顎変形症に対するレーザー硬化型3次元実体モデルの利用

古森孝英・高戸 毅・宮本 学・中津留 誠
森 良之・坂本泰宏・赤川 徹弥

Application of a laser-hardened type of three-dimensional model in jaw deformities

Takahide KOMORI・Tsuyoshi TAKATO・Manabu MIYAMOTO
Makoto NAKATSURU・Yoshiyuki MORI・Yasuhiro SAKAMOTO
Tetsuya AKAGAWA

Abstract: A system to create a three-dimensional model from computer-aided three-dimensional images has been developed and clinically applied as an aid to planning specific surgical procedures. During the research and development stage, we prepared a maxillofacial bone model for a patient with a jaw deformity. In this report we present our clinical experience, introduce an outline for the system, and discuss issues related to the system's potential application.

To develop the maxillofacial bone model we first took an X-ray CT for a three-dimensional image of the head and neck region before operation. We processed the CT using an AS4075 Toshiba processing system to obtain a three-dimensional image. From this image, we then prepared a three-dimensional model using the Solid Creation System from D-Mec Inc (The Solid Creation System makes three-dimensional models using resin which is hardened by laser irradiation). We then performed simulated surgery on the model. Next the actual operation was performed based upon the surgical procedures derived from simulated surgery. After the operation, another X-ray was taken and another three-dimensional model was made to observe the results of surgery.

The problem at this stage is inability to produce an accurate reproduction of occlusion. Nonetheless, three-dimensional models offer great potential by enabling us to develop surgical procedures for specific jaw deformities based on three-dimensional structure.

Key words: three-dimensional model (3次元実体モデル), laser-hardened type (レーザー硬化型), simulated surgery (模擬手術), maxillofacial bone (顎顔面骨), jaw deformities (顎変形症)

緒 言

複雑な3次元構造をもつ人体内部を立体的に正確に表現把握し、臨床に役立てたいという要求は古くからあり、研究が行われてきた。特に1983年に3次元表示 CT

が開発¹⁾されて以来、さまざまな3次元データの表示手法を用いた画像診断²⁾や、コンピューター操作による骨の切断・切削・移動などを行う手術シミュレーションの研究^{3~5)}が進められ、多大な成果を上げてきた。

しかしコンピューターによる手術シミュレーションは簡単で定量性に優れているものの、実際の手術に即した

東京大学医学部口腔外科学教室
(主任：赤川徹弥教授)
Department of Oral Surgery, Faculty of Medicine,

University of Tokyo (Chief: Prof. Tetsuya Akagawa)

受付日：平成5年1月20日

図1 実体モデルの作成の手順

写真1 実体モデル作成装置(ディーメック社製, SOLID CREATION SYSTEM)

厳密な操作は困難で、また複雑な形状の場合には、モニターに表示した3次元画像だけでは構造の把握が難しいなど限界があった。

そこで紫外線硬化樹脂をレーザーで積層してモデリン

図2 光造形法による実体モデル作成の工程

グを行う技術を用いて、コンピュータ上で作成した3次元画像から、実物と同じ構造の複製品(実体モデル)を作成するシステムが開発され、臨床応用が進められてきた⁶⁻⁹⁾。

われわれは、これまでこのシステムの研究開発に携わり、主に顎変形症患者の顎顔面骨実体モデルを作成し検

写真 2 術前頭部X線規格写真

写真 3 3次元画像作成用マルチスライス画像

討を重ねてきたので、症例を提示して本システムの概要を紹介し、その問題点および可能性などについて考察する。

研究対象と方法

今回研究対象としたのは、反対咬合のため1991年3月より某矯正歯科にて治療を開始し、当科にて1992年7月29日、上顎骨切り術 (Le Fort I型)、下顎骨切り術

(Obwegeser Dal-Pont 法) およびオトガイ形成術を行った顎変形症の患者 (24歳、男性) である。

実体モデル作成の概略は以下の通りである (図1)。

まずX線 CT により、管電圧120 kV、管電流170 mA、断層間隔 2 mm の撮影条件で頭頸部の3次元画像作成用マルチスライス画像データーを撮影し、光ディスクに記録した。

次に画像処理システム、東芝 AS 4075 (Sun SPARC Station 2) を用いて、原画像に対してスムージングフィルターとエッジ強調フィルターを併用した2値化処理による骨領域の抽出 (threshold の設定値、200~250)、0.2 mm 間隔で骨表面に沿ったなめらかな画像を生成するスライス間補間処理などを行い3次元画像を作成した。そしてこのデーターを実体モデル用 CAD (Computer Aided Design) フォーマット (HP-GL を使用) に変換した。CT 上のアーチファクトに関しては特に処理は行わなかった。

実体モデル作成装置は、レーザーを照射することにより、光硬化樹脂 (デソライト SCR-100) を硬化させてモデルを作る、ディーメック社製、光造形装置 SOLID CREATION SYSTEM¹⁰⁾ (写真1) を用いた。この装置は He-Cd と Ar の2種類のレーザーを使用しているが、今回は造形のスピードを上げるために出力が必要となる点を重視し Ar を使用した。使用レーザー条件は、液面上での出力40~60 mW、レーザービーム径0.2~0.3 mm、走査速度 1 m/sec であった。そして CAD フォーマットデーターに実体モデル造形用の画像処理を加えて、スライス厚0.2 mm で光硬化樹脂を積層し、実体モデルを作成した。

具体的にはモデルデーターに基づいて、紫外線レーザ

写真 4 3次元画像

写真 5 術前実体モデル

ーがタンク内の樹脂の表面を走査して1層分の断面形状を描く。この時、レーザー光線が当たった部分は液体から固体に硬化し、エレベーター上に最初の1層分の断面体が形成される。つづいてエレベーターは1層分ずつ下降し、連続的に幾層もの薄い断面体を積層する。このくり返しにより実体モデルが作られ、最後にエレベーターを引き上げて後処理を施し、完成させた(図2)。

結 果

患者は顔面中1/3が陥凹し、オトガイ部および下唇が前突して、強度の皿様顔貌(dish face)を呈していた(写真2)。

術前X線CTより得られた3次元画像作成用マルチスライス画像(写真3)をもとに画像処理を行って3次元画像を得た(写真4)。この時点でコンピューター操作

により、いろいろな方向から観察することができるが、あくまでモニター上に表示された画像である。そしてこの画像データをもとに実体モデルを作成した(写真5)。実体モデルは実物より骨の厚みがやや大きくできている可能性があるがほぼ等倍と考えてよく、3次元構造を手にとってあらゆる方向から直接観察できるので、画像では認識が困難な患部の微妙なひずみまでかなり正確に把握することが可能である。

次に、実体モデル上に予定骨切り線を描記し、実際の手術に準じた形で模擬手術を行った。実体モデルは、かなり細かいところまで実際の形状を再現できており、骨切断、ミニプレート固定穴位置の決定などが、本来の手

術と全く同様に行えた(写真6)。また模擬手術の前後に、実体モデルを用いて患者および家族へ病状、手術内容など手術計画の説明を行った。

これらをもとに、1992年7月■日GOI全身麻酔下で実体モデルを参考にしながら、上顎骨切り術(Le Fort I型、前方移動量5mm)、下顎骨切り術(Obwegeser Dal-Pont法、後方移動量10mm)、およびオトガイ形成術(8mm短縮)を施行した。手術時間6時間35分で出血量820ml、あらかじめ準備しておいた自己血輸血を1,200ml行った。

術後3か月後に再び頭部X線規格写真を撮影した(写真7)。予定通り骨が移動され、咬合および顔貌の改善がなされた。

同年11月■日、術後X線CTを撮影し、これより得られたマルチスライス画像をもとに術後の実体モデルを作成した(写真8)。上下顎の骨切り部の骨の移動に伴う段差などの変化がきわめて正確に再現されており、このモデルを用いて再び患者への説明を行った。

考 察

従来CT画像情報から実体モデルを作成する方法としては、ポリウレタン樹脂または特殊なスポンジをコンピュータ数値制御工作機械で削り出す方法がとられており、最近でもこれを応用したモデルの報告がみられる¹¹⁾が、この方法ではきわめて3次的で複雑な形状や、中空の物体などの再現は困難である。

今回われわれが用いた実体モデル、ディーメック社製、SOLID CREATION SYSTEMは、光学的造形法(レーザーリソグラフィー)と呼ばれる技法を用いてお

写真6 模擬手術を行った実体モデル

写真7 術後頭部X線規格写真

写真 8 術後実体モデル

り、これはコンピューター制御により紫外線レーザーを感光性材料である紫外線硬化樹脂表面に照射して1層分の断面形状を層状に硬化させ、これを順次積層することによって立体形状を作り出す技法で、中空形状も容易に

加工でき、内部構造が複雑なモデリングに適している。現時点ではかなりの時間を要するが、同じ実体モデルをくり返し作成することも可能である。

紫外線硬化樹脂にレーザーを照射する方法には2種類

あり、1つは表面張力の影響を受けないようにという考えに基づいて、樹脂槽の底面からガラス越しに照射する方法⁸⁾で、この方法だとガラス面に接して樹脂が硬化するので表面は平滑になるが、ガラス面からはがす段階で変形が生じる欠点がある。もう1つはこれに対して樹脂槽の上面からレーザーを照射する方法⁹⁾で、表面張力のため硬化する際に多少の凹凸を生じるが、積層間隔を薄くすればほとんど問題にはならないと考えられている。SOLID CREATION SYSTEMは後者の方法を採用しているが、積層間隔0.2mmと非常に薄いので、臨床応用上問題となるような変形は全く認められなかった。

このような実体モデルは、3次元構造をあらゆる方向から直接観察できるので、口腔外科手術計画において以下のような利点がある。

1) 術前の状態が個々において異なる形成異常、変形、欠損などの手術の場合に、術前に患部を実際に目で見、手にとって検討できる。

2) 切断、切削、骨固定装置の穴位置の決定などが手術と同様に行える。

3) 画像では認識が困難な患部の微妙なひずみを把握できる。

4) 術中に随時参照することで、限定された狭い手術部位から全体を把握できる。

5) 欠損部に用いる人工骨を術前に作成できる。

6) 患者、家族への病状、手術計画の説明が容易になり、説得力がある。したがって患者の理解が深まり、インフォームド・コンセントにつながる。

7) 教育、実習での模擬手術に使用できる。

以上のような利点から、実体モデルは臨床において手術計画をたてる上で参考になるだけでなく、手術時間の短縮や手術侵襲の軽減、また手術精度の向上にも役立つと考えられる。

一方今回の作成システムによる実体モデルの欠点としては以下の点があげられる。

1) 実体モデル作成に使用する光造形装置が、紫外線硬化樹脂溶液にレーザーを上方から照射して硬化させた薄い層を順番に積み重ねてモデルを作成する方法を採用しているので、上部から下に向かって突起している部分については樹脂が下に落ちてしまい造形が困難である。脱落を防ぐために支柱を挿入するためのデーター付加を行っているが、微細な構造が多数ある場合には対応できないことがある。

2) 眼窩底など非常に薄い骨の場合には、CT画像データの解像度の影響で正確に骨として検出できず、そのため本来ないはずの穴が開いてしまう現象が起きる。

3) 実体モデルの骨の厚さの精度についてはCT値の問題もあり、検討中であるが、実際よりもわずかに厚くなっていると考えられる。

4) 現時点では作成費用、時間がかかりかかる。

5) 顎関節および歯で上顎と下顎がつながっており咬合が再現できない。これは実体モデルの口腔外科的応用に際して、最も大きな欠点と考えられる。この原因はCTスライス画像でも上下顎がつながって見えるので、必然的に実体モデルもつながった状態となるからで、CTの撮影法にも問題がある。今回の模擬手術の際には、便宜的に咬合平面と思われる位置で実体モデルを上下顎に分割した。特にこの方法で実際の手術に支障はなかったが、正確ではないので、CT撮影法の改良などによりよい方法を検討中である。また別の解決策として、実物大に作成した実体モデルの歯と歯槽突起の部分を削り取り、そこに患者の口腔内印象から得られた石膏模型をはめ込む方法¹⁰⁾も行われているが、まだまだ問題点を残しており今後の研究が期待される。

結 語

1) 顎変形症患者に対して、紫外線硬化樹脂をレーザーで積層してモデリングを行う技術を用いて、コンピューターで作成した3次元画像から実体モデルを作成した。

2) 実体モデルの利点としては、患部をあらゆる方向から観察できる、模擬手術が可能、患者への説明・学生教育に役立つなどの点があげられる。

3) 欠点としては、ある程度の誤差があり実物と全く同一ではない、作成費用・時間がかかる、咬合が正確には再現できないなどがある。

4) 実体モデルは手術計画の立案の際に参考になるだけでなく、手術時間の短縮や手術侵襲の軽減、また手術精度の向上にも役立つと考えられ、顎変形症手術において有用性があると思われる。

この研究にあたり、ご協力いただいている東芝メディカルエンジニアリング株式会社および株式会社ディーメックの担当者諸兄に深謝いたします。

引 用 文 献

- 1) Marsh, J.L. and Vannier, M.W.: The "third" dimension in craniofacial surgery. *Plast Reconstr Surg* 71: 759-767 1983.
- 2) 小原 仁, 角 保徳, 他: 口腔外科領域への3次元CTの応用に関する臨床的研究. *口科誌* 39: 107-114 1990.
- 3) 古旗賢太郎, 周藤安造: グラフィックス技術の医療への応用(手術シミュレーションについて). *グラフィックスとCAD* 43: 1-9 1990.
- 4) Suto, Y.: Three-dimensional surgical simulation system using X-ray CT and MR images. *Medical Review* 35: 1-11 1991.

- 5) Ono, I., Ohura, T., et al.: Three-dimensional analysis of craniofacial bones using three-dimensional computer tomography. *J Cranio-Max-Fac Surg* 20: 49-60 1992.
 - 6) 木原朝彦, 石神英俊, 他: コンピュータグラフィックスを応用した手術計画用実体モデル作成システム. *東芝レビュー* 47: 918-921 1992.
 - 7) 金子 剛, 小林正弘, 他: 形成外科領域での3次元画像情報の利用. *Med Imag Tech* 10: 193-198 1992.
 - 8) 後藤昌昭, 香月 武, 他: X線 CT 写真から作成した光硬化樹脂製頭蓋顔面骨3次元立体模型. *日口外誌* 38: 1128-1135 1992.
 - 9) Stoker, N.G., Mankovich, N.J., et al.: Stereolithographic models for surgical planning: preliminary report. *J Oral Maxillofac Surg* 50: 466-471 1992.
 - 10) Karcher, H.: Three-dimensional craniofacial surgery: transfer from a three-dimensional model (Endoplan) to clinical surgery: a new technique (Graz). *J Cranio-Max-Fac Surg* 20: 125-131 1992.
 - 11) 田上英二郎, 播磨屋 博: ソリッド・クリエーション・システム—光造形による立体モデル製作システム—. *光ファイアンス* 12: 41-44 1991.
-