Das nach computertomographischen Daten maßhaltig gefräste 3D-Modell in der Kiefer- und Gesichtschirurgie

Rinker M[1], Jänicke S[1], Simons B[2], Riediger D[1]

[1]Klinik für Zahn-, Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie
(Direktor Prof. Dr. Dr. D Riediger)
Pauwelsstr. 30, 52074 Aachen
[2]Firma tomCAD, Pauwelsstr. 19, 52074 Aachen

rinker@pi.net

Abstract

Von 1990 bis 1996 wurden in der Aachener Klinik 96 Modelle nach computertomographischen Daten gefräst. Folgende Hauptindikationen wurden für die Modellherstellung gefunden: Herstellung individueller Implantate zur Defektdeckung an der Kalotte und Rekonstruktion nach Tumorresektionen, Planung umfangreicher Korrekturoperationen bei komplexen craniofazialen Dysmorphien, Korrektur asymmetrischer Dysgnathien und posttraumatischer Mittelgesichtsdeformationen sowie Planung anatomisch schwieriger implantologischer Versorgungen.. Die Herstellung der Modelle ist trotz der hohen Kosten und des erheblichen Aufwandes angesichts einer verbesserten Operationsplanung und verkürzter Operationszeiten gerechtfertigt. Es ist aber eine strenge Indikationsstellung zu beachten. Nach wie vor kann der größte Teil der Korrekturoperationen mit konventionellen Röntgenaufnahmen einfacher und billiger geplant werden. Die Stereolithographie bietet gegenüber den gefrästen Modellen keine wesentlichen Vorteile, ist aber deutlich teurer und aufwendiger.

Keywords

Three dimensional, computed tomography, skull, model-planing

Einleitung

Gerade die plastische Kiefer- und Gesichtschirurgie mit ihren hohen Ansprüchen an Ästhetik und Funktion der operierten Strukturen benötigt eine gute dreidimensionale Darstellung der anatomischen Strukturen.
Die Einführung der Computertomographie in den 70er Jahren und die später erfolgte dreidimensionale Visualisierung der gewonnenen Schnittbilder erlaubte erstmals die Einbeziehung der dritten Dimension. Brix und Lambrecht [1] berichteten erstmals über die Herstellung eines Schädelmodells nach CT-Daten. Neben der direkten Modellherstellung gab es auch Ansätze, zunächst aus Wachs eine Hohlform herzustellen und das eigentliche Modell im Gießverfahren herzustellen. Als Standardmethode hat sich mittlerweile die Herstellung gefräster Modelle aus Polyurethan etabliert. Eine neue Technik, die Stereolithographie, erstellt die Modelle durch schichtweise Polymerisation mittels UV-Laser.
Erst durch die Modellherstellung nach CT oder MR Daten ist tatsächlich präoperativ eine exakte Planung und Simulation des Eingriffs möglich. Nur diese Methode erlaubt es, außerhalb des Körpers Resektionen und Osteotomien zu simulieren sowie paßgenaue individuelle Implantate herzustellen. Die Modellherstellung hat heute ihren festen Platz in nahezu allen Bereichen unseres Faches. Neben den nicht unerheblichen Kosten wirkt der Zeitfaktor zur Modellerstellung limitierend und schließt damit zum Beispiel die akute traumatologische Versorgung aus. Die ungenügende Darstellung der Weichteile und auch das unterschiedliche Verhalten des Weichgewebes bei chirurgischen Eingriffen erlauben es nicht, aus einer Veränderung der dargestellten knöchernen Strukturen direkt auf das ästhetische Ergebnis zu schließen.
Lill et al. [2] untersuchten die Genauigkeit gefräster Polyurethanmodelle und nennen eine mittlere Abweichung von 3,5%. Das Modell war hierbei bei fast allen Messungen größer.

Modellherstellung

Ausgangspunkt für die Modellherstellung ist ein kompletter CT-Datensatz der interessierenden knöchernen Strukturen. Die Schichtung ist hierbei in axialer und coronarer Richtung möglich. Standardmäßig wird eine axiale Schichtung durchgeführt. Wichtig ist die absolute Ruhelage des Patientenkopfes. Dies kann durch eine Fixierung des Schädels oder, z.B. bei Kleinkindern durch eine Narkose erreicht werden. Um die Datensammlung des Computertomographen zu beschleunigen, verwenden wir heute die Spiraltechnik anstatt der früher üblichen Dünnschichttechnik. Hierbei rotiert die Röntgenröhre kontinuierlich um den

Patienten, während der Tisch mit konstanter Geschwindigkeit vorgeschoben wird. Jegliche Änderung des Tischvorschubs, des gewählten Ausschnitts oder des Gantry-Winkels muß unbedingt vermieden werden, da diese Fehler nachträglich nicht korrigiert werden können. Üblicherweise wird bei uns eine 256x256 Pixel Matrix mit maximal 4096 Graustufen (12Bit) zur Speicherung der Daten verwendet.
Die Daten werden auf eine 12 Zoll Laser-Disk übertragen und auf einem HP 9000 Rechner der Serie 300 weiterverarbeitet. Dieser Rechner basiert auf einem 16,7 MHz Motorola 68881 Prozessor mit einem 68020 Coprozessor. In der Workstation ist ein Bildverarbeitungssystem integriert. Zur weiteren Verarbeitung wird das Programm Endoplan 3-D benutzt.
Durch die Auswahl eines geeigneten Hounsfieldfensters erfolgt die Datenreduktion der vorliegenden Bilder auf eine 8-Bit Graustufentiefe. Anschließend erfolgt halbautomatisch die Konturierung der interessierenden Strukturen.
Nach Setzen des Cursors oberhalb der zu bearbeitenden Struktur (z.B. die Mandibula) umfährt der Rechner die äußere, oder bei Hohlräumen die innere Kontur. Gerade im Bereich der sehr dünnen, damit kontrastarmen Konturen des Mittelgesichts ist aber eine manuelle Korrektur der gefundenen Kurven unerläßlich. Jede Kontur kann dabei bis zu 3000 Pixel umfassen. Pro Bild können maximal neun Konturen umfahren werden.
Anschließend erfolgt die Glättung der Konturen in allen Raumdimensionen und die Aufsummierung. Sowohl die aufsummierten Kurven als auch die Oberfläche können visualisiert und Fehler erkannt werden. Die Rotation um die Senkrechte erlaubt die Betrachtung des Schädels rundum. Mit Hilfe zusätzlicher Software ist es auch möglich bestimmte Ausschnitte zu wählen, Schnitte zu legen und die interessierenden Strukturen in allen Raumrichtungen zu drehen.
Abschließend berechnet der Computer die Steuersequenzen für die CNC-Fräsmaschine. Dieses mit fünf Freiheitsgraden ausgestattete Gerät fräst anschließend in zwei Arbeitsgängen das Modell. Als Werkstoff für die Modellherstellung benutzen wir Polyurethan.
Neben dieser Modellherstellung erlaubt das Programm, auch Hohlräume als Positiv darzustellen und ermöglicht damit die direkte und indirekte Herstellung paßgenauer Implantate zur Defektdeckung. Die Möglichkeit Strukturen der gesunden Seite auf die erkrankte Seite zu spiegeln erlaubt es, präoperativ den idealen Endzustand zu simulieren.

Limitierende Faktoren bei der Modellherstellung

Die Strahlenbelastung ist bei der CT-Untersuchung deutlich höher als bei der Benutzung konventioneller Techniken (z. B: Analyse des Fernröntgenseitenbildes). Daher sollte die Untersuchung strahlensensibler Strukturen, wie des Auges, vermieden werden. Da in der

Regel keine Differenzierung der Weichgewebe benötigt wird, kann die Dosisleistung gegenüber einer normalen CT-Untersuchung allerdings minimiert werden.
Zumindest in der Anfangsphase ist eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Chirurgen und dem Ingenieur, der das Modell erstellt, notwendig. Gerade bei den filigranen Strukturen des Mittelgesichts kann der Ingenieur oft nicht entscheiden, welche Strukturen wichtig sind und welche nicht. Die Herstellung der Modelle ist sehr zeit- und kostenintensiv. Eine Anwendung in der Routinediagnostik scheidet damit aus.
Die Genauigkeit der gelieferten Modelle hängt stark ab vom initialen CT. Sehr dünne, aber anatomisch wichtige Strukturen, wie der Orbitaboden sind im Modell oft nicht vollständig dargestellt.
Metallartefakte wie Zahnkronen und kieferorthopädische Geräte können das Ergebnis erheblich beeinträchtigen. Diese können dadurch minimiert werden, daß der Patient die Zähne zusammenbeißt und die Schichtebenen parallel durch die Kauebene gelegt werden.
Man darf sich von der auf den ersten Blick bestechenden Genauigkeit der Modelle nicht täuschen lassen. Bei der Vermessung ausgewählter Strecken am Schädel und am Modell fanden Lill et al. [2] eine durchschnittliche Abweichung von 3,5%. Eine Verbesserung ließe sich vor allem durch eine dünnere Schichtdicke im CT erreichen. Die damit einhergehende Erhöhung der Strahlendosis ist allerdings nicht tolerabel.

Stereolithographie

Bei dieser Methode wird ein Laserstrahl über ein UV-empfindliches flüssiges Photopolymer geführt und härtet dieses in dünnen Schichten aus. Nachdem jede 0,25mm dicke Schicht ausgehärtet ist, wird diese abgesenkt, von flüssigem Polymer bedeckt und die nächste Schicht wird polymerisiert.
Die geometrischen Beschränkungen, denen eine Fräse unterliegt, entfallen. Diese Technik erlaubt es im Gegensatz zu gefrästen Modellen, auch Hohlräume im Knochen und unter sich gehende Strukturen darzustellen. Auf unserem Fachgebiet ist so die Darstellung des Mandibularkanals bei implantologischen Fragestellungen von Vorteil. Diesem Vorteil stehen ein nicht unerheblich größerer Aufwand bei der Modellherstellung und deutlich höhere Kosten gegenüber. Bei allen von uns untersuchten Modellen war zur präoperativen Planung ein Fräsmodell ausreichend. Wurde ausnahmsweise die innere Struktur der Kieferhöhle benötigt, so wurde dies mit geteilten Modellen erreicht.

Indikationen zur Modellherstellung

Implantate

Die Deckung von Kontinuitätsdefekten des Gesichts- und Hirnschädels mit alloplastischen und körpereigenen Materialien ist eine klassische Indikation zur Modellherstellung. Nur mit dieser Methode ist es möglich, die Implantate bereits präoperativ herzustellen und auszuarbeiten. Neben der indirekten Herstellung ist es auch möglich, die Implantate z.B. aus gesintertem Hydroxylapatit direkt herzustellen. Die präoperative Herstellung bedeutet eine erhebliche Verkürzung der Operationszeit. Die Implantate können zur Infektionsprophylaxe poliert werden. Die bei manchen Materialien auftretende exotherme Abbindereaktion findet außerhalb des Körpers statt. Aber auch bei der Verwendung körpereigenen Knochens sind die Modelle hilfreich. So kann präoperativ die Ausdehnung der Knochenentnahme bestimmt und eine Schablone hierfür hergestellt werden

Nur selten wurden die Modelle zur Planung zahnärztlicher Implantate genutzt. In der Regel ist hierzu die konventionelle Röntgendiagnostik vollkommen ausreichend. Die von uns erstellten Modelle betrafen Patienten mit einer hochgradigen Alveolarkammatrophie oder extrem schwierigen anatomischen Verhältnissen. Hier erlaubt die Modellherstellung auch die Anfertigung individueller Bohrschablonen.

Dysgnathie und craniofaziale Chirurgie

Zu dieser Indikation wurden 19 Modelle in unserer Klinik hergestellt. Während bei den allermeisten Dysgnatieoperationen die übliche präoperative Planung mittels lateraler Schädelaufnahme und Modelloperation im Artikulator ausreichend ist, erlaubt die präoperative Modellherstellung vor allem bei komplexen craniofazialen Eingriffen und bei anatomisch schwierigen asymmetrischen Dysgnathien eine bisher nicht gekannte Sicherheit bei der operativen Planung. Die übliche Modelloperation am Gipsmodell berücksichtigt nur die dentoalveoläre Ebene. Nur am Fräsmodell können die Osteotomielinien festgelegt werden und das Ergebnis der Knochenverlagerung unmittelbar kontrolliert werden. Eventuell notwendige Modifikationen der Osteotomien sind somit bereits präoperativ planbar. Eine Vorhersage des geänderten Weichteilprofils, wie es mit der lateralen Schädelaufnahme möglich ist, ist am gefrästen Modell nicht möglich. Somit stellt das Fräsmodell keinen Ersatz, sondern eine sinnvolle Ergänzung der bisher üblichen präoperativen Diagnostik dar. Der Einsatz von Gipszahnkränzen in die Fräsmodelle erlaubt die Kombination der wesentlich genaueren Abformung der Zahnkränze mit der Darstellung der knöchernen Strukturen [3].

Korrektur posttraumatischer Mittelgesichtsasymmetrien

Bei in Fehlstellung verheilten Mittelgesichtsfrakturen ist das primäre Ziel des Korrektureingriffs die Schaffung symmetrischer anatomischer Strukturen. Der direkte Seitenvergleich am operierten Patienten verbietet sich zumeist, da nur die zu korrigierenden Strukturen, nicht aber die gesunde Seite operativ freigelegt werden. Bei der Konturierung des Fräsmodells ist es möglich, die gesunde Seite zu spiegeln und knöchernen Strukturen sowohl in Fehlstellung als auch in optimaler Symmetrie darzustellen. Auf diesen Modellen können Osteosyntheseplatten angebogen werden, anhand derer intraoperativ die mobilisierten Knochen in anatomisch korrekter Weise reponiert werden.

Sonstige

Drei Modelle wurden zur präoperativen Bestimmung der Tumorausdehnung bei Malignomen hergestellt. Der Informationsgewinn gegenüber den CT-Bildern war gering. Da sich die Grenzen der Resektion erst intraoperativ festlegen lassen, stellt dies für uns keine Indikation zur Modellherstellung mehr dar.
Ein Modell wurde zur Diagnostik therapierefraktärer Kiefergelenksbeschwerden erstellt. Auch hier ließ sich gegenüber den MR-Bildern mit ihrer besseren Darstellung des Weichgewebes kein Informationsgewinn feststellen.

Literatur

[1] Brix F, Lambrecht JT: Individuelle Schädelmodellherstellung auf der Grundlage computertomographischer Informationen. Fortschritte der Kiefer- und Gesichtschirurgie, 32, 74, 1987
[2] Lill W, Solar P, Ulm C, Matejka M: Dreidimensionale computertomographisch gestützte Modellherstellung im maxillofazialen Bereich - Überprüfung der Wiedergabepräzision und Anwendungsgebiete. Z Stomatol 88, 77-84, 1991
[3] Fuhrmann R, Feifel H, Schnappauf A, Diedrich P: Integration von dreidimensionaler Kephalometrie und 3D-Schädelmodellen bei der kombinierten orthodontisch/chirurgischen Behandlungsplanung. J orofac Orthop 57, 32-45, 1996