nach mühsamer Segmentation in der Einzelschicht, sondern unmittelbar am 3-dimensionalen Modell vorzunehmen.

Im CAD-System können z.B. Knochenfragmente, die durch eine Fraktur entstanden sind, zielgerichtet segmentiert und an den richtigen Ort positioniert werden. Die weitere Planung ermöglicht dann Befestigungselemente für Knochenfragmente (Schrauben) bereits präoperativ zu planen. Nach exakter virtueller Rekonstruktion des Gesichtschädels können diese Schrauben in korrekter Dimension, Richtung und Länge bereits am Bildschirm „eingebracht“ werden, ohne dass wichtige Strukturen, wie z.B. Nervenbahnen, verletzt werden oder die Schraube an einem falschen Ort aus dem Knochen herausragt.

In dem folgenden Abschnitt werden die Verfahrensweisen dargestellt, wie aus den CT- oder MRT-Daten ein weiterverarbeitbares CAD-Modell des Schädels entsteht.

3. Modellierung des menschlichen Schädels mit CATIA

Ausgangspunkt für ein individuelles Modell eines Schädels ist eine CT-Aufnahme, die man vom Patienten erstellt. Diese CT-Daten werden dann über eine noch festzulegende Schnittstelle in das CAD-System überführt. Zurzeit wird als Datenaustauschformat das STL-Format benutzt, da es bisher noch keine direkte Möglichkeit gibt, Daten aus einem CT-Datensatz, die im DICOM Format vorliegen, in ein CAD-System zu importieren.

Um die Schädelknochen im CAD-System als 3D Modell abzubilden, gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Wege.

Der erste Weg ist, einen Prototyp eines menschlichen Schädels zu modellieren und diesen Prototyp über die Parameter des CAD-Systems so zu verändern, dass das Modell an die individuellen anatomischen Merkmale des jeweiligen Patienten angepasst werden kann. Schwierig bei diesem Ansatz ist, dass die Anatomie der Gesichtsschädelknochen individuell große Unterschiede aufweist und somit die Festlegung geeigneter Parameter schwierig ist. Man kann zwar ein CAD-Modell anhand eines physisch vorhandenen anatomischen Modells erzeugen, die Qualität und die Detailtreue eines solchen Modells wird von Ärzten aber als unzureichend für die Operationsplanung eingeschätzt.

Ein anderer Ansatz ist es, aufgrund einer CT-Aufnahme eines Patienten eine weitgehend automatisierte Modellierung vornehmen zu lassen und somit ein individuelles Modell des jeweiligen Schädels zu bekommen. Bei der Modellierung der Schädelknochen im CAD-System wurden sowohl der erste Ansatz als auch der zweite getestet.

Die bisher bekannten und in der Praxis angewendeten Verfahren zur Flächenrückführung [7] sind für die Lösung des aufgezeigten Problems ungeeignet.

Insgesamt wurden bisher drei unterschiedliche Verfahren, die die Softwarewerkzeuge des CAD-Systems CATIA bieten, getestet, um aus den CT-Daten ein Modell des menschlichen Schädels zu erstellen:

- Modellierung der Flächen durch Erzeugung eines parametrischen Drahtnetzes und Schließen der Maschen mit Flächen aus der Umgebung „Generative Shape Design“
- Flächenrekonstruktion mit der Funktion „Power Fit“ aus der Umgebung „Quick Surface Reconstruction“
- Modellierung eines Volumenkörpers durch das Zusammensetzen von Schichten aus der Umgebung „Part Design“

Nur die dritte Variante hat bisher zu einem brauchbaren Ergebnis geführt.

Modellierung eines Volumenkörpers durch das Zusammensetzen von Schichten

Auf diese dritte Variante zur Erzeugung eines 3D-CAD-Modells des Schädels soll im folgendem näher eingegangen werden. Diese Vorgehensweise ähnelt dem gängigen Rapid Prototyping Verfahren. Nur entsteht kein reales, sondern ein virtuelles Modell. Ein CAD-Modell von einem Unterkiefer ist in Fig. 2 dargestellt.



Fig. 2: Unterkiefer bestehend aus dünnen Scheiben

Dieser Ansatz verzichtet völlig auf die Verwendung von Flächen. Es werden aus der STL – Fläche durch ebene Schnitte Kurven erzeugt, die die äußere Berandung der Knochenoberfläche darstellen. Ebenso sind nach der Erzeugung der Kurven auch die Berandungskurven der inneren Strukturen sichtbar. Der Abstand der Kurven untereinander ist sehr klein. Je geringer der Abstand der Kurven zueinander ist, desto genauer wird auch das Modell des Schädels. Diese entstandenen Kurven sind in der Regel geschlossen. Dies ist für die Verwendung bei diesem Ansatz auch unbedingt nötig, da sonst die Erzeugung der Volumenscheiben fehlschlägt. Wenn sich im STL-File Löcher befinden, entstehen offene Kurven. Um die Löcher im STL-File zu entfernen, stellt CATIA eine Funktion zur Verfügung, die dies halbautomatisch erledigt. Ein manuelles Editieren der Kurven ist aber auch möglich. Hat man die Kurven erzeugt, so werden aus den einzelnen Kurven durch Extrusion Volumenscheiben erstellt. Die Dicke der

Volumenscheiben sollte genau so groß sein wie der Abstand zwischen den einzelnen Kurven. So entsteht Scheibe für Scheibe ein zusammenhängender Volumenkörper.

Sollte eine Erzeugung einer Volumenscheibe nicht möglich sein, so ist dies bei dieser Variante unkritisch, da im Volumenmodell dann nur eine kleine Lücke verbleibt. Um solche Lücken zu großen Teilen zu schließen und auch Rundungen deutlicher heraus zu stellen, ist es möglich, die Scheiben nicht nur in eine Richtung zu erstellen, sondern in mehrere und das Ergebnis zu überlagern.

Dieses Vorgehen zur Modellierung ist auf wenige, einfache Operationen beschränkt, so dass diese Vorgehensweise sehr gut automatisierbar ist. Erste Algorithmen dafür liegen bereits vor.

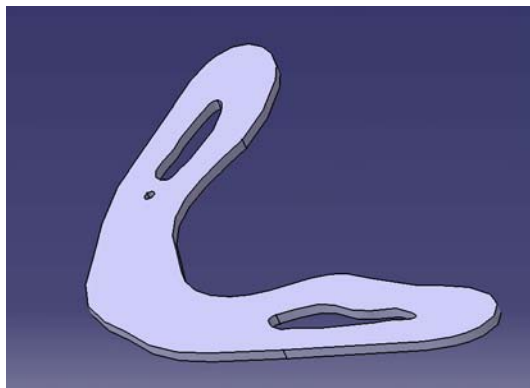


Fig. 3:: innere Knochenstruktur ist mit modellierbar

Die inneren Strukturen, wie z.B. Nervenkanäle, werden bei einer CT-Aufnahme mit abgebildet und sind auch im STL-File vorhanden. Bei der Modellierung mit dünnen Volumenscheiben hat man die Wahl, ob man nur die äußere Struktur erzeugt oder ob man die inneren Strukturen berücksichtigt. Innere Strukturen wären dann als Hohlräume im 3D Modell zu erkennen (Fig. 3). Schwierig ist es automatisch zu unterscheiden, welche Kurven zu den äußeren und welche zu den inneren Strukturen gehören. Auf das entstandene Volumenmodell sind alle CATIA Funktionen anwendbar. Vorteil dieser Modellierungsweise ist, dass man die Problematik der komplexen Flächen umgeht und nur einen einfachen Algorithmus mehrmals hintereinander ablaufen lässt.

Diese Volumenscheiben sind im Gegensatz zu den Flächen sehr gut handhabbar und unempfindlich gegen Fehler, auch bei schlechtem Eingangsmaterial. Das Verfahren ist in seinem Einsatzspektrum nicht auf die Schädelknochen beschränkt und ist daher für viele verschiedene Anwendungen einsetzbar. Als Nachteil dieser Methode ist zu nennen, dass die Oberflächenqualität schlechter ist als bei den ersten beiden Verfahren, weil durch das Zusammensetzen der einzelnen Scheiben eine Treppenstruktur entsteht. Aufgrund der Ungenauigkeit der CT-Daten und der Forderungen der Chirurgen kann dieser Nachteil ignoriert werden.

4. Operationsplanung mit einem CAD-System

Die Aufgaben der Operationsplanung, die im ersten Abschnitt aufgeführt wurden, sind mit einem CAD-System lösbar. Auf der Basis des im Abschnitt 3 modellierten Schädel wird die Segmentierung von Knochenfragmenten, Positionierung von Knochenfragmenten, Einbringung von Befestigungselementen sowie Modellierung und Positionierung von Implantaten [8,9,10] ausgeführt. Bisher wurden folgende Operationen mit dem CAD-System geplant und in der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums „Carl Gustav Carus“ der TU Dresden erfolgreich ausgeführt:

Umstellungsoperation

Bei angeborenen oder traumatischen Fehlstellungen zwischen Unter- und Oberkiefer ist eine Verlagerung von Unterkiefer und/oder Oberkiefer unumgänglich. Das aus CT-Daten erzeugte CAD-Modell des kompletten Schädels wird im CAD-System in drei Teile segmentiert. In Fig. 4 sieht man die Schädelbasis (rot), den Oberkiefer (gelb) und den Unterkiefer (grün). Durch Vorverlagerung des Oberkiefers und Rückverlagerung des Unterkiefers wird die Fehlstellung korrigiert.

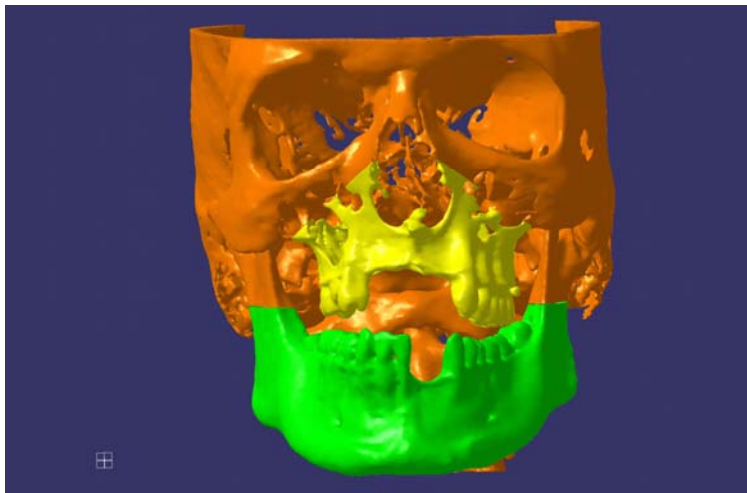


Fig. 4: Umstellungsoperation durch Vorverlagerung des Oberkiefers (gelb) und Rückverlagerung des Unterkiefers (grün)

Operation von Schiefstellungen

In der Anatomie ist die Parallelität zwischen Gebissleiste und Augenhöhlen definiert. Angeborene Schiefstellungen können erst im erwachsenen Alter auf Wunsch des Patienten korrigiert werden. Bei dieser Operation wird aus der gesamten Schädelbasis ein keilförmiges Teil entfernt. In der Fig. 5 sieht man den oberen Teil (rot), den unteren Teil (blau). Im CAD-System können die Maße des zu entfernenden Teils genau bestimmt werden.

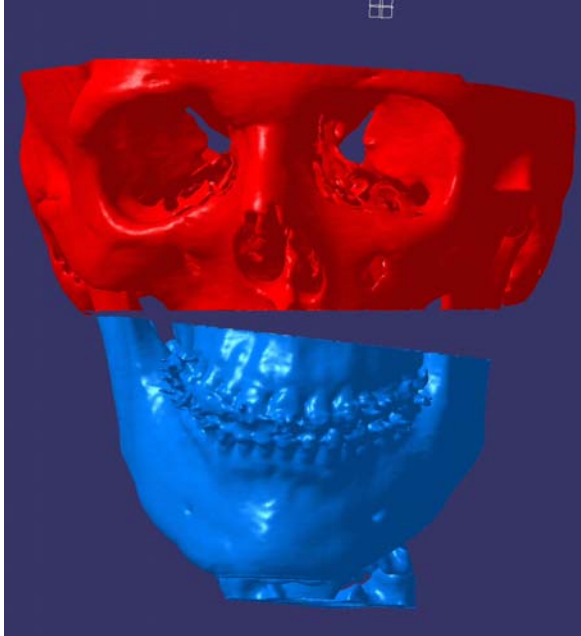


Fig. 5: Operation von angeborenen Schiefstellungen

Fragmentpositionierung und Implantatkonstruktion

Nach Tumorresektionen besonders im Schädelbereich besteht die Notwendigkeit diese Defekte zu korrigieren, weil funktionale (essen, sprechen) und ästhetische Gesichtspunkte eine bedeutende Rolle spielen. Nach einer Tumorresektion ist eine sofortige Korrektur des Defekts aufgrund der Nachbehandlung der Tumorfolgen nicht möglich. Der Zeitraum zwischen Tumorresektion und operativer Behandlung des Defekts kann bis zu 2 Jahren dauern. In diesem Zeitraum erfolgt aufgrund veränderte Kräfteverhältnisse im Schädel eine Verlagerung der Knochenfragmente. Dadurch dieser Tatsache ist vor einer Implantatmodellierung eine Korrektur der Position der Knochenfragmente erforderlich. Für die Korrektur wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht:

- Freihändige Korrektur der Position im Programmsystem Amira mit 2D-Maus an einem 2D-Monitor
- Freihändige Korrektur der Position im CAD-System mit 2D-Maus an einem 2D-Monitor
- Freihändige Korrektur der Position im CAD-System mit 3D-Maus an einem 2D-Monitor
- Korrektur der Position im CAD-System unter Nutzung der dort vorhandenen Softwarewerkzeuge (Festlegung von Translationsrichtungen, Festlegung von Rotationsachsen, Definition von Fixpunkten)

Die Untersuchungen erfolgten im Team von zwei MKG-Chirurgen und zwei CAD-Experten. Die letzte Variante hat sich eindeutig als einzig praktikable Variante herausgestellt. In der Fig. 6 sieht man den Ausgangszustand der Knochenfragmente und Schädelbasis (orange) und den Endzustand nach der Korrektur (linkes Unterkieferfragment – rot; rechts Unterkieferfragment – grün). Die Operationsplanung ist bis zu diesem Stand abgeschlossen. Gegenwärtig erfolgen Implantatmodellierung, Fertigung der Geometrie an Modellwerkstoffen und Fräsversuche an Implantatmaterialien.

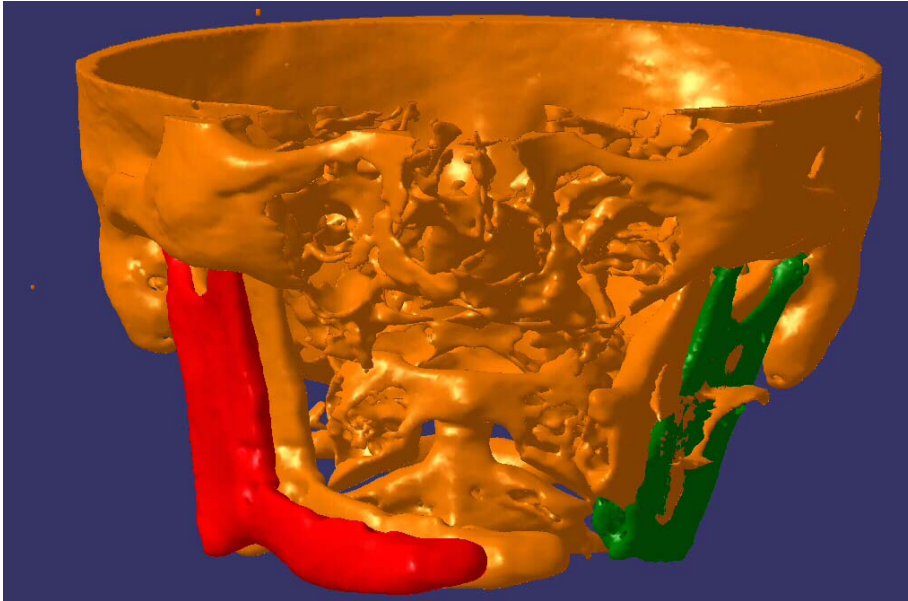


Fig. 6: Positionierung der beiden Unterkieferfragmente und Konstruktion eines Implantats für die Defektstelle

Diese Möglichkeiten der Operationsplanung stellen einen wesentlichen Fortschritt gegenüber den bisher üblichen Systemen dar [11,12]. Trotzdem erlaubt auch dieses System noch keine echte 3-dimensionale Arbeitsweise, weil auch bei dieser Lösung am 2-dimensionalen Bildschirm gearbeitet wird. Erst mit der Übertragung des CAD-Modells in eine virtuelle 3D-Umgebung kann der Chirurg die Operationsplanung an einem echten virtuellen 3D-Modell durchführen. Es existieren inzwischen vielfältige virtuelle 3D-Ein- und Ausgabegeräte, die eine direkte Arbeit am 3D-Modell ermöglichen. Es ist denkbar, den im CAD-System modellierten Unterkiefer auf einer Workbench oder auch in einer CAVE zu visualisieren und die Positionierung und Fixierung der Knochenfragmente direkt an dem virtuellen 3D-Modell vorzunehmen.

Literatur

- [1] Keeve, E.; Girod, S.; Girod, B.: Computergraphik in der Craniofacialen Chirurgieplanung. it+ti - Informationstechnik und Technische Informatik, Vol. 38, No.3, pp. 29-34, 1996
- [2] Hoffmann, J.: Erfahrungen bei der Fertigung und dem Einsatz von Stereolithographiemodellen auf dem Gebiet der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. In: Möglichkeiten und Anwendungen von Rapid Prototyping Technologien in der Medizintechnik . Lichtenstein/Sachsen, 14. Oktober 1999, Beckmann-Institut für Technologieentwicklung e.V., 1999
- [3] Marmulla, R.: Computergestützte Knochensegmentnavigation. Habilitationsschrift. Regensburg, Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Berlin: Quintessenz-Verl., 2000
- [4] Haßfeld, S.: Rechnergestützte Planung und intraoperative Instrumentennavigation in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. Habilitationsschrift. Heidelberg, Reihe: Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Berlin: Quintessenz-Verlag, 2000
- [5] Tiede, U.: Realistische 3D-Visualisierung multiattributierter und multiparametrischer Volumendaten. Dissertation, Hamburg, 1999
- [6] G.Goebbels, K.Troche, M.Braun, A.Ivanovic, A.Grab, K.von Lübtow, H.F.Zeilhofer, R.Sader, F.Thieringer, K.Albrecht, K.Praxmarer, E.Keeve, N.Hanssen, Z.Krol, F. Development of an Augmented Reality System for intra-operative navigation in maxillo-facial surgery

Internationale Statustagung "Virtuelle und erweiterte Realität", Leipzig 2004;
<http://informatiksysteme.pt-it.de/vr-ar-3/>

- [7] Schöne, C.; Carlsen, U.; Schreiber, S. Digitalisieren und Reverse Engineering, In: Fichtner, D.; Künanz, K. (Hrsg.): 50 Jahre Lehrstuhl Produktionsautomatisierung, Zerspan- und Abtragtechnik an der TU Dresden. Tagungsband, Dresden, 26.09.03, TU Dresden, S. 36-41, ISBN 3-86005-372-8
- [8] Schneider M., Eckelt U., Hietschold V.: Positionierung von enossalen Implantaten mittels computerassistierter Operationsnavigation. In: Kongenitale Deformitäten der Kopf-Hals-Region. Gattinger, B.; Schwipper, V.: (eds) Münster, 2000, S. 99-108, ISBN 3 901539 050
- [9] Schneider M., Eckelt U., Lauer, G.; Hietschold V.: Frameless intraoperative navigation and referencing in maxillofacial surgery –Advances and limitationes. Lemke, H.U.; Vannier, MW.; Inamura, K.; Farman, AG.: (eds) Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2001
- [10] Schneider, M.: Einsatz der Operationsnavigation (Image Guided Surgery) in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. Präzisionsanalyse zur navigationsgestützten dentalen Implantologie. Eine experimentelle und klinische Studie, Dissertation, 2001
- [11] Stelzer, R.: Virtuelle Rekonstruktion – Methodik und Werkzeuge Workshop „Virtual Reality & Tissue Engineering“ TU Dresden, Dezember 2003, unveröffentlicht
- [12] Koßler, A., Funke, M.: Virtuelle Segmentierung und Fragmentpositionierung zur Planung von navigationsgestützten operativen Eingriffen Workshop TU Dresden, März 2004, unveröffentlicht