● 臓器変形モデルと力覚フィードバックデバイス を用いた手術シミュレータの開発

鈴木薫之 東京慈恵会医科大学



大竹義人

大学 東京慈恵会医科大学

鈴木直樹

東京慈恵会医科大学



小林進

服部麻木 林部充宏 東京慈恵会医科大学 東京慈恵会医科大学



橋爪誠



1. はじめに

近年,コンピュータグラフィックス (Computer Graphics, CG) 技術や仮想現実感 (バーチャルリアリティ, Virtual Reality, VR) 技術を駆使した映画やテレビ映像などのコン テンツを多く目にするようになってきた.一方, 医学分 野において,生体の画像や時間変化を伴う生体の三次元 画像,いわゆる四次元画像が臨床現場でも利用可能になっ てきており, VR 技術を用いてこれらのデータを活用し た生体動態解析,手術シミュレーションなどの研究開発 が盛んに行われてきている.本稿では,手術シミュレー ションシステムを中心に,われわれが行っている医用三 次元・医用四次元画像,いわゆる医用高次元画像技術を 用いた VR 技術の応用研究開発について述べる.

2. 精密な四次元人体モデル

われわれは医用四次元画像技術を用いて,仮想空間 にヒューマンモデルを構築し,診断や治療を支援するた めの手法の研究開発を行っており,その一つとして,心 臓の拍動などの時間的な変化を含み,ボランティアの生 体データを用いた四次元モデル「サイバーヒューマン」 を構築した例を紹介する.図1には構築したサイバー ヒューマンの様子を示す.このモデルは、1万枚以上の MRI データを統合して全身構造をモデル化したもので ある.この過程で、被検者に負担を与えず、かつ造影剤 を用いない MRI 撮影法や四次元モデルの表示法などを



図1 四次元人体モデル「サイバーヒューマン」の全身の様子



図 2 a. 脳および頭部血管の可視化 b. 胸部周辺血管構造 ならびに心拍動を観察することが可能な胸部の様子

考案した. このようなヒューマンモデルを用いて,モー ションキャプチャデータにより,ある動作に対して各関 節がどのように駆動するかなどの全身骨格の動態の可視 化や,複雑な体内構造をリアルタイムに可視化すること が可能となった.また,心臓の拍動や骨格とその内部に 存在する血管群の位置関係も明確に観察することが可能 で,今まで把握しにくかった心内腔の挙動なども容易に 観察,診断することが可能となった.図2aには脳およ び頭部血管系が観察可能な頭部の様子を示し,図2bに は骨格を半透明表示し,心臓を出入りする大血管の状況 を観察することができる胸部の様子を示している.

3. 手術シミュレーションシステム

このような医用高次元画像技術を用いた手術支援シス テムの一つに,手術シミュレーションシステムに関する 研究開発が挙げられる.手術シミュレーションシステム とは,精密な患者データ (patient data) に基づくヒューマ ンモデルを用いて,術前に手術手技のリハーサルによる 手技の習得,手術方法の決定やその検討を患者ごとに行 うことを可能とし,さらには手技のトレーニングといっ た教育面でも使用可能なシステムである.

一方,開腹手術と比較して患者への負担の少ない腹 腔鏡手術などの内視鏡手術や,消化管内の外科的処置法 の開発などは近年格段に多様化されてきた.しかしなが ら術者は直接臓器に触れることができず,かつ内視鏡画 像を通した術野で作業を行うため,臓器の位置関係を三 次元的に把握することが難解であり,個人的な技量の習 熟も必要とするのが事実である.そこで,このような現 状問題を解決すべく,我々が研究開発を行っている,手 術手技のトレーニングならびに手術計画が行え,同時に 手術作業時の感覚を術者に提示することが可能な手術シ ミュレーションシステムの開 発について述べていく.

3.1 臓器変形モデル

手術シミュレーションに不 可欠な要素技術として臓器変 形モデリングがある.つまり, 手術シミュレーションシステ ムでは,生体という複雑な立 体構造をインタラクティブに 操作し,かつ正確にその時の 変形状態を示す臓器変形モデ ルを用いたシステムを構成す

る必要がある. 臓器変形モデルの構築方法には, 従来よ り有限要素法 (Finite Element Methods, FEMs) や質点バネ 手法 (Mass-Spring Methods, MSMs) が主に用いられてき た [1-6]. 現在では, これらの手法を基盤とし改良した手 法が取り組まれている. しかしながら, 内視鏡手術に代 表されるようなビデオ画像と同等の画像更新速度で変形 処理が行え, 自由な方向からかつ複数の作用点における インタラクティブな変形処理を実現することは難しいの が現状であった.

そこで我々は,臓器形状を単一剛体球の集合体として 表現することのできる球充填モデル (sphere-filled model) を考案し,適用した [7-9]. このモデルでは,まず CT や MRI により再構築された患者臓器モデルの内部を,最 密充填格子状に同一半径をもつ剛体球で充填する.次に, 互いに接している充填球間の関係を参照し接触している 球間で外力を伝搬させていくと考え,隣接している球を 順次押し退けながら力を伝えることにより球群を移動さ せることによって,臓器の変形を表現する.図3に肝臓 領域の sphere-filled model を示す.図3aには,肝臓表面 形状を示し,図3bには充填球の配置の様子を示してい る.また,患者ごとの解剖学的特徴を提示するために, テクスチャマッピングを行っている.このような互いに



図 3 肝臓領域の sphere-filled model a には肝表面形状の様子を示し、b には充填球群の配置の様子を示す.



図4 肝臓を指で押したときの変形の様子 図中、白色球が指を想定しており、肝表面を半透明表示することによって、血管構造の変形を観察することが可能である.

接した状態に充填されている球の相互作用によって簡略 化し、物理的な現象を幾何学的な現象に置き換えること によって臓器の変形を表すため、リアルタイム処理を実 現することが可能である. また, 外力によって移動した 球群の元の配置に戻ろうとする力ベクトルをもとに力覚 提示のための力の方向と大きさを算出することが可能で ある. 算出した力覚値は、力覚フィードバックデバイス に伝送され、術者に手術作業の感触を提示することが可 能である. 球同士の相互作用によって実現することが可 能な変形処理として、肝表面を指で押したときを想定し たときの臓器変形の様子を図4に示す.図4では、肝臓 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. 白色球が指先の位置を想定し ており、図4bにおいて白色球周辺の血管構造に着目す ることによって、その変形状態がわかる、一方、切開処 理においては、臓器の内部構造も切断されて変形して いくため、局所的な変形を柔軟に発生できるモデルが必 要となる. そのため, 隣接する球同士に結合力を想定し た機能を付加させることとした. 図5には、切開処理時 のモデル変形の様子を示す. 図4同様, 切開面付近の脈



図5 切開変形処理の様子

aには肝表面の変形の様子を示し、bには充填球の状態を示し、 着色球が切開面によって切り分けられる球群を示している. 管に着目することにより,その変形状況を確認すること ができる.このような切開処理を繰り返し行うことによ り,切離処理を実現した.図6にこの過程の様子を示す. 図6aには切離面生成の様子を示し,同図bには切除領 域を術者が左手で把持したときの状況を示している.充 填球は剛体としてあるため,残存領域の充填球の数を取 得することにより,残存臓器体積率を算出することが可 能である.この図の場合の切除例では,残存肝体積は約 70% であるという情報を得ることができた.また術者 は切離された臓器切片の重みを感じながら,かつ軟組織 として扱えることも可能である.構築したシステムでは これらの変形処理を約 30-35 Hz の画像更新速度により 実行することが可能となり,手術手技として負担を感じ ないリアルタイム処理を実現した.

3.2 手術シミュレーションのための VR 環境

従来のコンピュータディスプレイを使用した開腹手 術シミュレーションシステムでは、実際の開腹手術時 の姿勢や目線、両手の作業位置を表現することは困難で あった.そこでわれわれは、できるだけ自然な環境下で 視野全体をカバーできる高解像度の画像を用いてシミュ レーションを実行することが可能な環境として、Virtual Surgery, Tele-surgery Cockpit を設計,製作した [10].コッ クピットは、大型の曲面スクリーンを備え、0度から45 度の間でその仰角を自由に変更することを可能とし、術 者ステージには両手型の力覚フィードバックデバイス を搭載した.また術者ステージは可動式とし、術式や術 者の姿勢に応じて自由に手術環境を設定することを可能 とした.また、必要に応じ液晶シャッター式の眼鏡によ る立体視を利用し、対象物の三次元形状、四次元的動作 の空間的把握を高められる機能を持たせた.搭載して



図 6 切離変形処理の様子 aには切離面生成の様子を示し、bには切除領域を術者が左手で把持しているときの様子を示す.

いる力覚フィードバックデバイスは,両手10指,手の 甲に反力を提示することができ,十分な手術作業を行 える機構を持つ.図7には本コックピットにて肝切除術 (hepatectomy)のシミュレーションを行っている様子を示 す.図中aには,コックピット全景の様子を示し,bに は術者後方からの術野状況を示している.

3.3 ロボット手術システムのための手術シミュレー ションシステム

近年 da VinciTM(Intuitive Surgical Inc.)やZEUSTM (Computer Motion Inc.) といった手術用ロボットを用いて、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. 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、医師は、手術ロボット特有の動きを理解し、 術野画像や機器の操作に十分に慣れる必要がある. そこ でわれわれは、ロボット手術特有の手技を習得すること を可能とするトレーニング用手術シミュレータの開発を 行っている [11]. また,遠隔地の複数の専門医からの指導 や共同作業を実現するために,遠隔地からシミュレーショ ンを実行することが可能な遠隔手術シミュレーションセ ンターの構築を行い、常に最新のトレーニングシステム の配信を可能とする機能を目指している.図8には、遠 隔手術シミュレーションシステムの概念図を示す. 遠隔 地の各医師は、パーソナルコンピュータからシミュレー ションセンターにあるビジュアルスーパコンピュータに アクセスし,任意のトレーニングプログラムを選択して シミュレーションを行う.また、同じプログラムを複数 の遠隔地でセンターを介して共有することも可能である. センターと各拠点との通信回線には、近年急速に普及を しはじめているブロードバンド回線を用い、かつこの際 の力覚フィードバックデバイスとしては、特別な開発シ

ステムを必要とせず,どこでも購入できる PHANToM[™] (SensAble Technologies Inc.)2 台を使用し,ロボット手術 と同じ操作を実現した.図9には,胆嚢摘出術を想定し たシミュレーションを行っている様子を示す.図中aに は,右手ロボット鉗子で胆嚢を把持し,同時に左手ロボッ ト鉗子で胆嚢を圧迫したときの様子を示している.また 図bでは,左手で胆嚢を把持し,右手で剥離処理を行っ



図7 Virtual Surgery, Tele-surgery Cockpit による 手術シミュレーションを行っている様子

aにはコックピット全景を示し、bには術者後方からの 術野の状況を示す



図8 遠隔手術シミュレーションセンター センターと各ユーザーはブロードバンド回線で接続され、センターにあるトレーニングプログラムにアクセスし、シミュレーションを行う

ている様子を示している.シミュレーションで使用して いる臓器変形モデルには sphere-filled model を用いており, 各臓器の形状や特性を考慮し,肝臓モデルには半径 6mm の充填球,胆嚢モデルには半径 2mm の充填球と,それぞ れ異なる半径の充填球を用いた.また,シミュレーショ ンで用いる da Vinci[™] の鉗子の形状は,その形状を採寸 した情報から CAD データとして再構築した四次元モデ ルを使用した.

本システムにより, da Vinci[™]の鉗子操作を実際の手 術に近い操作で行うことを可能にし, 把持や剥離などの 変形処理を行うことを可能にした. また, ブロードバン ド回線による拠点間通信により, 遠隔地からの手術操作 を行うことが可能となった.

4. まとめ

医用高次元画像技術により,時空間的に複雑な対象で ある生体の運動を,精密な四次元人体モデルを用いて詳



図 9 da Vinci[™] を用いた胆嚢摘出術を想定した シミュレーションを行っている様子

aには、右手ロボット鉗子で胆嚢を把持し、左手ロボット鉗子で胆嚢を 圧迫したときの様子を示す、bには、左手ロボット鉗子で胆嚢を把持し、 右手ロボット鉗子で胆嚢を剥離している様子を示す。 細に把握することが可能になった.また,このような技 術を用いた手術シミュレーションシステムにより,患者 ごとの詳細な手術プランニングやリハーサルが充分に行 え,また,経験が少ない医師への手術手技トレーニング や手術計画,さらにはディジタルコンテンツ化すること により,熟練した医師の手術手技をデジタルデータとし て扱え,研修医をはじめとする若い医師への教育などに 活用することが可能であると考える.さらに近年では, 手術中に患者自身と患者体内の三次元画像を重畳表示し ながら手術を進めることができる Data Fusion 技術を用 いた手術ナビゲーションシステムの開発 [12] も盛んに 行われており,これらのシステムを用いることにより, 正確でより安全な手術の施行が期待でき,新しい診断法 や治療法が生み出されていくと考える.

参考文献

- J. Marescaux, J.M. Clement, V. Tassetti, C. Koehl, S. Cotin, Y. Russier, D. Mutter, H. Delingette, and N. Ayache, "Virtual reality applied to hepatic surgery simulation: The next revolution," Ann. Surg., vol. 228, no. 5, pp. 627-34 (1998)
- [2] S. Cotin, H. Delingette, and N. Ayache, "Real-time elastic deformations of soft tissues for surgery simulation," IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol. 5, no. 1, pp. 62-73 (1999)
- [3] S. Cotin, H. Delingette, and N. Ayache, "A Hybrid Elastic Model allowing Real-Time Cutting, Deformations and Force-Feedback for Surgery Training and Simulation," Visual Computer, vol. 16, no. 8, pp. 437-52 (2000)

- [4] J. Berkley, S. Weghorst, H. Gladstone, G. Raugi, D. Berg, and M. Ganter, "Fast finite element modeling for surgical simulation," MMVR7, pp. 55-61 (1999)
- [5] J. Berkley, P. Oppenheimer, S. Weghorst, D. Berg, G.Raugi,
 D. Haynor, M. Ganter, C. Brooking, and G. Turkiyyah,
 "Creating fast finite element models from medical images,"
 Stud. Health Technol. Inform, vol. 70, pp. 26-32 (2000)
- [6] C. Paloc, F. Bello, R.I. Kitney, and A. Darzi, "Online Multiresolution Volumetric Mass Spring Model for Real Time Soft Tissue Deformation," LNCS 2489, MICCAI2002, pp. 219-26 (2002)
- [7] T. Ezumi, N. Suzuki, A. Takatsu, T. Kumano, A. Ikemoto, Y. Adachi, and A. Uchiyama, "An Elastic Organ Model for Force Feedback Manipulation and Real-time Surgical Simulation," International Conference on Artificial Reality and Telexistence, pp. 115-21 (1997)
- [8] N. Suzuki, A. Hattori, S. Kai, T. Ezumi, and A. Takatsu, "Surgical planning system for soft tissues using virtual reality," MMVR 5, pp. 159-63 (1997)
- [9] 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, vol. J86-D-II, no. 9, pp. 1341-9 (2003)
- [10] S. Suzuki, N. Suzuki, A. Hattori, and A. Uchiyama,
 "Dynamic Deformation of Elastic Organ Model and the VR Cockpit for Virtual Surgery and Tele-surgery," MMVR 11, pp. 354-6 (2003)
- [11] 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, 第12回日本コンピュータ外科学会大会, pp. 21-22. Dec (2003)
- [12] A. Hattori and N. Suzuki, "A Robotic Surgery System (da Vinci) with a Data Fusion System for Navigation Surgery in the Abdominal Region," Jikeikai Med J, vol. 50 no. 1, pp. 19-27 (2003)

【略歴】

鈴木薫之(SUZUKI Shigeyuki)

東京慈恵会医科大学 高次元医用画像工学研究所 助手 1999 年早稲田大学理工学部卒業.2001 年早稲田大学大学 院理工学研究科修士課程修了.2001 年東京慈恵会医科大学 助手,高次元医用画像工学研究所に勤務.専門は医用バー チャルリアリティ,医用画像処理,手術シミュレーション. IEEE,日本コンピュータ外科学会など各会員.

鈴木直樹(SUZUKI Naoki)

東京慈恵会医科大学 高次元医用画像工学研究所 教授 1981年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了.工博, 理博, 医博.現在,東京慈恵会医科大学教授,および同大高次 元医用画像工学研究所所長.専門は,医用生体工学,超音波医 学,生物工学,医用高次元画像の臨床応用など.日本エム・イー 学会などの会員および日本コンピュータ外科学会理事.

服部麻木(HATTORI Asaki)

東京慈恵会医科大学 高次元医用画像工学研究所 講師 1992 年ダイキン工業 MEC 研究所研究員. 1994 年早大大学院 理工学研究科修士課程修了.現在,東京慈恵会医科大学 講師, 高次元医用画像工学研究所に勤務.専門は,高次元画像処理, 高次元動態解析,手術シミュレーション.日本エム・イー学 会,日本コンピュータ外科学会各会員.

林部充宏 (HAYASHIBE Mitsuhiro)

東京慈恵会医科大学 高次元医用画像工学研究所 助手 1999年東京工業大学工学部卒業.2001年東京大学大学院工 学系研究科修士課程修了.2001年東京慈恵会医科大学 助手, 高次元医用画像工学研究所に勤務.専門は,医用画像工学, ロボティクス.IEEE,日本ロボット学会,日本コンピュータ 外科学会各会員.

大竹義人(OTAKE Yoshito)

東京慈恵会医科大学 高次元医用画像工学研究所 助手 2002 年早稲田大学大学院工学系研究科修士課程修了. 2002 年東京慈恵会医科大学 助手,高次元医用画像工学研究所に 勤務.専門は,医用画像処理,生体の動態解析.日本コンピュー タ外科学会,日本補綴歯科学会各会員.

小林 進(KOBAYASHI Susumu)

東京慈恵会医科大学 外科学講座 助教授

1972年東京慈恵会医科大学卒業. 医博. 現在,東京慈恵会医科 大学外科学講座助教授,および同大学附属病院手術部診療部長, 同大学附属病院肝胆膵外科診療副部長. 日本腹部救急医学会, 日本肝胆膵外科学会,日本消化器病学会関東支部,日本臨床外 科学会,日本外科学会評議員,日本手術医学会各評議員.

橋爪 誠(HASHIZUME Makoto)

九州大学 大学院医学系研究科災害救急医学 教授 1979年九州大学医学部卒業.1984年九州大学大学院医学 研究科修了.1998年九州大学医学部外科学第二講座助教 授.1999年九州大学大学院医学系研究科災害救急医学教授. 2003年九州大学病院先端医工学診療部部長併任.ロボティッ クシステムの開発に関する研究に従事.日本コンピュータ 外科学会理事.