総説

患者臓器モデルを用いた手術シミュレーション

Surgery Simulation with a Patient-specific Model: Application to Surgical Planning, Training, and Education

鈴木薫之（正会員），鈴木直樹（正会員）

東京慈恵会医科大学高次元医用画像工学研究所

Shigeyuki Suzuki, Naoki Suzuki

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

Abstract

3D medical images reconstructed from MRI or CT images are currently used in various applications for diagnosis and for treatment. The application of medical virtual reality techniques to 3D images has a large potential to provide future medical treatments through telemedicine. Surgery simulation is one of the main applications of medical virtual reality. A surgery simulation system focuses on the requirements of reality, real-time visual and haptic feedbacks, quantitative deformation, representation of a tissue's internal structures such as blood vessels, and on the various forms of manipulation. By using such a simulation system, surgeons are able to trial various approaches to an operation and so carefully plan procedures before the actual surgery. This paper introduced a surgery simulation system using a patient-specific model that takes our research as an example, especially a system for laparotomy and laparoscopic surgery, a tele-surgery simulation system and surgery simulation for robotic surgery training.

Key words

Virtual reality, Surgery simulation, Patient-specific model, Real-time simulation.

1. はじめに

近年の科学技術の発達は著しく，医療分野においても X 線 CT や MRI などの画像診断装置が発達し，生体の形態的情報を三次元画像，さらには動的变化を含む四次元画像として取得することができるようになってきた．また，医学におけるバーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) 技術，いわゆる医用 VR 技術の出現により，時空間を自由に取り扱える人体動作の四次

元的解析や，治療支援システム，手術支援システムに関する研究開発が進められてきている．

手術支援システムの一つに手術シミュレーションシステムがあり，VR トレーニングの有用性はすでに報告されている¹⁾．手術シミュレーションシステムは二つに大別でき，一つは教育，訓練のための手術シミュレーションシステムである．腹腔鏡手術における基本的な鉗子操作の練習や奥行き感覚の体得，数種類のプログラムされたデータを用いた手術手技の練習などが行なえ，製品化されているシステム²⁾³⁾もある．一方は，これから手術を行なう患者臓器モデルを用いた手術計画および手術手技の試行・訓練を可能とする手術シミュレーションシステムである．術前に撮像した CT データセットから三次元再構築した臓器モデルを用いてシミ

Fig. 1 Cutting deformation of the liver model. The upper images show the surface rendering model while the lower show the volumetric model.

ュレーションを行なう。本稿では、患者臓器モデルを用いた手術シミュレーションシステムについて、われわれが行なっている研究開発内容を例に挙げて概説する。

2. 軟組織変形モデル

軟組織変形モデルは外科手術シミュレーションシステムにとって必要不可欠な要素であり、リアルタイムかつ定量的な変形を可能にするための多くの研究報告がされている^{4)~8)}。また、手術計画に用いるためには、一症例ごとに臓器モデルを構築するため、CTデータセットから高速にモデリングすることが望ましいと考える。そこでわれわれは、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を可能とするsphere-filled modelを考案した^{6)~8)}。本モデルは、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なうことができるという特徴もあり、高速なモデリングが可能である。また、臓器の大きさや形状に応じて充てんする球体の大きさを変更することにより、臓器特性に応じた変形処理が可能である。Fig. 1には肝臓を sphere-filled model により構築し、切開処理を行なった時の変形の様子を示している。同図上段 (a-1, a-2) はサーフェスレンダリングにより構築したモデルを示し、下段 (b-1, b-2) にはボリュームレンダリングにより構築したモデルを示している。また同図右段 (a-2, b-2) は内部充てん球群

Fig. 2 Simulation of open surgery on the liver. a (left side) shows the virtual surgery, tele-surgery cockpit, b (right side) shows the deformation of the liver resection.

の状態を示し、着色球群によって切開面が形成されている。

3. 開腹手術シミュレーション

開腹手術シミュレーションを行なう環境は、腹腔鏡下手術のように通常のディスプレイを用いるのではなく、本来の外科手術の際の術者の目線でシミュレーションを実行することにより、より現実感のあるシミュレーションを実行することが可能になると考える。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、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) を構築した⁹⁾。Fig. 2a には本コックピット外観の様子を示す。Haptic device には CyberForce (Immersion Corp.) を用い、両手 10 本の指に力覚を得ながら作業を行なうことが可能である。術者および術式に応じてスクリーンとステージを任意の位置に設定することが可能であり、患者ごとに、より現実感のある手術シミュレーションを実行することが可能である。Fig. 2b には本コックピットを用いた肝臓切除シミュレーションの様子を示す。最適な切除線の決定などの切除シミュレーションが可能であり、切離面生成後、即座に残存する体積率を術者に提示することが可能である。

4. 下部消化管領域における腹腔鏡下手術シミュレーション

腹腔鏡下手術の特徴として、二次元のみの視覚情報 (立体情報の欠如)、組織の質に関する感覚の欠如 (触

覚欠如), さらには器械操作の困難性などが挙げられ, 開腹手術に比べ少ない情報で手術を施行する必要がある. 不足した情報は教科書の解剖学知識, 手術経験などによって補足しているのが大半であるため, 腹腔鏡下手術の安全性向上および, 教育・トレーニングを目的とする手術シミュレーションが必要となる.

開腹手術シミュレーションシステムの研究開発技術を応用して, 下部消化管領域, 特に結腸切除術を対象とした手術シミュレーションシステムの開発を本学外科学講座との共同研究で行なっている¹⁰⁾. 本シミュレーションシステムで用いる軟組織モデルには2章で述べたsphere-filled modelを用いることとした. Fig. 3には右結腸切除術シミュレーションのための臓器モデル(腸間膜, 後腹膜, 結腸, 上腸間膜動静脈, 回結腸動静脈, 中結腸動静脈分岐, 十二指腸, 脾臓)を示す. 同図右は腸間膜を半透明表示し, 内部を走行する血管や臓器を同時表示している. またそれぞれのサブウィンドウ内には充てん球の様子を示している. 血管変形処理に関しては, 血管が走行する方向を演算し, 血管走行方向への球体の挙動を変化させ, 組織の異方性特性を考慮したモデル変形処理を行なった. その結果, Fig. 4に示すような内部を走行する血管も同時に変形しながら腸間膜を把持し, 腸間膜切開変形処理が可能となった. これらの鉗子操作にはPHANTOM (SensAble Technologies Inc.) を2台用いることとし, PCを用いてシミュレーションが実行できるようにした.

Fig. 3 Reconstructed organ model for simulation of right hemicolectomy.

Fig. 4 Deformation of the models for right hemicolectomy on time-sequential images (from left to right).

5. ロボット手術のための遠隔手術シミュレーション

われわれはda Vinci システム (Intuitive Surgical Inc.) を対象として, ロボット手術特有の手技の習得を可能とするトレーニング用遠隔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誠教授との共同研究で行なっている^{11) 12)}. 特に患者データを用いた臓器モデルによるトレーニングプログラムの配信機能を設け, さらに多拠点間での通信を可能とし, 遠隔地からの医師の指導や共同作業を可能とするトレーニング用遠隔手術システムの構築を目的としている. 本システムを用いて, 数回の九州大学(福岡)一慈恵医大(東京)間(約1,000 km)での胆嚢摘出術を対象とした遠隔手術シミュレーション実験を行ない, 研究所内 LAN 環境下での作業に近い画像更新速度で実行することが可能になった.

いままでの福岡一東京間を接続した実験成果を応用し, チュラロンコン大学(タイ, バンコク)と九州大学を結んだ遠隔手術シミュレーション実験を行なった¹²⁾. 実験では, 九州大学に設置したパーソナルワークステーションをサーバとし, タイ側にはノートパソコンを用いた. Fig. 5には遠隔手術シミュレーション実験の様子を示し, Fig. 6には実験時の臓器変形の様子を示す. 本実験では遅延時間約140 ms.(往復, シミュレーションを実行しない場合の遅延時間は約120ms.)でシミュレーションが可能であった. 同図ではタイ側での胆嚢摘出シミュレーションの実行の様子を時系列に左から右の順に示している. また, 遠隔地からの医師の手術手技の指導のもとにトレーニングを行なう, いわゆる遠隔指導(Tele-education) 実験を行なった(Fig. 7). 同図はタイ側の実験の様子を示しており, 緑色の半透明の鉗子は日本側の指導医による操作を表わしている. 指導医の動作に従って鉗子进行操作することによって, 遠隔地の専門医があたかも自分の手を持って鉗子操作の指導をしているかのように, 手術手技

Fig. 5 Tele-surgery simulation experiment at a site in Thailand.

Fig. 7 Tele-education experiment at a site in Thailand. The transparent green forceps shown are the teacher's forceps at the site in Japan.

Fig. 6 Deformation of the models for cholecystectomy on time-sequential images (from left to right).

のトレーニングが受けられるようになった。

6. まとめ

本稿では、患者臓器モデルを用いた手術シミュレーションシステムについて、われわれが開発しているシステムを例に挙げ概説した。患者臓器モデルを用いた手術シミュレーションは、患者ひとりひとりに適した手術方法を選定することができるようになるため、より安全で正確な手術が可能になっていくと考えられる。

また、術中 CT などによって術中に得ることができる情報が増加してきており、術中ナビゲーションと併用した術中のシミュレーションを用いることにより、より一層の手術の安全性の向上につながっていくであろう。

文献

- 1) Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, Satava RM: Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance Results of a Randomized, Double-Blinded Study. Ann. Of Surgery 2002;236(4): 458-464.
- 2) The SimSurgery® Education Platform. <http://www.simsurgery.no>
- 3) Lap Mentor™. http://www.simbionix.com/LAP_Mentor.html
- 4) Cotin S, Delingette H, Ayache N: Real-time Elastic

Deformations of Soft Tissues for Surgery Simulation. IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics 1999; 5(1): 62-73.

- 5) Berkley J, Turkiyyah, Berg D, Ganter M, Weghorst: Real-Time Finite Element Modeling for Surgery Simulation: An Application to Virtual Suturing. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics 2004; 10(3): 314-325.
- 6) Ezumi T, Suzuki N, Takatsu A, Kumano T, Ikemoto A, Adachi Y, Uchiyama A: An Elastic Organ Model for Force Feedback Manipulation and Real-time Surgical Simulation. ICAT'97 1997: 115-121.
- 7) Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Uchiyama A, Susumu K: Sphere-filled Organ Model for Virtual Surgery System. IEEE Trans. on Medical Imaging 2004; 23(6): 714-722.
- 8) 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 内山明彦: パーチャル手術システムに適した弾性臓器モデルの開発. 電子情報通信学会論文誌 2003; J86-DII(9): 1341-1349.
- 9) Suzuki N, Suzuki S: Surgery Simulation System with Haptic Sensation and Modeling of Elastic Organ That Reflect the Patients' Anatomy. LNCS 2673, IS4TM 2003:155-164.
- 10) Suzuki S, Suzuki N, Eto K, Hattori A, Yanaga K: Laparoscopic colorectal surgery simulation using real-time deformable model with anisotropic tissue properties. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 2006; 1(1): 161-162.
- 11) Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Hayashibe M, Konishi K, Kakeji Y, Hashizume M: Tele-surgery simulation with a patient organ model for robotic surgery training. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 2005; 1(4): 80-88.
- 12) Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Konishi K, Ieiri S, Hashizume M: Tele-surgery simulation experiment of da Vinci surgery training between Japan and Thailand. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 2006; 1(1): 514.