4. 医用画像処理・グラフィックス技術

横井 茂樹[†], 安田 孝美[†]

1. ま え が き

いまや「医学は画像診断の時代」といわれるほどに臨床における医用画像の重要性は高まっている。医用画像の中で、X線写真（レントゲン）は我々が最も身近に感じるものである。患者の症状や触診でしか診断することができなかった時代に、X線を当てることによって体内を透視することができるようになったことの驚きと喜びは計り知れないものがある。「百聞は一見にしかず」の諺どおり、まさにこの医療画像としてのレントゲン画像が診断および治療の指針に大きく貢献したのである。

レントゲン画像は体内の情報を可視化するという点においては非常に意味のあることであったが、X線による平面への透過像であるため、2次元情報しか持つことができない。これに対し、CT（Computed Tomography）は患者の体内の3次元情報を、その輪切りした像として見せることができる。つまり、医師は患者を切開することなく、連続的に撮影されたCT像を並べて観察することによって、病変部分の空間的な位置や広がりをも自分の頭の中で描いて、診断や治療をすることができるのである。

3次元情報を有するということから、CT装置はその後めざましい発展を遂げており、線源としてX線はもとより、ポジトロン、超音波、MR（核磁気共鳴）といったものが開発、改良され、目的に応じて各々実用化されている。断面の解像度も日進月歩で良くなってきており、最近のCT装置では、初期のものでは観察することが難しかった脳表面の細かいしわまでも画像化することが可能となっている。

このように、CT画像の一連の系列は本質的に3次元情報を有しており、今や臨床における診断や治療計

画に欠くことのできない重要な要素のひとつとなっている。この背景には以下の事実があるといえる。

- (1) 計算機断層撮影（CT）装置、特にX線CT装置が比較的安価に入手可能となった
- (2) 各種CT装置により撮影されたCT像の画質が飛躍的に向上し、充分信頼のおけるものとなった
- (3) ある方向に連続して撮影されたCT像の系列は本質的に3次元情報を持っているので、これらから元の3次元像を再生成することが可能である

これらの事情からCT像への期待がますます高まり、多くの病院でX線CT装置を見かけるようになった。CT像は本来の使命である「診断」に加えて、コンピュータ処理により生成された3次元像を用い、「解剖学の教育」や「治療計画」、さらに「外科手術のシミュレーション」や「人工骨のNC（数値制御）加工」といった、より積極的な利用が可能となり、これらに向けての研究、開発が活発になされるようになってきている^{1)~4)}。

本文では、この医療画像の花形ともいえるべきCT像の系列を3次元画像としてとらえ、画像処理およびコンピュータグラフィックス（CG）の手法を用いることにより、どのような臨床的応用が可能であるかを、最近の研究動向と合わせて概説することにする。

まず2章では、CGおよび画像処理の手法が如何に医用画像に対して有効なものであるかを、CT画像から元の3次元形状を抽出、表示する処理を紹介することによって明らかにする。3章では、表示された画像に会話的な操作を加えることを可能にすることによって、実際の臨床の場で充分有用な手術シミュレーションシステムが実現可能なことを示し、外科医による実際のシミュレーション例を4章で紹介する。

2. CT像の3次元表示技術

CT像の系列から3次元像を生成するには、①対象

[†] 名古屋大学 工学部

Medical Image Processings and Graphics Technologies by Shigeaki Yokoi and Takami Yasuda (Faculty of Engineering Nagoya University Nagoya)

領域の抽出，② 3次元形状の記述（モデリング），③ 描画（レンダリング）の処理が必要である。

2.1 対象領域の抽出

CT断面の各位置（画素）には，物理量（CT値）——例えば，X線CTの場合にはX線吸収量——が与えられている。したがって，各組織でこのCT値の差によって表示したい領域のみを抽出することができる。X線CTの場合，骨のCT値は他の部位と比べて著しく高いので，ある閾値以上の画素のみを抽出することにより骨領域を自動的に決定することができる。

しかし，このような閾値処理はすべての領域に用いることができるわけではなく，CT値が極めて近い領域が隣接している場合には，安定して自動抽出することはできなくなる。このようなときには，断面上で人がトレースしてその領域を指定することを余儀なくされる。これは大変な作業で，実用性を考えた場合，マンマシンインタフェースをできるだけ良くしておくことが重要となる。

2.2 3次元形状の記述（モデリング）

対象領域を各断面で抽出すると，断面形状として与えられている領域の3次元形状をどのように再構成するかが次の問題となる。最近では，各画素をCT像の撮影間隔だけの高さを持つ立方体あるいは直方体（ボクセル）として考える方法が最もよく用いられている（ボクセル構成法⁵⁾）。この技法は以下の特徴を持っている。

- ① 各画素の面が対象領域の表面としてそのまま扱われるため，比較的簡単に表面形状を記述できる。
- ② 形状が断面像として与えられている物体すべてに適用可能である。
- ③ ボクセルが大きすぎると表示画像の画質は著しく劣化する。

一方，対象領域が断面での輪郭線として与えられている場合，隣接する上下，左右の輪郭点をつないでいくことにより小さな面素を構成していき，これによって対象物体の表面像を生成することも可能である（三角形面素構成法⁶⁾）。しかし，隣接する上下のCT像上での物体の輪郭形状が大きく異なるときには，適切な輪郭点の組を見つけることが難しく，正しい3次元形状を表現できないことがあるので注意する必要がある。

2.3 描画（レンダリング）

表示したい領域の3次元像をスクリーン上に描くためには，指定した方向から観察した3次元像をスクリーンに投影しなければならない。CGでは現実感を

するために中心投影をよく行うが，医療画像では形の歪まない直投影を用いることが多い。投影が行われると，次にスクリーンでの各画素における輝度値を計算しなくてはならない。これは物体表面での法線ベクトルと光源の方向ベクトルとの内積によって求めることが多い。

三角形面素構成法による描画では，三角形面素の法線ベクトルは2つの辺の方向ベクトルの外積として簡単に計算することができる。ボクセル構成法では，スクリーンの各画素に投影方向で最も近いボクセルまでの距離を割り付けて，その距離値から物体表面の法線ベクトルを推定する方法（Gradient Shading 法⁵⁾）が用いられる。

3. 臨床応用への可能性

2章では，2次元画像であるCT像にCGや画像処理の技術を用いて，もとの3次元形状を再生するための基本的な手法を述べたが，本章では，こうして作られた3次元像の臨床における有用性について述べる。

3.1 診断支援

従来の単純X線写真では，X線の透過像として画像が得られるため，微妙な疾患に対しては正確な診断が難しかった。また，CT像もそれ自身は2次元画像であり，3次元形状は医師が頭の中で構築するしかなかった。一方，計算機による3次元像生成により，実際に患者に対して外科的治療を施さずに疾患部の3次元情報を観察することが可能となり，正確な診断に大きく貢献するものとなった。特に，安易に手術をすることが許されない頭部疾患に対してはその有用性が最も強調されており，腫瘍，血腫などの病変部の位置や形状を診断に有効な形で表示する手法の開発が行われている⁷⁾。写真1に，半透明な頭蓋を通して腫瘍と脳

写真 1 半透明な頭蓋を通しての腫瘍と脳室

写真 2 NMR-CT による心臓断面

室を観察できる表示例を示す。

また、NMR*による CT 像から、脳表面のひだや血管のような微小な形状をもできるだけ忠実に表示しようという試みがなされている⁸⁾。さらに、ホログラフィも、高価ではあるが真の 3 次元像が得られるという意味から、診断に有効な一手段といえる⁹⁾。頭部とともに重要な心臓の 3 次元表示の研究もいくつかなされている^{10)~12)}。

心臓は動いているため、その含んでいる情報を考えた場合、単に形状の 3 次元画像ではなく、時間も含めた 4 次元画像といえる。しかし、心電同期によって CT を撮らなければならないため、撮影に非常に長い時間を要する。NMR-CT から心臓断面を再構成した例を写真 2 に示す。

これらの表示画像を得るためには、2 章で述べた各種の CG および画像処理の技術が必要となる。

3.2 手術シミュレーション

計算機による 3 次元像を単に表示して診断に用いるのみでなく、グラフィックディスプレイ (GD) 上から会話的に操作を加えようとする研究は、現在最も注目されている応用のひとつである。なかでも X 線 CT 像による、頭蓋骨の形状修復のための手術や股関節部の整形手術のシミュレーションは、その有用性の大きいものである。この理由として次のことが挙げられる。

- ① X 線 CT の場合、骨領域は計算機により安定して自動抽出が可能である。

- ② 骨の変形を修復する手術では主に形状に注目すればよく、生体学的反応は他の手術と比べてそれほど考慮しなくてもよい。
- ③ 形状を重要視する手術では、術後の形状(頭蓋形成手術では顔・頭の形)が患者にとって重大な関心事であり、術前にあらかじめ手術の概要を CG で説明することにより、患者の理解を得て手術に望むことができるので、術後のトラブルを防ぐことができる。
- ④ 力学的な検討を要する関節部の手術計画に対して、ある程度の数値シミュレーションが可能である。
- ⑤ 以上の理由から、医師の積極的なバックアップが得られるようになった。

筆者らは、このような背景から、頭蓋形成手術および股関節部整形手術のための計画支援システムの開発を、慶応大学病院 中嶋英雄助教授、独協医科大学 藤岡陸久助教授、国立埼玉病院 泉田良一博士との協力のもとに行っている¹³⁾¹⁴⁾。以下では、システムの特徴と、医師による本システムを用いた実際の手術計画例を紹介する。

(1) 頭蓋形成手術シミュレーション

頭蓋形成手術とは、先天的あるいは事故などによる後天的な要因によって形が著しく変形している頭蓋骨を、正常な形にする手術である。頭蓋の形状異常は単に美容上の問題ではなく、頭蓋容積が異常に小さい場合、時に脳内圧力の増加によって正常な脳の発育を阻害するもので、生命にも関わる危険な問題である。

現在の手術では、頭蓋を小さなブロックに切断し、全体の形状が正常になるようにそれらのブロックを加工し、再配置している。この際、切断、加工、再配置といった操作は患者の貴重な頭蓋骨に対して行われるもので、最適な処理方法を術前に念入りに検討しなければならない。

上記の要望に対し、我々は形成外科医と放射線科医との協力により、実用化を目指したコンピュータシミュレーションシステムの開発を行っており、医師が実際に行っている手術計画をシミュレートすることを目的としている。

その機能は、(a) 頭蓋および体表面の 3 次元像の生成表示、(b) GD 上での会話的な手術計画の立案、(c) 計測および計画の検証機能、(d) 計画による術後の顔面形状の予想、である。特に、① 任意方向から見た頭蓋 3 次元像上での骨切断・移動といった操作を何度も繰り返すことによって、かなり複雑な手術計画を 3 次元的に立案することができること、および

* 質量数が奇数の原子核は核スピンをもち、それに付随した核磁気モーメントを持っており、それを静磁場中におくと、ある電磁場を共鳴的に吸収する。この現象を核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)という。生体内で生じている NMR 現象を断層像の形で画像化することにより、主に生体の軟部組織の詳細な構造を可視化することが可能である。

② 計画にしたがった手術を施したと仮定した場合に予想される術後の患者の頭や顔の形をある程度予想して表示できること、が大きな特徴である。本システムが現在持っている機能の概略を以下に述べる。

- (a) 3次元像の生成表示機能 2次元スライス像の系列から関心のある器官、組織を抽出して3次的に表示する。頭蓋形成外科では主として頭骨および皮膚表面に関心があるが、これらの領域はX線CTでは原スライスから平滑化および閾値処理を用いて抽出することができる。取出された結果は、3次元の画素(ボクセル)によって表現されており、これにZ-バッファおよびGradient Shading法⁵⁾を適用して骨領域の表示を行う。

計画時においては、メモリーの節約と高速の応答性が要求される。そこで、多少画質を犠牲にし、CT画像を1/4に圧縮し、さらに、投影変換の際には簡易的な方法を用いることにより、高速な3次元表示を可能にしている¹⁵⁾。

皮膚表面については、円柱座標系あるいは極座標系表現された輪郭点列から三角形面素を構成することにより、3次元表面像を生成する。

- (b) 会話型手術計画機能 従来の外科医によるスケッチ上で行う頭蓋側面像からの計画立案では、左右対称な操作を行う比較的単純な手術に対しては充分であるが、より複雑な手術には対応できなかった。一般に、頭蓋骨は様々な方向から切断され、移動される。そこで、任意方向からの計画を幾つも組合せることが可能な機能を開発し、一般の複雑な手術計画に適用可能なものとした。本システムでは、骨領域を表す各ボクセルにラベルを割り付けることによりこの機能を実現している¹⁵⁾。

また、計画立案時においては、何度も修正を繰り返して最適な骨の移動を決定していく。そこで、できるだけ簡単な操作で、できるだけ早く骨片操作の結果を表示することが望まれる。そのため、最適な移動位置が決定するまでは、骨片の輪郭のみを操作することにより応答時間の短縮を図った。

- (c) 計測および計画の検証機能 上述の機能により決定される計画は、いわば医師の経験に頼る部分が多く、定量的評価は行われていない。また、切断位置や移動量が正確に知りたいとの要求も医師から受けている。そこで、これらの要求を満たす機能を付加した。切断位置や移動

量を計測するのに、表示画面上で2点を指定することによりその2点間の表面距離を計算して表示するようにした。

また、手術前後の頭蓋内容積の変化は、その計画の有効性を確認するうえで重要な要因である。頭蓋内領域は頭蓋底付近においては極めて複雑な形状になっており、自動的に抽出することは難しい。また、計画後の頭蓋像については、骨片の再配置による隙間が頭蓋内領域の自動抽出には問題となる。そこで、この領域をスライスごとに会話的に抽出して、術前と計画後の頭蓋内容積を計算して提示し、その計画の有効性を確認することを可能にした。

生まれつき頭蓋内容積の小さい幼児に対してその容積を広げる手術の計画において、術前と外科医により決定された計画像での頭蓋内容積とを測定した結果、各々918 cc、1137 ccであった。これは医師の経験からも適切な増加量であり、この計画は適切であると判断された。

さらに、移動した骨片の整合性を確認するために、表示画面上で指定された断面を表示することも可能である。

- (d) 術後顔面予想機能 計画した頭蓋形状から、術後の頭部外観を予想するこの機能は、この種の手術計画を評価するうえで重要な要素である。それは、骨を切断して移動する手術を行った場合に予想される術後の顔や頭の形は、医師のみでなく、患者にとっても大きな関心事だからである。そこで、皮膚表面を円柱座標系表現と極座標表現を用いて表現し、できるだけ自然な表面形状を予想することを試みた。

(2) 股関節部整形手術シミュレーション

股関節部整形手術は、股関節の骨の形態異常(先天的あるいは病気)のため股関節の機能が悪くなったものを修復するための手術である。股関節部の手術は頭蓋形成手術と異なる関節部特有の性質を持つため、処理・表示に工夫を要する他、システムの目的が手術後の形の修復というよりも、安定性・動きの良さといった機能的な意味での修復の評価にあるという新しい側面が生じる。そこで、現在までに股関節部手術計画のために以下の諸機能を開発している。

- (a) 骨盤・大腿骨の自動分離 骨盤と大腿骨はCT値の差がなく、単純に閾値処理で2値化するだけでは接続してしまう場合が多い。したがって、原断層像から人手によって分離・抽出することになるが、断面の数が多くなると多大な

(a)

(b)

写真 3 頭蓋形成手術計画例

写真 4 術後の頭部・顔面予想像

労力を必要とする．そこで 3 次元画像処理を利用した骨盤・大腿骨の有効な分離方法の開発が望まれている¹⁴⁾．

(b) 骨盤ソケット部切断シミュレーション 現在の股関節部の整形手術は，骨盤部を手術する方法と大腿骨を手術する方法とに大別され，各々数通りの術式に分けられる．これらのほとんどは平面で切断する手術を行うため，頭蓋形成手術シミュレーションシステムで開発した骨切断の機能により，同様にシミュレートすることが可能であることが知られた．しかし，股関節に関して最近開発された有効な手術方法として，股関節ソケット部をソケットの形に沿って曲面的に切断する方法があるが，この方法は従来の平面的な機能ではシミュレートできない．そこで，ソケット部が浅い患者に対して，ソケットの一部をその形に沿って切断し，外側へ移動させることによりソケット部を深くする症例に適用可能な機能を新たに開発した．

(c) 骨片移動時の干渉チェック 運動機能を有する関節部の手術においては，骨片移動の際，骨片どうしの干渉が問題となり，計画時にその判定が必要である．さらに，これを骨移動・回転シミュレーション機能の中に盛り込み，ある骨片が他の骨片と干渉するまで，指定された方向，あるいは回転の向きに可動な距離(角度)を自動算出して移動させる機能も有用であろう．このような問題は，3 次元 CAD においては議論されているが，ボクセル型データとして扱う医用画像においても新たな問題として現れたものである．

(d) 接触面表示 術後の大腿骨の荷重が安定して骨盤ソケットにかかるためには，両者が互いに広い面積で接触している必要がある．そこで，指定された骨片と他の骨片との距離がある値以下の領域を，指定された骨片にマッピングすることにより，加重のかかり具合を明らかにし，手術計画の評価を定量的に行うことも関節部の手術計画には重要である．

4. 手術計画例

頭蓋形成手術における，外科医により本システムを用いた手術計画例を写真 3 に示す．これは頭蓋が前後方向に異常に長い形状を修復するものである．この手術計画に対して，術後に予想される頭部・顔面形状を写真 4 に示す．現在，すでに頭蓋形成手術数十症例，

股関節部整形手術 5 症例に対してシミュレーションを実行し、本システムは臨床において充分有効であるとの評価を医師より得ている。

5. む す び

本文では、医用画像に対する画像処理・コンピュータグラフィックスの応用に関して、3次元像生成と手術シミュレーションのための基本的手法および機能を中心に述べた。これらにより、画像処理およびコンピュータグラフィックスの諸技術が、X線CT像を初めとする3次元医用画像と結合することにより、実際の臨床において非常に有効な結果が生まれることが明らかになった。現在、この種の研究は研究室レベルで行われており、計算機も大型の汎用機を用いている。しかし、実際の臨床の場で用いられることを考えた場合、ワークステーションのようなコンパクトな装置で利用されなければならないであろう。また、計算機には素人である医師の利用を考えた場合、ユーザインタフェースの充実は必須の課題と考えられよう。

最後に、医学面から有益な御助言を賜り、貴重なCT画像を提供して頂いた独協医科大学放射線科 藤岡陸久助教授、慶応義塾大学病院形成外科 中嶋英雄助教授、ならびに国立埼玉病院整形外科 泉田良一博士に深謝する。また、日頃御討論を頂く研究室の方々に感謝する。なお、本研究の一部は文部省科研費（奨励(A)63750348、一般(C)61550260）による。

(1989年3月2日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 横井茂樹：“コンピュータ断層像の3次元処理”，PIXEL, No.16, pp.105-112 (Jan., 1984)
- 2) 横井，鳥脇：“コンピュータ・グラフィックスによる医用画像の3次元表示”，PIXEL, No.47, pp.93-98 (Aug., 1986)
- 3) 横井，安田：“医療画像処理にみるCGの可能性”，PIXEL, No.64, pp.86-88 (Jan., 1988)
- 4) 安田孝美：“形成手術のシミュレーション・システム”，

PIXEL, No.72, pp.143-147 (Sep., 1988)

- 5) G. T. Herman: “Three Dimensional Imaging from Tomograms”, State University of New York Technical Report, No. MIPG8 (1981)
- 6) 萬，横井，鶴岡，三宅：“頭部CT像の3次元表示の一方”，ME誌，21, 6, pp.15-20 (Oct., 1983)
- 7) 安田，萬，横井，鳥脇，片田：“3次元グラフィックスを用いた頭部CT像3次元表示の手術計画への応用”，ME誌，24, 1, pp.22-27 (Feb., 1986)
- 8) K. H. Höhne and R. Bernstein: “Shading 3D-Images from CT Using Gray-Level Gradients”, IEEE Trans. Med. Imag., MI-5, 1, pp.45-47 (Mar., 1986)
- 9) 大下，横井，鳥脇，松尾：“核磁気共鳴CT画像のマルチプレックス・ホログラムによる立体表示”，ME誌，25, 1, pp.61-68 (Mar., 1987)
- 10) 英保茂：“医用3次元形状計測”，信学技報，IE87-7 (May, 1987)
- 11) J. Laschinger, M. W. Vannier, R. H. Knapp and S. Gronemeyer: “Three Dimensional Reconstruction of the Heart Using EK G-gated Magnetic Resonance Images”, Proc. NCGA '87, III, pp.86-91 (1987)
- 12) 大下，金，横井，鳥脇，松尾：“心臓の3次元動画表示のための計算機処理”，電気関係学会東海支部連合大会，p.630 (1988)
- 13) 安田，橋本，横井，鳥脇：“CT画像を用いた形成外科手術計画支援システム”，信学論(D)，J70-D, 11, pp.2134-2140 (Nov., 1987)
- 14) 曾山，安田，横井，鳥脇：“3次元画像を利用した股関節手術計画支援システム”，信学技法，PRU88-131 (Feb., 1989)
- 15) 安田，橋本，後藤，横井，鳥脇：“CT画像を用いた頭蓋形成手術計画支援システムの機能強化”，信学技法，PRU88-8 (May, 1988)

よこい しげき
横井 茂樹 昭和52年，名古屋大学工学部大学院博士課程修了。同年，同大学情報工学科助手。53年，三重大学工学部電子工学科助教授。57年，名古屋大学工学部情報工学科助教授。画像処理，コンピュータグラフィックスの基礎手法とその医学応用に関する研究に従事。

やすだ たかみ
安田 孝美 昭和57年，三重大学工学部電気工学科卒業。62年，名古屋大学大学院博士課程(情報)修了。同年，同大学助手。その間，61年，日本学術振興会特別研究員。コンピュータグラフィックス，医用画像の3次元表示とその応用に興味をもつ。