

特集 ■ 人・社会のモデル化の最前線

人体・臓器形態のバーチャル化
～ 三次元画像に基づく手術工程のモデリング～

中尾 恵

Nakao Megumi

京都大学

1. はじめに

内視鏡下手術やロボット手術に代表される先端医療技術の開発に伴い、その安全管理・手術時間の短縮と医師の負担減少などが患者と医師の双方のニーズとなっている。一方で、CTやMRIなどの撮像機器の進歩により、一人の患者から一回で数百枚から一千枚近い断層画像集合（以下、三次元画像）が取得されるようになり、大学病院では一か月にTB（テラバイト）オーダーの規模の医用画像が蓄積されている。このような背景の下、三次元情報の直感的な理解と対話的な操作を可能とするバーチャルリアリティ（VR）技術が応用された医用システムが開発されてきた。今回は多くのアプリケーションにおいて共通の課題となる人体・臓器形態のバーチャル化の観点でこれまでの研究を概観してみたい。

医用バーチャルリアリティ分野において、人体・臓器モデルに関する研究の先駆けとなったものに、1980年代後半から1990年代前半にかけて米国国立図書館で実施されたVisible Human Project [1]がある。当時において男性28.6GB、女性76.2GBそれぞれ1体のカラー断層画像集合が持つ情報量の多さはインパクトが大きく、画像処理や可視化、形状・弾性モデリングなど人体のバーチャル化に関連した多くの研究が進められた。1990年代には医学教育向けのデジタル解剖学アトラス [2]が製作され、内視鏡手術VRシミュレータ [3][4]についても報告がなされている。医学教育や手術手技トレーニングは人体・臓器のバーチャルモデルの利用形態のひとつであり、現在では多くのVRシミュレータが製品化されている。これらの現状は本誌の過去の特集記事 [5]にも詳しく紹介されている。

人体・臓器形態のバーチャルモデルを臨床現場における患者の治療に生かす試みも多くなされている。手術計画や術中ナビゲーションなどへの利用である。臨床現場では、1回の撮像で得られる数百MB～GBオーダーの三次元画像から即時にバーチャルモデルを作成することが求められる。症例のバリエーションは無数にあり、かつ、医療従事者が手術前や術中に用いることになるため、利用形態を踏まえた即時性のあるモデリングと直観的かつ対話操作が可能なアプリケーションを考える必要がある。本稿では特に、このような臨床現場における外科的治療への活用を目指した、患者個人の三次元画像に基づく人体・臓器形態のバーチャル化に目を向けたい。

2. 人体・臓器形態のポリウムモデリング

医用画像処理・認識に関する研究により、三次元画像内の臓器領域を半自動的あるいは対話的に比較的短時間で抽出することができるようになってきている。臓器領域の抽出後、術前計画や術中ナビゲーションに必要な人体・臓器の局所構造や力学特性に関する情報はメッシュ形式に変換して記述する方法が取られる。整形・形成外科領域では三次元医用画像からメッシュモデルを作成し、複雑な形状を持つ骨組織同士の接合方法の計画や応力解析に用いる研究がなされている。メッシュモデルはサーフェスレンダリングによってその表面が可視化されることが多いが、例えば切開や切削などによって構造自体に変化が生じる場合に逐次表面形状の再構築が必要となり、時間変化する構造をその内部を含めて実時間で精緻に表現することが難しい。また、計算精度とコストの両方を踏まえた妥当なモデルを製作するためには要素

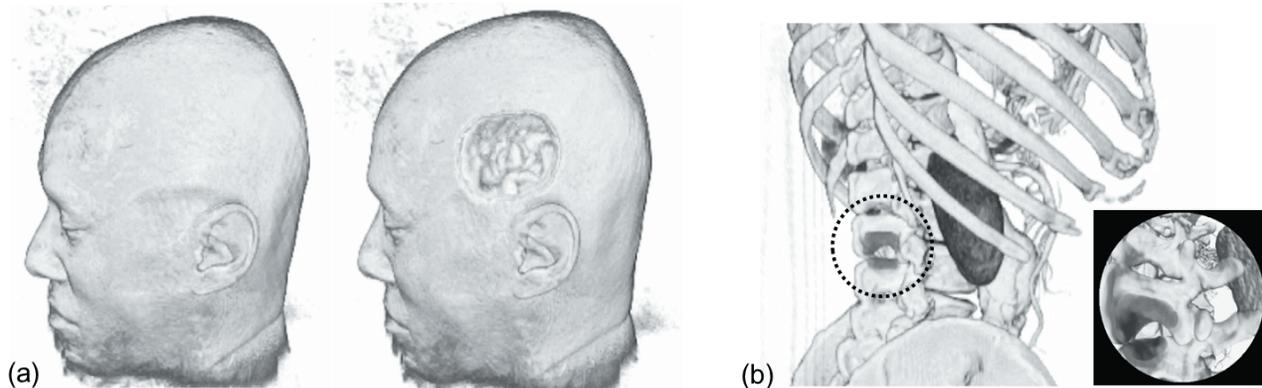


図 1 2D ポインティングによる実時間ボリューム切削, (a) 頭蓋の部分切除表現, (b) 脊椎の切削予定箇所を入力と内視鏡ビュー

分割に関する知識やノウハウが必要で、依然多くの解析ソフトウェアは臨床現場において医療従事者が利用しやすい設計になっているとは言い難い。

これに対し、医療従事者が普段から三次元画像を見慣れていることに着目して、そのボリュームレンダリング像に対する自然なインタラクションの提供を目指すアプローチの研究が行われてきた [6][7]。三次元画像に対する対話的な編集・操作を実現するためのボリュームモデリングによるアプローチである。図 1 (a) はその一例であり、マウスを用いて頭部 MRI のレンダリング像を指定し、インタラクティブに頭蓋の一部を切削している様子である。レイキャスティング [8] と同様のプロトコルで視線方向に各ボクセルに定義された不透明度を累積していき、閾値を超えた所を表面とみなすことによってマウスカーソルに対応したレンダリング像表面上の三次元位置を取得することができる。三次元画像と同サイズのラベル画像に切削箇所を保持しておき、レンダリング時に GPU (Graphics Processing Unit) 上で、サブボクセルレベルで不透明度を補間することによって時間変化する切削面の境界を精緻に表現することができる [9]。ボリュームデータであるので、切削領域を透明にすることによって、頭蓋に遮蔽されていた脳の構造の一部が可視化される。

図 1 (b) は椎間板ヘルニアや脊柱管狭窄症に対する内視鏡手術において、脊椎の一部を切削する際の切削予定箇所 (破線内部の濃い色で表示されている部分) を、ボリュームレンダリング像を参照しつつ入力した結果を示している。内視鏡のレンズ特性を反映して可視化することによって、内視鏡挿入時の切削予定箇所の見え方を事前に確認しておいたり、手術時に内視鏡の位置・姿勢をリアルタイムに計測し、レンダリング時のカメラパラ

メータに反映させることによって術中ナビゲーションの用途にも応用することが試みられている。

切削などによる骨組織の構造変化に対応したボリュームモデリングの例を示したが、手術時に柔らかい臓器に与えられる別の操作のひとつに弾性変形がある。切削などの操作と異なり、変形結果を可視化するために三次元画像ボクセル単位で再構築するのは計算コストが大きい。この問題に対し、三次元画像の変形をボクセル単位ではなく、空間をよりスパースにサンプリングした頂点 (代替ジオメトリ) の移動によって変形を記述し、その頂点間の情報を GPU 上のテクスチャ補間によって可視化することで変形後の像を得るボリューム変形のアルゴリズムが開発された [7][10][11]。代替ジオメトリには点群 [12] やメッシュ [13] などの形式が考えられており、図 2 (c)、図 3 (c) は三次元画像とその操作対象領域をスパースにサンプリングした四面体メッシュを併用して臓器のボリューム変形を表現している例である。このとき、各頂点の変位はユーザの操作に対する弾性体の力学特性を定式化した実時間変形モデルに基づいて求められる。次章では臓器変形のモデル化の方法を幾つか紹介する。

3. 臓器変形のモデリング

弾性体の変形を安定かつ高速に算出する手法として、ばね質点モデルや有限要素モデルなど多くの研究がなされてきた [14]。特に有限要素法は弾性体を有限の要素に分解し、物理的に厳密な支配方程式を大規模な連立一次方程式に置き換えることによって、安定した解の導出を実現する。ヤング率やポアソン比などの物性値を直接扱うことができ、精度の良い解が得られるが、メッシュの頂点数に比例したサイズの連立一次方程式

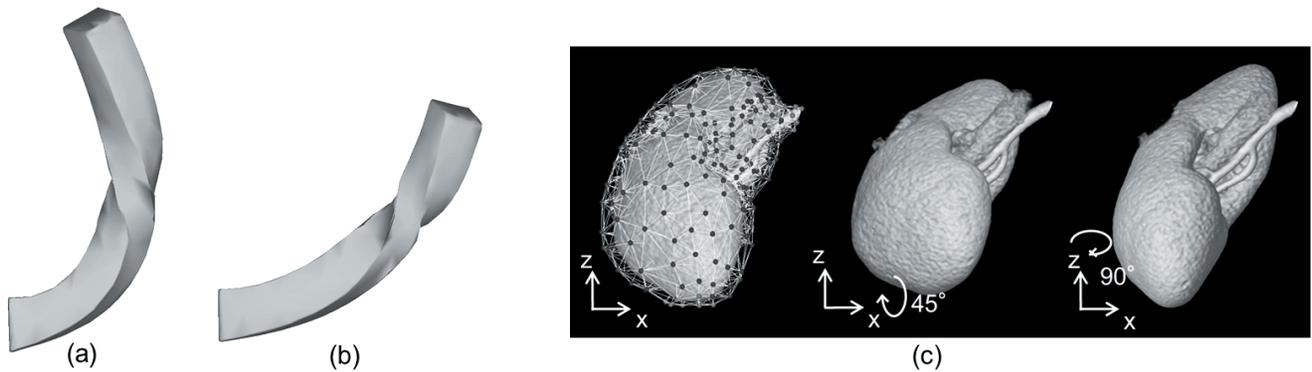


図2 (a) 弾性体の回転・ひねりを伴う大変形, (b) 硬さが部分的に異なる場合, (c) 大変形モデルに基づく腎臓のポリウム変形

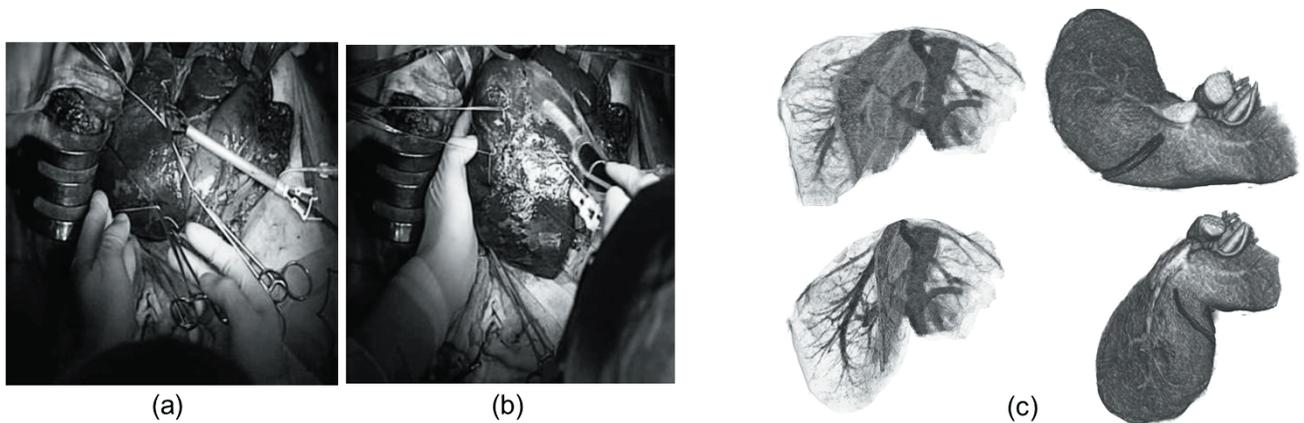


図3 肝臓の術中変形に対応した可視化, (a)(b) 肝切除術における手術中の変形, (c) ポリウム変形による切離面の変化の提示

を解く必要があり、計算コストが高い。このため、多くの高速化手法の提案がなされている [15][16]。一方、線形有限要素モデルは微小変形の範囲では高精度な解が得られるものの、ひねりや曲げなどの回転を含む変形では体積が膨張し、不自然な変形結果となることが知られている [17]。手術において、臓器は把持や圧排、呼吸などの影響によって比較的大きく変形するため、弾性体の大変形を実時間で求める問題は現在においても研究課題のひとつとなっている。

インタラクティブCGやCADの分野で研究されてきたメッシュ編集法を応用して想定される臓器変形を表現する試みもなされている。メッシュの頂点単位で定義される離散ラプラシアンとユーザからの入力による制約を反映した評価関数を定義し、その最小化問題を解くことでモデル形状を修正する [18]。回転を含む自然な形状修正を達成するために、各頂点において局所座標系を保持し、すべての頂点位置を隣接頂点の座標系を用いて表現する考え方が提案されている [19]。メッシュの各頂点の三次

元位置は、局所座標系における相対位置を、グローバル座標系での値に変換することによって求められる。この手法では物体の局所の回転を各局所座標系の回転量として記述し、頂点間で補間することができる。図2 (a) は直方体形状の弾性体を想定してひねりと曲げの両方を同時に与えた場合の変形をシミュレートした例である。(b) は左半分が硬く、右半分が柔らかいモデルに (a) と同様な制約条件を与えた場合である。(c) は腎臓表面を手術鉗子で把持し、腎動脈を軸に回転させた際のポリウム変形結果である。

肝臓がんに対して実施される肝切除術にもポリウム変形を応用できる。肝切除術では、肝臓内の複雑な血管の走行を踏まえて切離面を三次元画像上に記述し、計画した切離面を参照しながら手術を進める試みがなされている。しかし、図3 (a) (b) のように手術時には視野を確保するためなどに肝臓を変形させるため、切離すべき方向が変化する。(c) は術中に想定される変形をシミュレートし、切離面の変化を観察する用途で作

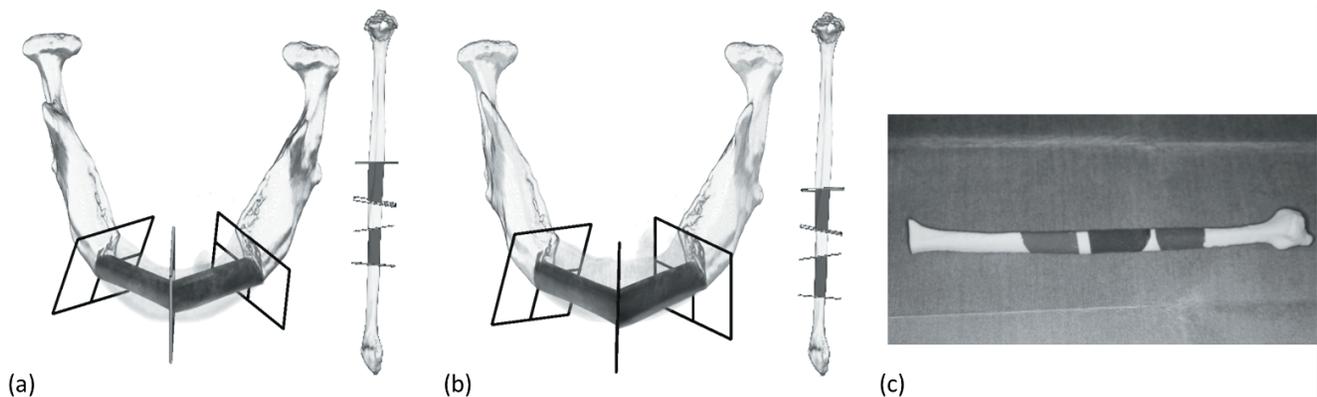


図4 下顎骨再建術における腓骨移植のバーチャル設計。

(a) 下顎切除領域への腓骨移植シミュレーション (2分割の場合), (b) 医師の対話操作による計画内容の改善, (c) 3D プリンタによる計画内容の出力結果 (3分割の場合)

成されたボリューム変形像である。新たに得られた切離面や切離の進展に伴って現れる血管構造を確認しつつ手術を進めることができる。このように形状編集アルゴリズムは医療従事者がイメージする臓器変形を得る用途に有効である。

4. 手術工程のバーチャル化

最後に、下顎骨再建術における腓骨移植の計画のために開発したバーチャル手術計画システム [20] を紹介したい。下顎歯肉癌の治療による切除や事故による下顎骨の欠損に対して行われる下顎骨再建に患者自身の腓骨を用いる方法が試みられているが、熟練医であっても下顎の切除領域に対する理想的な腓骨の分割と配置を得ることは容易ではない。本システムは、三次元 CT 画像から構築された下顎ボリュームモデルを可視化し、対話的に腓骨の分割・配置をシミュレートすることを可能とする。図 4 (a) は 2 分割された腓骨セグメントを移植に用いる場合であり、下顎切除領域に各セグメントを配置した際の再建後の下顎の推定結果が可視化されている。医師はレンダリング像上に複数配置されたバーチャル面を対話的に操作し、患者の元の下顎の形態や機能をより良く復元できるよう計画内容を修正する。特に本システムは専門医の見解に基づいて元の下顎と再建後の下顎を定量評価する体積充填率や形状誤差など幾つかの形状評価指標を備えており、医療従事者はその評価値を参照しつつ、より良い腓骨の分割や配置を定量的かつ対話的に探索することができる。図 4 (c) は 3D プリンタによって出力された腓骨の分割パターンである。この実模型に基づいて手術時に用いる金属製のガイドを製作し、そのガイドに沿って腓骨

を切断することも試みられており、計画内容に沿ったより精密な手術の実現が期待される。

これまでに幾つかの人体・臓器形態のバーチャルモデルの利用形態を示してきたが、医療従事者が患者の三次元画像に基づいて手術をシミュレートすることによって、頭の中のイメージであった手術プロセスが医療を専門としない我々にもある程度理解できる形で可視化されていることに気づく。現状の外科学領域では手術書や過去の症例の手術ビデオ等を通して代表的な手術工程を定性的に知ることはできるが、手術工程の各要素は定量的に評価されていないことが多い。この現状において、医療従事者がイメージする手術工程をバーチャル像上に自身で表現することは、手術工程の定量的把握と客観的評価の手段として有意義である。例えば、執刀医が経験的に活用している暗黙的な医学知識や症例ごとの手術戦略をバーチャル化し、記述・保存することで、執刀医が自身の手術内容を客観的に評価できるだけでなく、後世に定量化された手術法として残すことができる。また、想定する手術工程を可視化することで、医療従事者間の意思疎通の円滑化や手術時間の短縮が可能となり、医療従事者と患者の双方の負担軽減に繋がる。さらなる人体・臓器形態のモデリング、手術工程のバーチャル化を通して、症例ごとの最良の手術の探求に繋がることを期待している。

参考文献

- [1] M. J. Ackermann, The Visible Human Project: A Resource for Anatomical Visualization, Proc. 9th World Congress on Medical Informatics, pp.1030-1032 (1998)
- [2] K. H. Hohne, B. Pflesser, A. Pommert, M. Riemer, T. H.

- Schiemann, R. Schubert, U. Tiede,: A New Representation of Knowledge Concerning Human Anatomy and Function, *Nature Medicine*, Vol. 1, No. 6, pp.506-511 (1995)
- [3] M. Gross,: Graphics in Medicine: From Visualization to Surgery Simulation, *ACM Trans. on Computer Graphics* Vol. 32, pp.53-56 (1998)
- [4] U. Kuhnappel, H. K. Cakmak, H. Mass,: Endoscopic Surgery Training Using Virtual Reality and Deformable Tissue Simulation, *Computers & Graphics*, Vol. 24, No. 5, pp.671-682 (2000)
- [5] 医療からみた VR, *日本バーチャルリアリティ学会誌*, Vol. 15, No. 1, pp.8-40 (2010)
- [6] C. D. Correa, D. Silver and M. Chen,: Feature Aligned Volume Manipulation for Volume Illustration, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12, No. 5, pp.1069-1076 (2006)
- [7] J. Georgii and R. Westermann,: A Generic and Scalable Pipeline for GPU Tetrahedral Grid Rendering, *Proc. IEEE Visualization*, pp.1345-1352 (2006)
- [8] M. Levoy,: Efficient Ray-tracing of Volume Data, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 9, No. 3, pp.256-261 (1990)
- [9] K. Imanishi, M. Nakao, M. Kioka, M. Mori, M. Yoshida, T. Takahashi and K. Minato,: Interactive Bone Drilling using a 2D Pointing Device to Support Microendoscopic Discectomy Planning, *Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 5, No. 5, pp.461-469 (2010)
- [10] M. Nakao and K. Minato,: Physics-based Interactive Volume Manipulation for Sharing Surgical Process, *IEEE Trans. on Information Technology in Biomedicine*, Vol.14, No. 3, pp.809-816 (2010)
- [11] M. Nesme, Y. Payan and F. Faure,: Accurate Interactive Animation of Deformable Models at Arbitrary Resolution, *International Journal of Image and Graphics*, pp.175-202 (2010)
- [12] F. Faure, B. Gilles, B. Guillaume, D. K. Pai,: Sparse Meshless Models of Complex Deformable Solids, *ACM Trans. on Graphics* 30, pp.1-11 (2011)
- [13] M. Nakao, K. W. C. Hung, S. Yano, K. Yoshimura and K. Minato,: Adaptive Proxy Geometry for Direct Volume Manipulation, *Proc. IEEE Pacific Visualization*, pp.161-168 (2010)
- [14] A. Nealen, M. Muller, R. Keiser, E. Boxerman and M. Carlson,: Physically Based Deformable Models in Computer Graphics, *Proc. of Eurographics*, pp.809-836 (2005)
- [15] M. Bro-Nielsen and S. Cotin,: Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation Using Finite Elements and Condensation, *Eurographics Computer Graphics Forum*, Vol. 15, No. 3, pp.57-66 (1996)
- [16] K. Hirota and T. Kaneko,: Haptic Representation of Elastic Object, *PRESENCE*, Vol. 10, No. 5, pp.525-536 (2001)
- [17] M. Muller and M. Gross,: Interactive Virtual Materials, *Proc. Graphic Interface*, pp.239-246 (2004)
- [18] M. Botsch and O. Sorkine,: On Linear Variational Surface Deformation Methods, *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 14, No. 1, pp.213-230 (2008)
- [19] Y. Lipman, D. Cohen-Or, R. Gal, D. Levin,: Volume and Shape Preservation via Moving Frame Manipulation, *ACM Trans. on Graphics*, Vol. 26, No. 1 (2007)
- [20] M. Nakao, M. Hosokawa, Y. Imai, N. Ueda, T. Hatanaka, K. Minato, T. Kirita, T. Matsuda,: Volumetric Surgical Planning System for Fibular Transfer in Mandibular Reconstruction, *Proc. IEEE EMBC*, pp.3367-3370 (2013)

【略歴】

中尾 恵 (NAKAO Megumi)

京都大学大学院 情報学研究科 准教授

1999年京都大学工学部卒業, 2003年京都大学情報学研究科博士課程修了. 同年, 同大学院医学研究科助手(特任), 2004年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手, 2007年同助教. 2009年ハーバード大学医学部在外研究員を経て, 2011年4月より現職. 専門は医用バーチャルリアリティ, 生体医工学. 文部科学大臣表彰 若手科学賞, IPA 未踏ソフトウェア創造事業 スーパークリエイター, 本学会論文賞, 学術奨励賞などを受賞.