

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

手術シミュレーションにおける
リアルタイム情報処理に関する研究
Real-time information processing for
performing surgery simulation
to preoperative planning and surgical training

		申請者	
氏名		鈴木	薫之
		Shigeyuki	Suzuki

専攻・研究指導
(課程内のみ)

2004年 10月

本研究では、手術支援システムの一つである医用三次元・四次元（医用高次元）画像技術とバーチャルリアリティ（Virtual Reality, VR）技術による手術シミュレーションシステムの開発を行った。本研究の特色は、術者が両手に臓器の感触を得ながら手術計画や手技のトレーニングを手術前に行うシステムを開発することである。特に独自に考案した軟組織モデルを用いて血管構造を有する臓器モデルのリアルタイム変形を可能とした成果に関しては、世界に先駆けて達成した内容である。

第1章では、序言、研究の背景、研究の目的、研究の社会的有用性、工学的新規性について述べた。特にリアルタイムに扱える軟組織モデルの必要性、触覚提示による手術シミュレーションシステムならびにトレーニングシステムの重要性について示した。

第2章では、リアルタイム変形可能な臓器モデルを有する手術シミュレーションシステムの開発結果を示す。手術シミュレーションシステムでは、皮膚や臓器を指や手術器具で押す、掴む、あるいはメスなどの器具により臓器を切開、切離す必要があるため、押した位置が正確に押されて変形すること、切開する位置を正確に切開するなどの定量的な変形をリアルタイムに行うことが可能な弾性臓器（軟組織）モデルが必要となる。多くの研究機関の軟組織モデルには有限要素法が用いられ、物理現象に基づいた演算により対象とする形状の変形状態を正確に表現しているが、膨大な演算量を要し外科手術シミュレーションシステムに必要不可欠なリアルタイム変形、インタラクティブ操作を実現することが困難である。そこで本研究では、開腹手術を対象としてリアルタイムに血管などの内部構造の変形処理を行い、押す、触る、把持するなどの基本的な動作や、臓器の内部構造を切断するような切開処理、さらには切離処理をも定量的に実施し得る軟組織モデルの開発を行った。

軟組織モデルには、臓器内部に同一半径の剛体球を最密充填した球充填モデル（sphere-filled model）として独自に考案した。本モデルでは互いに接した状態に充填されている球の相互作用によって変形を表し、物理現象を幾何学的な事象に置換することによってリアルタイム変形を行った。具体的には、互いに接した状態で結合している充填球が結合状態を維持しながら外力によって周囲の球と接触していき、この接触状態が外力を伝搬していくと考える。臓器表面はポリゴンで構成され、ポリゴン各頂点から近傍となる複数の充填球をレジストレーションし、充填球の移動に応じてポリゴン各頂点を移動させることにより臓器全体の变形処理を導くこととした。また切開処理など臓器構造を切断するような変形の場合には、切開面を構成する充填球領域を決定し、切開面を境界とした臓器構造の領域分けを行う切開アルゴリズムを考案した。モデル表面を構成するポリゴンは、メスが通過したポリゴンのみ元の形状を失うため、ポリゴンの再描画アルゴリズムを考案し、メスの軌跡どおりの忠実な切開面の生成を行った。また、本切開手法

を繰り返し行うことにより切離処理を行った。その結果、血管構造を有する肝臓モデルに対して、臓器を押す、掴む、切開するといった基本的な手術動作を 30 枚/秒以上の描画更新速度のリアルタイム変形を可能とした。また、インタラクティブに切離面を生成し、残存する領域にある充填球数を得ることにより、肝切除術において重要となる残存肝体積を即座に術者に提示することを可能とした。また、実際の手術時の臓器に対する触覚応答を得ながら作業を進めるために、臓器圧縮変形時の圧縮点表面変位量と圧力との関係を計測し、反力応答データベースを臓器モデルに適用するための in-vivo 実験を行った。実験では指で臓器圧縮を行ったときの変形状態を想定して行った。その結果、臓器圧縮・圧縮解放時に応じたヒステリシス特性曲線を得て、定式化した。触覚提示デバイス(haptic device)に送信する触覚提示パラメータは、充填球が元の配置から変形時に移動した配置のベクトルを算出し、特性曲線式の臓器表面変位量に充填球移動総和量をキャリブレーションすることにより、臓器に触れたときの触覚を術者に提示した。本システムの評価として、モデル形状評価、モデル変形評価、手術操作評価を行った。形状評価ではホルマリン固定した摘出肝と、摘出肝を CT 撮像し三次元再構築した肝臓モデルとの解剖学的特徴点間距離の誤差ならびに体積誤差を比較した。その結果、最大約 1.0 mm の誤差、体積誤差約 10 cm³ となり、ほぼ正確な形状をもつモデル構築が可能であることを確認した。モデル変形評価では、変形時の体積変動ならびに臓器特徴点の状態を MRI 撮像により生体臓器と比較した。その結果、球充填数が 500 個以上では最大 1.0 % 程度の微小な体積誤差で変形処理を行うことを確認し、生体臓器変形と比較して移動量誤差約 2.0 mm、平均変形分解能 2.7 mm の精度を得た。さらに手術操作評価では、実際の術場環境における手術操作とシミュレーション環境における手術操作との比較、ならびにシミュレーションシステムにおける切開操作評価を行った。術場環境とシミュレーション環境における手術操作の比較では、肝臓表面上の任意の複数計測点をプロットしたときの理論値と計測値の誤差を算出し、そのデータのばらつきを統計学的に検討した。その結果、実際の術場環境を基準として 1.24 ± 0.56 mm (平均値 \pm 標準偏差) となり、データのばらつきには有意差が認められなかった (p 値 >0.05)。シミュレーションシステムにおける切開操作評価では、指定した切離線上の任意計測点をメスが通過したときの理論値と計測値を比較した。その結果、誤差 2.35 ± 0.25 mm (平均値 \pm 標準偏差) となり、また任意の計測点に対する操作結果のばらつきに有意差は認められなかった (p 値 >0.1)。これらの評価結果から、実際の手術と近い操作性でシミュレーションを実施することが示され、本システムの術前手術計画や手技のトレーニングなどへの有効性が示された。

第 3 章では、ロボット手術システム da Vinci™ (Intuitive Surgical Inc.) を対象として、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遠隔手術シミュレーションシステムの開発を行った。本システムでは多拠点間で通信可

能な遠隔手術システムとし、常に最新のトレーニングシステムを配信する機能を目指した。シミュレーションシステムで用いる軟組織モデルには sphere-filled model を用い、内視鏡あるいはロボット手術下のような限られた視野の中で局所的な変形処理をリアルタイムに行うモデルへと改良した。またシミュレーションシステムでの da Vinci™ 操作卓には、多箇所での容易な設置を想定して世界的に流通している PHANTOM™ (SensAble Technologies Inc.) 2 台により構成した。遠隔地間の通信手段には、ブロードバンド回線（光ファイバー通信）を利用し、サーバ-クライアント型で行った。サーバ側は遠隔地から送信された情報をもとに鉗子と臓器の干渉判定、臓器変形処理、触覚提示パラメータ計算などの処理をスーパーコンピュータで行い、また遠隔地側は反力提示に必要な情報をサーバ側から受信し、通常のパーソナルコンピュータを用いて haptic device を操作しインタラクティブにシミュレーション結果をモニタリングすることとした。シミュレーションで用いる da Vinci™ の鉗子形状は、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モデルを使用した。対象とする術式にはロボット手術、腹腔鏡手術で多く適用されている胆嚢摘出術とし、胆嚢モデルでは半径 2.0 mm、総胆管モデルでは半径 1.0 mm の充填球と、対象物の特性をより表すために直径の異なる sphere-filled model を用いた。その結果、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え、圧縮、把持、剥離変形処理を行うことを可能とした。また、光ファイバー拠点間通信により、遠隔地からの手術操作を行うことを実現した。

胆嚢モデル変形評価には、充填球の大きさを変えて変形処理を行った際の体積誤差による評価を行った。その結果、球充填数が 400 個以上では体積誤差 0.8 % 以内で変形状態を表現することを確認した。またシミュレーション操作の精度評価として、ロボット鉗子モデル操作における把持する位置の正確さの評価を行い、トレーニングシステムとしての有用性を検討した。評価方法には、胆嚢モデル上に複数の把持点（5 点）を設け、理論値と操作値との誤差を算出し、データのばらつきを統計学的に解析した。その結果、誤差約 1.58 ± 0.03 mm（平均値 ± 標準偏差）となり、得られたデータのばらつきには有意差が認められず（p 値 > 0.05）、把持する位置によらず術者が正確に把持できることを確認した。また実際の da Vinci™ を用いた術場における操作と比較しても、高い精度でシミュレーション操作を施行でき、トレーニングシステムとしての有用性を確認した。

第 4 章では本研究の結論を示す。本研究では、リアルタイム変形能を有する軟組織モデルを搭載し、両手に臓器の触覚を得ながら、手術前の手技の検討やトレーニング、プランニングを行うための手術シミュレーションシステムの開発を行った。特に開腹手術、ロボット手術、さらには遠隔手術シミュレーションシステムの構築を行い、定量的な反力応答とリアルタイムかつ正確な臓器変形が行え、さらには高い精度によるシミュレーション操作を施行できるシステムを実現した。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	Sphere-Filled Organ Model for Virtual Surgery System, IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 23, No. 6, pp. 714-22, 2004, S. Suzuki, N. Suzuki, A. Hattori, A. Uchiyama, and S. Kobayashi.
論文	Virtual Surgery Using a Deformable Organ Model Created by the Sphere-filled Method, Systems and Computers in Japan, Vol. 35, No. 11, 2004 (掲載決定), S. Suzuki, N. Suzuki, A. Hattori, and A. Uchiyama.
論文	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、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、Vol. 9, No. 2, pp. 97-102, 2004, 鈴木薫之、鈴木直樹、服部麻木、林部充宏、大竹義人、小林進、橋爪誠.
論文	Tele-training simulation for the surgical robot system “da Vinci”, Proc. of Computer Assisted Radiology and Surgery, pp. 86-91, 2004, S. Suzuki, N. Suzuki, M. Hashizume, Y. Kakeji, K. Konishi, A. Hattori, and M. Hayashibe.
論文	Development of an elastic organ model containing voxel information, Proc. of Computer Assisted Radiology and Surgery, pp. 395-400, 2004, T. Takimoto, A. Uchiyama, N. Suzuki, A. Hattori, S. Suzuki, M. Hayashibe, Y. Otake, and S. Kobayashi.
論文	Surgery Simulation System with Haptic Sensation and Modeling of Elastic Organ That Reflect the Patients' Anatomy, Lecture Notes in Computer Science 2673 Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling, pp. 155-64, 2003, N. Suzuki, S. Suzuki.
論文	Dynamic Deformation of Elastic Organ Model and the VR Cockpit for Virtual Surgery and Tele-surgery, Studies In Health Technology and Informatics 94 Medicine Meets Virtual Reality 11, pp. 354-6, 2003, S. Suzuki, N. Suzuki, A. Hattori, and A. Uchiyama.
論文	Real-time Volumetric Deformation for Surgical Simulation using Force Feedback Device, Studies In Health Technology and Informatics 94 Medicine Meets Virtual Reality 11, pp. 386-8, 2003, S. Wakai, N. Suzuki, A. Hattori, S. Suzuki, and A. Uchiyama.
論文	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, 電子情報通信学会論文誌、Vol. J86-D2, No. 9, pp. 1341-9, 2003、鈴木薫之、鈴木直樹、服部麻木、内山明彦.
論文	Collaborated surgical works (surgical planning) in virtual space with tactile sensation between Japan and Germany, Studies In Health Technology and Informatics 81, pp. 479-84, 2001, N. Suzuki, A. Hattori, S. Suzuki, K. Sumiyama, S. Kobayashi, Y. Yamazaki, and Y. Adachi.
論文	Real-time surgical simulation with haptic sensation as collaborated works between Japan and Germany, Lecture Notes in Computer Science 2208 Proc. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention-MICCAI2001, pp. 1015-21, 2001, N.

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
総説	Suzuki, A. Hattori, S. Suzuki, M. Baur, A. Hirner, S. Kobayashi, Y. Yamazaki, and Y. Adachi. Virtual Surgery, Tele-Virtual Surgery システムの現状と展望、日本臨牀「3D 画像医学の進歩 画像診断に基づく治療戦略」Vol. 62, No. 4, pp. 815-23, 2004, 鈴木薫之、鈴木直樹、服部麻木、林部充宏、大竹義人、小林進、橋爪誠。
総説	高次元医用画像を用いた手術シミュレーション(バーチャル手術)、日本造船学会誌、Vol. 871, No. 1, pp.12-5, 2003, 鈴木薫之、鈴木直樹。
講演	da Vinci (手術ロボットシステム) のトレーニングを目的とした遠隔バーチャル手術システムの開発、第 43 回日本エム・イー学会大会、2004 年 5 月、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。
講演	In-vivo 計測による反力応答データベースに基づく力覚提示を可能とする手術シミュレーション用軟組織モデルの構築、第 43 回日本エム・イー学会大会、2004 年 5 月、鈴木薫之、鈴木直樹、服部麻木、林部充宏、大竹義人、瀧本崇博、内山明彦、小林進。
講演	Volume Data を用いることのできる手術シミュレーション用弾性臓器モデルの開発、第 43 回日本エム・イー学会大会、2004 年 5 月、瀧本崇博、鈴木直樹、服部麻木、鈴木薫之、林部充宏、大竹義人、小林進、内山明彦。
講演	Soft Tissue Modeling with Sphere-filled Method and Virtual Environment for Surgical Simulation and Tele-Surgical Simulation, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 2003 August, S. Suzuki, N. Suzuki, A. Hattori, and A. Uchiyama.
講演	In-vivo 計測により得られた反力応答データベースを用いた軟組織モデルを有する手術シミュレーションシステム、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 5, No. 3, pp. 387-8, 2003, 鈴木薫之、鈴木直樹、服部麻木、林部充宏、大竹義人、瀧本崇博、内山明彦、小林進。
講演	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、Vol. 5, No. 3, pp. 177-8, 2003, 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。
講演	Volume Data を対象としたリアルタイム変形処理法(第 2 報)-弾性モデルにおける自由な切開面の生成、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 5, No. 3, pp. 385-6, 2003, 瀧本崇博、鈴木直樹、服部麻木、鈴木薫之、林部充宏、大竹義人、小林進、内山明彦。
講演	脈管系を含む切開・切離のリアルタイム処理機能を有する変形軟組織モデルの構築、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 4, No. 3, pp. 275-6, 2002, 鈴木薫之、鈴木直樹、服部麻木、若井智司、内山明彦。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	軟組織の Volume Data を対象としたリアルタイム変形処理法、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 4, No. 3, pp. 271-2, 2002, 若井智司、鈴木直樹、服部麻木、鈴木薫之、内山明彦。
講演	視覚・触覚連係型 Virtual surgery, tele-surgery 用コックピットの開発、第 41 回日本エム・イー学会大会、2002 年 5 月、鈴木直樹、服部麻木、鈴木薫之、林部充宏。
講演	Volume Data の外力に伴うリアルタイムな変形を可能とする臓器モデルの開発、第 41 回日本エム・イー学会大会、2002 年 5 月、若井智司、鈴木直樹、服部麻木、鈴木薫之、内山明彦。
講演	Virtual surgery, Tele-surgery のための視覚・触覚連動コックピットの製作、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 3, No. 3, pp. 163-4, 2001, 服部麻木、鈴木直樹、鈴木薫之、林部充宏。
講演	Development of deformable organ model for the realistic virtual surgery simulation system, World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, 2001, July, S. Suzuki, N. Suzuki, A. Hattori, K. Sumiyama, S. Wakai, and A. Uchiyama.
	その他 14 件
その他 (論文)	Navigation system for a developed endoscopic surgical robotic system, Proc. of Computer Assisted Radiology and Surgery, pp. 539-44, 2004, A. Hattori, N. Suzuki, M. Hayashibe, S. Suzuki, Y. Otake, K. Sumiyama, H. Tajiri, and S. Kobayashi.
その他 (論文)	Development of an endoscopic robotic system with two hands for various gastric tube surgeries, Studies In Health Technology and Informatics 94 Medicine Meets Virtual Reality 11, pp. 349-53, 2003, N. Suzuki, K. Sumiyama, A. Hattori, K. Ikeda, E. Murakami, S. Suzuki, M. Hayashibe, Y. Otake, and H. Tajiri.
	その他 5 件
その他 (総説)	内視鏡手術、ロボット手術のためのナビゲーション機能の開発、日本医用画像学会、Vol. 22, No. 2, pp. 68-73, 2004、林部充宏、鈴木直樹、服部麻木、鈴木薫之、大竹義人、小林進、橋爪誠。
その他 (講演)	腹腔内手術へのマスタースレーブ型内視鏡ロボット適用の検討、第 43 回日本エム・イー学会大会、2004 年 5 月、鈴木直樹、服部麻木、鈴木薫之、大竹義人、林部充宏、炭山和毅、田尻久雄、小林進。
その他 (講演)	da Vinci (手術ロボットシステム) の運動学計算による最適なアーム配置のための術前プランニングシステム、第 43 回日本エム・イー学会大会、2004 年 5 月、林部充宏、鈴木直樹、橋爪誠、服部麻木、鈴木薫之、掛地吉弘、小西晃造。
	その他 28 件