

VR技術の医学応用：手術シミュレーションシステムの開発

鈴木， 薫之
東京慈恵会医科大学高次元医用画像工学研究所

鈴木， 直樹
東京慈恵会医科大学高次元医用画像工学研究所

服部， 麻木
東京慈恵会医科大学高次元医用画像工学研究所

林部， 充宏
東京慈恵会医科大学高次元医用画像工学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/19258>

出版情報：福岡醫學雑誌. 96 (2), pp.44-48, 2005-02-25. 福岡医学会
バージョン：
権利関係：

VR 技術の医学応用：手術シミュレーションシステムの開発

¹⁾ 東京慈恵会医科大学 高次元医用画像工学研究所

²⁾ 九州大学病院先端医工学診療部

鈴木薫之¹⁾, 鈴木直樹¹⁾, 服部麻木¹⁾, 林部充宏¹⁾, 大竹義人¹⁾,
小西晃造²⁾, 掛地吉弘²⁾, 橋爪 誠²⁾

はじめに

近年著しく性能向上を遂げたコンピュータにより、コンピュータグラフィックス (Computer Graphics; CG) 技術やバーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) 技術を駆使した画像コンテンツを日常的に触れる機会が増えてきたといえる。一方医学においても、コンピュータ技術の発達に加え、CT や MRI といった計測装置の性能向上により、計測した情報から生体内の立体構造を高速に再構築し、生体が本来持っている三次元構造と四次元現象を可視化することが可能になった。同時にこの膨大なデータを直感的に、かつインタラクティブに扱うことが必要とされるようになり、VR 技術が応用されるようになってきた。この VR 技術の医学応用、いわゆる医用 VR 技術の出現により、詳細な人体動作の解析や、手術支援システムに関する研究開発が行われるようになった。本稿では、この手術支援に関する研究分野である手術シミュレーションシステムについて、われわれが研究開発してきた事例をもとに紹介する。

1. リアルタイムイメージングと触覚提示による手術シミュレーション

手術シミュレーションシステムとは、仮想空間内に構築した患者臓器モデルを用いて、実際の手術を施行する前に仮想空間内で術式の検討を行い、手術計画を立案するためのシステムである。さらに、患者データを用いた手術手技のトレーニングを行うことが可能なシステムである。同じ患者データを用いて繰り返しシミュレーションを実行することが可能なため、患者にとって適切な術式を決定し、基礎的な手技から多くの経験を必要とする難易度の高い手技の習得までをも可能である。

このような手術シミュレーションシステムでは、作業の過程と結果がリアルタイムに処理、表示されなければインタラクティブに外科手術を進行していくことができない。つまり、内視鏡手術時のようにビデオ画像の更新速度と同等にリアルタイム性をもつことが望ましい。そのため、リアルタイム変形が可能な患者臓器モデルが必要となり、国内外の研究機関において広く臓器モデルに関する研究開発が行われている^{1)~7)}。一方、手術作業に適した力覚提示装置 (force feedback device) を用いて、実際の開腹手術を行う際の術者が感じ取る触覚を手術シミュレーションシステムで提示することにより、臓器の柔らかさなどもシミュレーションで再現可能となり、一つ一つの作業を正確にかつより現実感のある作業が可能となる。

われわれは手術シミュレーションシステムのための患者臓器モデルとして、sphere-filled model⁶⁾⁷⁾ と呼ばれるモデルを考案した。本モデルは、臓器モデル内部を同一半径の球の集合体として構成し、外部からの力の入力に対する球群の移動および球同士の相互作用によって臓器モデルの変形を行う。このように、本来の臓器変形では臓器を構成する軟組織の相互作用によるものであるが、臓器変形を幾何学的な事象に置き換えることによってリアルタイム変形処理の実現を行うことが可能である。また、臓器表面形状のみならず、血管構造も同様に三次元再構築することにより、それらの変形状態もリアルタイムに観察するこ

Shigeyuki SUZUKI¹⁾, Naoki SUZUKI¹⁾, Asaki HATTORI¹⁾, Mitsuhiro HAYASHIBE¹⁾, Yoshito OTAKE¹⁾, Kozo KONISHI²⁾, Yoshihiro KAKEJI²⁾ and Makoto HASHIZUME²⁾

¹⁾ Institute for High Dimensional Medical Imaging, The Jikei University School of Medicine

²⁾ Center for Integration of Advanced Medicine and Innovative Technology, Kyushu University Hospital
Medical Virtual Reality: An Application to Surgery Simulation

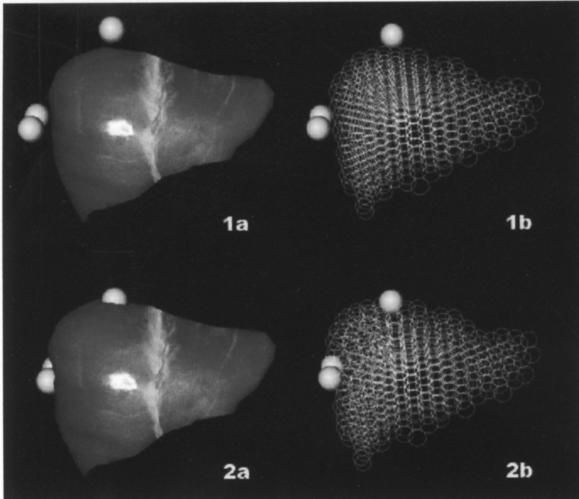


図1 sphere-filled model による肝臓モデル. 左図は肝臓表面形状の変形の様子を示し, 図右にはそのときの臓器内部に充填した球群の状態を示している.

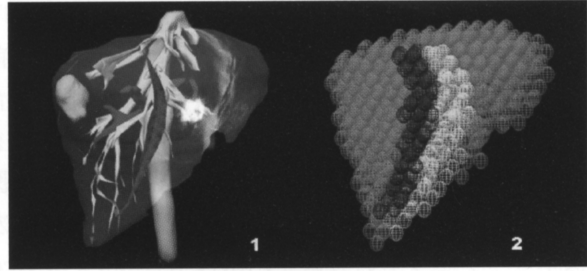


図2 肝臓モデルの切開処理変形の様子. 図右に示すように, 切開面周辺の球群の挙動によって, 切開形状を表現している.

とが可能である. 図1に sphere-filled model を適用した肝臓モデルを示す. 図では白い3個の球を術者の三本の指と想定したときの臓器変形の様子を示している. 同図右に示すように球が充填配置されており, 外力による球群の移動の様子を示している. このモデルの特徴には, リアルタイム処理に適している他に, 臓器特有の複雑な形状であっても臓器の輪郭が決定されれば球を規則的に充填する作業だけで, 自動的に変形可能な臓器モデルの作製を行うことができるということも挙げられる. さらに臓器間の干渉も球に関する演算を行うのみであるため, 特別な演算を要せずに表現することが可能である. 図2には肝臓モデルを切開処理したときの変形状態を示す. 同図では肝表面を半透明表示し, 肝内部を走行する脈管の状況を観察することが可能である.

一方, われわれはできるだけ自然な環境下で高度な画像情報を利用してシミュレーションを実行できる, 視野のほぼ全体に対して高解像度な画像を提示可能なコックピット (Virtual Surgery, Tele-surgery Cockpit) を構築してきた⁸⁾. 本コッ

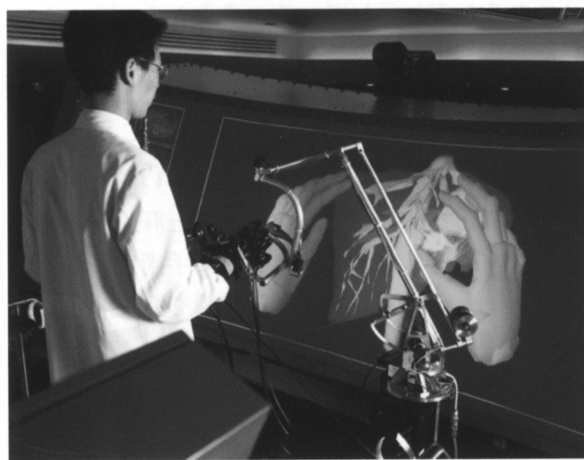


図3 Virtual surgery, Tele-surgery Cockpit の外観図 (1) と force feedback device を装着してシミュレーションを行っている様子.

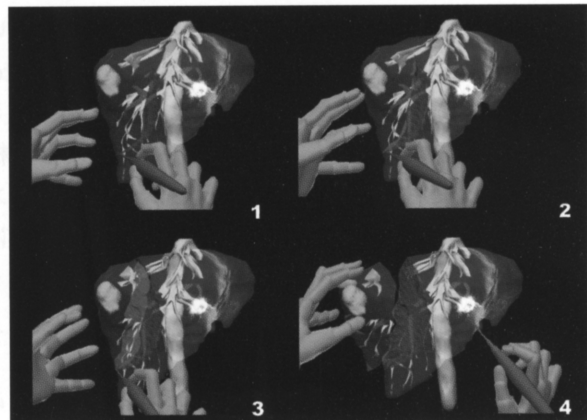


図4 肝部分切除術シミュレーションの様子. 同図1から4へと時系列に進行状況を示している.

クピットは、仰角を 45 度まで変更でき、立体視が可能な大型リアプロジェクションディスプレイと、両手用 force feedback device を搭載し、上下および前後に移動可能なリフターから構成される。ディスプレイの仰角とリフターの位置をシステムの利用者に合わせて変更することで、実際の開腹手術と同様な視点での手術シミュレーションが可能になっている。また、今後予定している遠隔手術時にマスタ側として機能することも可能であり、その際に遠隔地にいる医師とのコミュニケーションや患者のデータをシステムの利用者が近くで閲覧できるように、リフターの左右に大型のプラズマディスプレイを設置した。図 3 には本コックピットの外観と、force feedback device を装着して手術シミュレーションを実行している様子を示す。さらに、本コックピットを用いた肝部分切除術のシミュレーションを行っている様子を図 4 に示す。同図では 1 から 4 へと時系列にシミュレーション進行状況の様子を示している。本シミュレーションでは、切除処理終了後即座に残存肝体積の算出が可能であり、最適な切除ラインの決定などの切除シミュレーションの評価を行うことが可能である。この図に示す切除処理では、残存肝体積率が約 68 % となった。

2. ロボット手術のための手術シミュレーションシステム

近年 da Vinci™, ZEUS™ (Intuitive Surgical Inc.) などのロボティクス技術を応用した内視鏡下手術支援装置を用いて、低侵襲かつ正確な操作による内視鏡手術が行われるようになってきた。術中支援として、主要血管の走行や腫瘍の位置などの、三次元的にその位置を把握することが難しくかつ重要な情報をイメージガイド下で支援する、ナビゲーション機能を備えたシステムの開発などが行われている⁹⁾。

このような手術ロボットを広く臨床に応用するためには、外科医を新しい機器に慣れさせ、十分に訓練してから実際の手術を施行する必要がある。このような問題を解決するために、ロボット手術特有の手技を習得することが可能なトレーニング用手術シミュレーションシステムの開発を九州大学病院先端医工学診療部の橋爪教授らと行っている¹⁰⁾¹¹⁾。本研究開発では、da Vinci™ システムを対象として、患者データを症例別にデータベース化し、全国の医療機関からアクセスしてシミュレーションを行うことが可能なロボット手術シミュレーションセンターの構築を行っており、本システムにより遠隔地からの熟達した技術を持つ医師からの指導、あるいは拠点間での手技の検討などが可能となると考える。また市販されているトレーニングシステムとは異なり、適切な患者データを用いたシミュレーションを実行することが可能となる。

システムでは、da Vinci™の各リンク形状・リンク間距離等を計測し、3D CAD 上で作成した幾何モデルを用いた。また、先端効果器としては腹腔鏡下胆嚢摘出術において最低限必要となる丸鉗子、Cadriere 鉗子、電気メス、はさみのモデリングを行った。図 5 には再構築した da Vinci™モデルを示す。同図では(1)アーム部全体、(2)丸鉗子、(3)Cadriere 鉗子、(4)電気メスをそれぞれ示している。またシミュレーションシステムで用いる force feedback device には、世界的に広く用いられ比較的入手しやすい PHAN-ToM™ (SensAble Technologies Inc.) を用いている。図 6 には胆嚢摘出術を想定したシミュレーションの様子を示している。同図 a には遠隔地側が force feedback device を操作しながらシミュレーションを行っている様子を示し、同図 b にはサーバ側でシミュレーションの状況をモニタリングしている様子を示している。また、胆嚢摘出術における臓器変形の様子を図 7 に示している。このとき鉗子と肝臓が接触した場合には使用者に警告音を提示し、手術手技をスコア化していくことにより、客観的に手術手技の評価を行うことが可能である。さらに、本システムでは、シミュレーション内の鉗子動作機構を変更することにより、一般の腹腔鏡手術や ZEUS™によるロボット手術への適用が可能であるといえる。

まとめ

手術シミュレーションシステムにより、これから手術を施行しなければならない患者自身のデータを用いた最適な術式を検討することができ、その術式に習熟してから現場に臨むことが可能となると考える。さらに、今までは現場の体験でしか教えられなかった経験を疑似体験させることができるようになると考

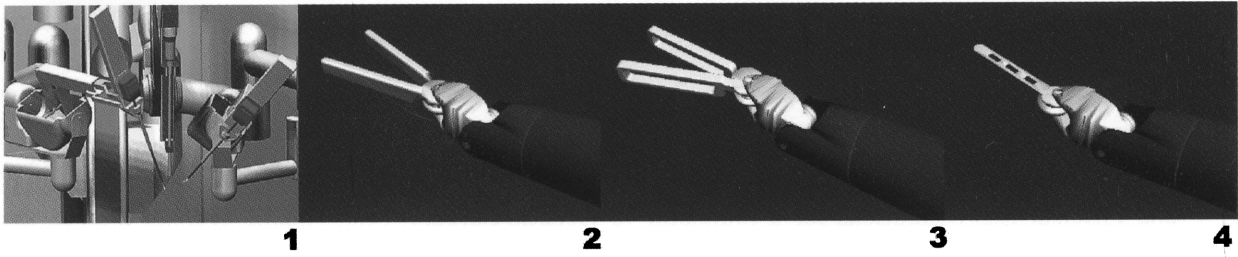


図5 再構築した da Vinci™の幾何モデル。1. アーム部, 2. 丸鉗子, 3. Cadere 鉗子, 4. 電気メス

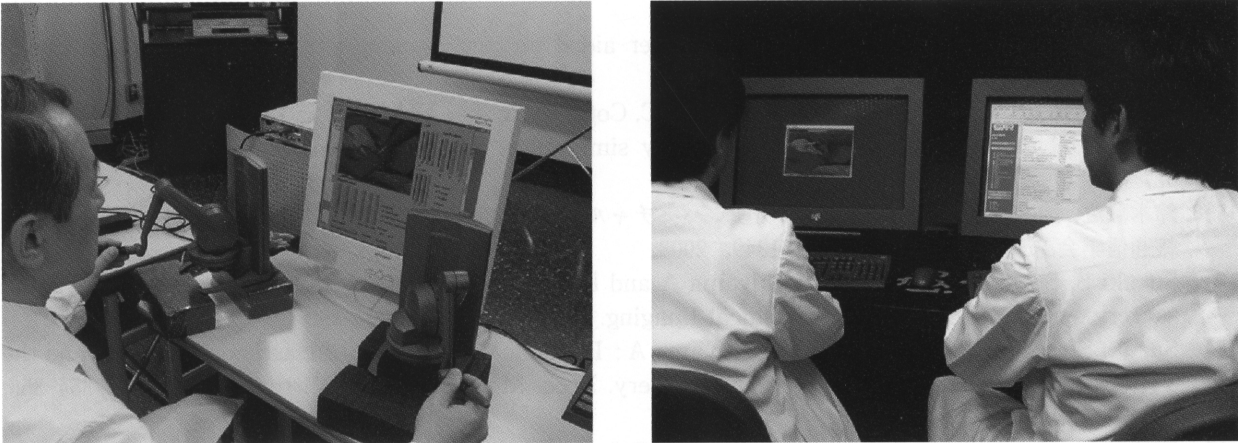


図6 胆嚢摘出術を想定したシミュレーションの様子。同図 a には遠隔地側が force feedback device を操作しながらシミュレーションを行っている様子を示し, 同図 b にはサーバ側でシミュレーションの状況をモニタリングしている様子を示している。

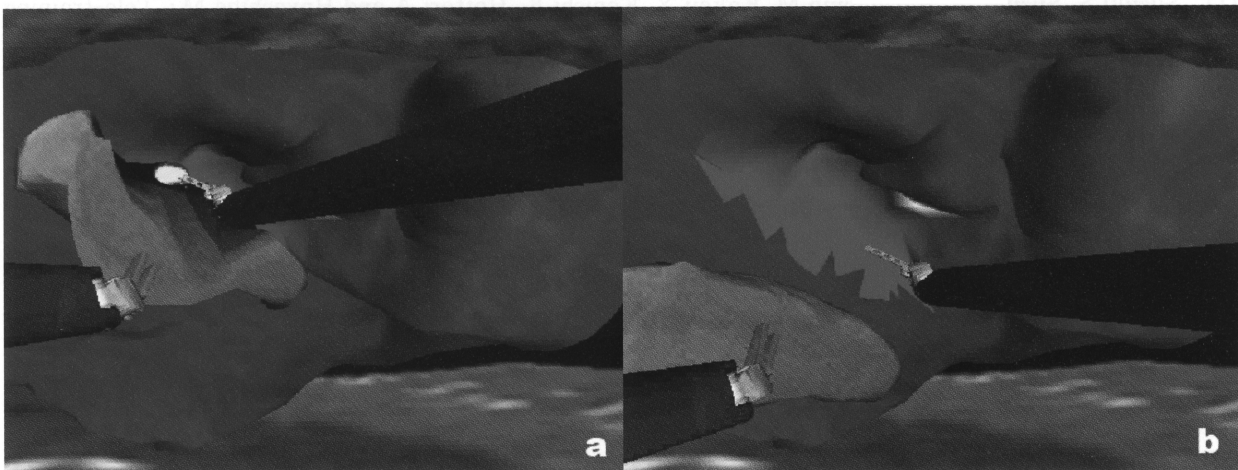


図7 胆嚢摘出術シミュレーション時の臓器変形の様子。同図 a では左手鉗子で胆嚢を把持し, 右手鉗子で剝離しているときの胆嚢変形の様子を示す。また同図 b では胆嚢剝離終了後, 左手鉗子で把持している様子を示す。

えている。

また近年では, 手術中に患者自身と患者体内の三次元画像を空間的に合成することにより, 患者の体内を見ながら手術できるようにする data fusion 技術を用いたナビゲーションシステムの研究開発⁹⁾も広く行われるようになってきており, 血管走行や腫瘍の位置などを手術中に三次元的に確認しながら手術を進

められるようになる。このような術前，術中の手術支援システムの開発により，手術手技自体の安全性や治療効果の評価が可能になると考えている。

文 献

- 1) Cotin S, Delingette H, Bro-Nielsen M, Ayache N, Clement JM, Tasseti V and Marescaux J: Geometric and Physical Representations for a Simulator of Hepatic Surgery. *Stud Health Technol Inform.* 29: 139-151, 1996.
- 2) Berkley J, Weghorst S, Gladstone H, Raugi G., Berg D and Ganter M: Fast finite element modeling for surgical simulation. *Stud Health Technol Inform.* 62: 55-61, 1999.
- 3) Balaniuk R and Salisbury K: Soft-Tissue Simulation Using the Radial Elements Method. *Lecture Notes in Computer Science.* 2673: 48-58, 2003.
- 4) Robb RA, Hanson DP and Camp JJ: Computer-aided surgery planning and rehearsal at Mayo Clinic. *Computer.* 29: 39-47, 1996.
- 5) Marescaux J, Clement JM, Tasseti V, Koehl C, Cotin S, Russier Y, Mutter D, Delingette H and Ayache N: Virtual reality applied to hepatic surgery simulation: The next revolution. *Ann. Surg.* 228 (5): 627-634, 1998.
- 6) 鈴木薫之，鈴木直樹，服部麻木，内山明彦：バーチャル手術システムに適した弾性臓器モデルの開発。電子情報通信学会誌。J 86-DII (9)：1341-1349, 2003.
- 7) Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Uchiyama A and Kobayashi S: Sphere-filled organ model for virtual surgery system. *IEEE Trans. on Medical Imaging.* 23 (6): 714-722, 2004.
- 8) Suzuki S, Suzuki N, Hattori A and Uchiyama A: Dynamic deformation of elastic organ model and the VR cockpit for virtual surgery and tele-surgery. *Proc. Medicine Meets Virtual Reality* 11: 354-356, 2003.
- 9) 服部麻木，鈴木直樹，橋爪誠，赤星朋比古，小西晃造，山口将平，島田光生，林部充宏：ナビゲーション機能を備えたロボット手術システム (da Vinci) の開発。日本コンピュータ外科学会誌。3 (4)：281-287, 2001.
- 10) 鈴木薫之，鈴木直樹，橋爪誠，掛地吉弘，小西晃造，服部麻木，大竹義人，林部充宏：ロボット手術システム da Vinci のための遠隔手術シミュレーションシステムの開発。日本コンピュータ外科学会誌。5 (3)：177-178, 2003.
- 11) Suzuki S, Suzuki N, Hashizume M, Kakeji Y, Konishi K, Hattori A and Hayashibe M: Tele-training simulation for the surgical robot system "da Vinci". *Proc. of Computer Assisted Radiology and Surgery*: 86-91, 2004.

(参考文献のうち，数字がゴシック体で表示されているものについては，著者により重要なものと指定された分です。)

注：本稿は第 19 回先端医工学セミナー講演会での発表内容を基に加筆して寄稿いただいたものである。

著者プロフィール

鈴木直樹 (すずき なおき)

東京慈恵会医科大学 教授 (高次元医用画像工学研究所)。工博，医博，理博。

◆略歴 1981 年早稲田大学大学院博士後期課程修了，工博受領。同年東京慈恵会医科大学助手，医用エンジニアリング研究室に勤務。1998 年東京慈恵会医科大学総合医科学研究センター高次元医用画像工学研究所 副所長，同大学 助教授。2000 年同大学同研究所 所長。2002 年同大学教授。現在に至る。

生体系のシミュレーション，医用三次元像，四次元像技術の開発，メディカルバーチャルリアリティの臨床応用などに従事。