形成外科におけるシミュレーション

—コンピュータグラフィックス, 実体モデル,
バーチャルリアリティによる手術の再現—

小林 正弘・藤野 豊美・金子 剛

千代倉弘明*・野田 武志**

慶應義塾大学医学部形成外科学教室

*慶應義塾大学環境情報学部

**平塚市民病院形成外科

〒160 東京都新宿区信濃町 35

〒252 藤沢市遠藤 5322

〒254 平塚市南原 1-19-1

(1994年2月21日受理)

Plastic and Reconstructive Surgery Simulation

—Using Computer Graphics, 3-D Model and Virtual Reality—

Masahiro KOBAYASHI, Toyomi FUJINO, Tsuyoshi KANEKO,

Hiroaki CHIYOKURA* and Takeshi NODA**

Department of Plastic and Reconstructive Surgery, School of Medicine, Keio University
35 Shinanomachi, Shinjuku-ku, Tokyo 160

*Faculty of Environmental Information, Keio University
5322 Endo, Fujisawa Kanagawa 252

**Department of Plastic and Reconstructive Surgery, Hiratsuka Shimin Hospital
1-19-1 Minamihara, Hiratsuka Kanagawa 254

(Received February 21, 1994)

形成外科の領域におけるシミュレーション外科, コンピュータ支援外科に関する研究を, 実際の臨床例を含めて, 概説する。コンピュータを利用して手術を再現する方法には, コンピュータ・グラフィックス(CG)によるもの, 3次元実体モデルによるもの, バーチャル・リアリティ(VR)によるものの三つの手法がある。CGによるものは, 繰返しが容易であること, 3次元実体モデルによるものは, 実際の奥行き感を有することが利点となる。VRによるものは, その両者の利点を有するものとして期待されている。コンピュータを使用して手術をシミュレーションすることにより, 正確な術前診断, 手術法の検討, 術後の評価が可能となる。それにより, 手術侵襲の低減化, 手術時間の短縮, 入院期間の短縮が可能である。また, 患者, 家族への疾患, 手術法の説明, 学生, 研修医の教育においても有用である。この研究は, 現在, 研究の始まったばかりの段階ではあるが, 今後は, さらに大きく実を結んでいくものと考えられる。

1. はじめに

形成外科は, 人体の表面形態を扱う外科の一分野である。先天性の奇形, 外傷, 腫瘍切除後の組織の欠損などが, その対象である。良好な手術結果を得るためには, 十分な術前診断, 手術法の検討, 術後評価が必要である。コンピュータの進歩に伴いコンピュータを利用した手術のシミュレーション, コンピュータ支援外科に関す

る研究が盛んになってきている¹⁻⁴⁾。われわれの研究に関するこれまでの概要と将来への展望について述べたいと思う。

2. 画像診断技術とコンピュータの進歩

単純X線写真とは, X線を人体に照射し, 臓器ごとの透過性の違いから, 人体の投影像を見る方法である。近年になり, X線CT(コンピュータ断層撮影)が開発

された。これは、X線を複数の方向から照射し、コンピュータにより解析し、人体各部位のX線吸収値を求め、断層像を得る方法である。投影像から断層像へと進歩し、その診断能力は飛躍的に向上した(図1)。

また、最近のコンピュータ技術の進歩は、CT画像の3次元化を可能にした。2mm程度の細かいスライス間隔で撮影したCT画像を、コンピュータ・グラフィックスの手法により、陰影付けて3次元再構成して表示する方法である。これまでは、2次元のCT画像から頭の中で3次元の様子を思い浮かべていたものが、一目で見ることができるようになった(図2)。

3. CGによる手術の再現

3次元CT画像は、最初は疾患の術前診断、術後評価に利用された。3次元CT画像の臨床応用は、1983年、アメリカの形成外科医 Marsh、放射線科医 Vannier⁵⁾により発表されたのが最初である。その後、3次元CTの有用性は広く認められるようになった。この頃は、CTのデータを外部のコンピュータへ移動して処理を行

っていたが、現在では、CT装置の中で、簡単に処理できるようになった。

形成外科を中心に、3次元CT画像を利用した、手術のシミュレーションも行われるようになってきた。コンピュータ・ディスプレイに、3次元CT画像を表示し、マウスなどで、骨切り位置を指示し、コンピュータ上で手術を再現する方法である。骨切りした骨片は、自由に移動、回転することができる。また、2点間の距離、面積、体積の計測も可能である。納得できるまで繰返し試行錯誤が可能であり、正確な手術計画をたてることができるようになった⁶⁾。

4. 実体モデルによる手術の再現

3次元CTデータに基づくもう一つの手術の再現方法として、実体モデルによる方法が試みられている。コンピュータ・グラフィックスの手法により、ディスプレイ上にCT画像を表示する方法は、見た目には陰影付けされていて3次元的ではあるが、やはり本当の3次元ではなく、奥行き感をつかむのは難しい。それを補う方法として3次元実体モデルが作られている。

3次元実体モデルを作る方法には、切削法⁷⁻¹¹⁾、光造

図1 CT画像 眼球中央の高さでの水平断面

図2 3次元CT画像 顔面中央の正面像

(a) 正面 顔面中央の正面像

(b) 下面 頭部を下から見た図

図3 光造形法3次元実体モデル

形法¹²⁻²¹⁾の2通りの方法がある。切削法は、コンピュータ制御された多軸切削器械(ミリングマシン)により、塊状の樹脂から削り出す方法である。この方法は、比較的古くから研究されており、すでにある程度実用的なシステムが市販され、利用しやすい環境にある。しかし、器械により削り出す方法であるため、深い陥没や中空構造など加工できない形態が存在する。光造形法は、レーザーリトグラフィとも呼ばれる方法であり、紫外線により液体から固体に硬化する樹脂に、レーザー光を照射し、層ごとに硬化した樹脂を積層して、実体モデルを作成する方法である。非常に形態的自由度の高い方法である。3次元 CT データに基づく3次元実体モデルの作成方法として、現在最も優れた方法であると考えられている(図3)。

5. 骨切り手術における骨移動量の決定

CT データに基づく3次元実体モデルの臨床応用のひとつとして、骨切り手術のときの骨移動量決定における利用がある。先天性または他の原因による骨の非対称、変形を有する患者は、骨切りをして、骨片を移動して治療する。骨切りにより、骨片は3次元的に非常に複雑な移動をする。これを3次元実体モデルにより再現する(図4)。

光造形法による3次元実体モデルは、硬度が実際の骨に比較的近く、実際の手術に使う骨切り用の器械で加工を行うことができ、高い精度で手術を再現する。また、3次元実体モデルを利用した手術のシミュレーションは、実際の狭い手術野では見ることで見えない部分も確認しながら、手術計画をたてられる。消毒して、手術中に側に置き、参照しながら手術を行うこともできる。

患者やその家族へ、疾患、手術方法の説明を行うときにも有用であり、操作が実際の手術器械で行えるため、学生、研修医の教育にも利用可能である。

6. 骨欠損手術における人工骨の術前加工

3次元実体モデルは、人工骨挿入手術において、人工骨を術前加工する際にも利用されている。

交通外傷や脳神経外科手術などによる、頭部、顔面領域の骨欠損に対して、従来は、自家骨移植、または、樹脂による人工骨が利用されてきた。自家骨移植、つまり、自分の他の部位の骨の移植は、組織適合性は最良であるが、骨採取部の犠牲を伴う。術野も2ヵ所となり、手術侵襲、手術時間も増えるなどの欠点も存在した。人工骨では、樹脂による人工骨が使われているが、組織適合性が良くなく、異物反応が強く、感染、露出をすることがあった。

(a) 下顎骨骨切り予定線

(b) 下顎骨骨移動後の予測

(c) 術野。実際の術野は狭い

(d) 手術中も3次元実体モデルを参照する

図4 骨切り手術のシミュレーション

最近になり、水酸化アパタイトという人工骨が開発された。これは、人間の骨の骨格部分と同じ成分をセラミックスとして焼き上げたものである。組織適合性に優れ、残っている骨との骨融合も認めるなど優れた性質をもつ。感染、露出などの合併症も非常に少ない。しかし、この水酸化アパタイトは、セラミックスであるため、非常に硬く、割れやすいという性質をもつ。手術中に自由に加工するのは、非常に難しく困難である。水酸化アパタイトを術前に加工して準備する際に、3次元実体モデルを利用する。

あらかじめ3次元実体モデルの骨欠損部に適合するように、水酸化アパタイトを加工することで、複雑な形態の骨欠損に対応することができる。残っている反対側の健常側の形態を参考にすることができ、良好な形態を得

ることができる。手術時間の短縮、出血量の減少、それに伴う良好な術後の回復、入院期間の短縮を行うことが可能である (図 5)。

また、当初は、水酸化アパタイトの術前加工を手作業で行っていたが、現在は、3次元 CT データから、骨欠損部データを作成し、コンピュータ制御の切削器械で加工する試みを行っている。非常に精度の高い術前加工を行うことができる。

7. バーチャル・リアリティの応用による手術の再現

コンピュータ技術の応用として、バーチャル・リアリティ (VR) に関する研究が盛んに行われている。これは、ヘッド・マウンテッド・ディスプレイ (HMD) とデータ・グローブという装置により、仮想の3次元空間

(a) 作成した頭部骨欠損部データ

(b)

(b), (c) ミリングマシンにより加工中の人工骨

(d) ミリングマシンによる加工終了後の人工骨

(e) 光造形法3次元実体モデルと人工骨

(f) 術野。人工骨は骨欠損部に良く適合する

図 5 人工骨の術前加工

を体験するものである。HMD は、両眼に視差をもった映像を与える。HMD に設置されたセンサーは、頭部の位置と動きを測定する。データ・グローブは、手の位置と動きを測定する。両眼の視差により3次元化された映像は、体、手の動きにリアルタイムに反応し、物体がまったくそこにあるかのように感じさせることができる。

われわれは、この VR を、コンピュータ・グラフィックス、3次元実体モデルに次ぐ、第3のシミュレーションの方法であると考えている。コンピュータ・グラフィックスによるシミュレーションの繰返しの容易さと、3次元実体モデルによる本当の3次元の奥行き感の両者を兼ね備えた方法であると期待している。現在のコンピュータの高性能化においても、まだまだ装置に対する負担は大きい、今後必ず現実のものとなっていくと考えている。

8. おわりに

形成外科におけるシミュレーション、コンピュータ支援外科の研究について、コンピュータ・グラフィックス、実体モデル、バーチャル・リアリティの三つの手法について、実際の臨床例とともに概説した。この研究は、現在、研究の始まったばかりの段階ではあるが、今後は、さらに大きく実を結んでいくものと考えられる。

本研究の一部は、平成4、5年度文部省科学研究費補助金(課題番号 04454321)および平成3、4、5年度慶應義塾学事振興資金により行われたものです。

文 献

- 1) 藤野豊美: 日本外科学会誌 **90**(8), 1137 (1989).
- 2) T. Fujino, H. Nakajima, T. Kaneko, M. Kobayashi and T. Kurihara: Keio Journal of Medicine-3, **42**, 104 (1993).
- 3) T. Fujino: "Computer Simulation Surgery" (John Wiley and Sons, in press).
- 4) 藤野豊美: "コンピュータ・シミュレーション外科" (南山堂, in press).
- 5) J. L. Marsh and M. W. Vannier: Plastic and Reconstructive Surgery **71** (6), 759 (1983).
- 6) 金子 剛, 中嶋英雄, 栗原卓也, 藤野豊美, 藤岡睦久, 横井茂樹: 日本頭蓋顎顔面外科学会誌 **4** (2), 67 (1988).
- 7) 前島精治, 田嶋定夫, 今井啓介, 上田晃一, 養父孝乃介: 日本形成外科学会誌 **12**(11), 745 (1992).
- 8) 養父孝乃介, 田嶋定夫, 今井啓介, 前島精治, 成老徹: 日本頭蓋顎顔面外科学会誌 **9**(1), 7 (1993).
- 9) 前島精治, 田嶋定夫, 今井啓介, 上田晃一, 養父孝乃介: 形成外科 **36**(6), 675 (1993).
- 10) 田嶋定夫, 今井啓介, 前島精治, 養父孝乃介: 映像情報 MEDICAL **25**(17), 965 (1993).
- 11) 前島精治, 田嶋定夫, 田中嘉雄, 今井啓介, 養父孝乃介, 太田富雄, 小川竜介, 青木 淳: 日本頭蓋顎顔面外科学会誌 **9**(1), 1 (1993).
- 12) 小林正弘: 慶應医学 **68**(6), 783 (1991).
- 13) 佐藤 淳, 三原円美, 千代倉弘明, 小林正弘, 中嶋英雄, 藤野豊美: 第7回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集 (1991) p. 320.
- 14) 佐藤 淳, 三原円美, 千代倉弘明, 小林正弘, 中嶋英雄, 藤野豊美: PIXEL **111**, 158 (1991).
- 15) 小林正弘, 藤野豊美, 中嶋英雄, 金子 剛, 千代倉弘明: INNERVISION **7**(4), 2 (1992).
- 16) 金子 剛, 小林正弘, 中嶋英雄, 藤野豊美: Medical Imaging Technology **10**(5), 447 (1992).
- 17) 小林正弘, 藤野豊美, 中嶋英雄, 金子 剛, 千代倉弘明: アニテックス **4**(6), 4 (1992).
- 18) M. Kobayashi, T. Fujino, H. Nakajima and H. Chiyokura: European Journal of Plastic Surgery **16**(1), 47 (1993).
- 19) 小林正弘, 藤野豊美: 別冊・数理科学シミュレーション, 178 (1993).
- 20) 小林正弘, 藤野豊美, 金子 剛, 中嶋英雄: 映像情報 MEDICAL **25**(17), 973 (1993).
- 21) 小林正弘, 藤野豊美, 金子 剛, 栗原卓也, 千代倉弘明: シミュレーション **12**(4), 296 (1993).