

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：22701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23390383

研究課題名(和文)患者固有モデルによる専門医の手技訓練用手術シミュレータの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of the surgical simulator for specialists using the patient-specific model

研究代表者

榎山 和秀 (MAKIYAMA, Kazuhide)

横浜市立大学・医学部・准教授

研究者番号：40347307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：腹腔鏡手術予定患者のCTをシミュレータ内に取り込み、シミュレータ内にその患者の臓器を再現することで、術前に執刀医がその患者のためのトレーニング(模擬手術)を行うことができる、患者特異的腹腔鏡手術シミュレータの開発をした。実際の患者の術前に使用したところ、臓器はほぼ正確に再現され、術者から術前トレーニングは有用であるという評価を得た。また生体組織の運動を正しく模擬するための力学計算手法の確立、微細な操作感を模擬できる力覚装置の開発を行い、模擬手術をよりリアルなものにした。

研究成果の概要(英文)：We developed a patient-specific simulator for laparoscopic surgery. CT (computed tomography) data of the patient who is scheduled to undergo laparoscopic renal surgery were entered into the simulator. In the simulator the organs were reproduced, thus surgeons could perform the training (sham operation) for the patient. By using this simulator for clinical cases, we confirmed that it reproduced organs correctly and surgeons felt it was useful as a preoperative training technique. In addition, we also developed calculation technique for correct organ movement and haptic device to make surgeons feel delicate sense. They made simulations more real.

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・泌尿器科学

キーワード：シミュレータ 腹腔鏡 患者特異的 モデルデータ 専門医 手術

1. 研究開始当初の背景

私たちは、2006年より手術シミュレータの研究開発を行い、2009年に泌尿器関係腹腔鏡下手術において患者固有データに基づく術前訓練装置を開発した。これは欧米製の既存の手術シミュレータと基本的に異なり、有限要素法を基本として数学的に妥当な力学計算と反力の提示を行っている。また、患者固有データを用いることにより、固有の術前訓練が可能である。

2. 研究の目的

今後、ますます複雑さを増す高度な手術を取って行わなければならない専門医の手術手技訓練法の確立は急務である。本研究は、専門医が、患者固有情報に基づき術前訓練を繰り返し行い、術前に危険箇所を把握して実手術での事故を防ぐ高度な手技訓練に対応できる医療機器としての腹腔鏡手術術前シミュレータの開発である。研究の骨子は、(1) 医師の繊細な手技に対応できる人体臓器や膜組織の力学的変形の正しい模擬手法の確立と、(2) 医師の微細な操作に対応した操作感を反力として精緻に術者に伝えることができる模擬術具、およびこれらを用いた(3) 泌尿器手術シナリオの開発である。

3. 研究の方法

(1) 専門医用手術手技訓練法の研究

腹腔鏡下腎臓手術予定患者のCTをシミュレータ内に取り込み、シミュレータ内にその患者の臓器を再現し、術前に予定執刀医がその患者のためのトレーニング(模擬手術)を行う。シミュレーション手術と実際の手術映像を見比べて、患者臓器の再現性が妥当か否かを評価する。また、執刀医に質問票に答えてもらい、シミュレータの評価を行う。

(2) 生体組織の運動を正しく模擬する実時間非線形FEM手法の確立

生体組織の物性値については、線形解析による生体力学シミュレーションのためのヤング率等、データベース化が整備されつつある。身体を構成する軟組織物質の多くは、非線形の力学特性を持つことが一般的であり、線形の力学モデルでは部分的な小変形に限定される。より正確に生体の運動を模擬するためには、大変形への対応、さらには膜組織、繊維、異方性に対応する必要がある。特に臓器に関しては、生体組織を非線形の非圧縮超弾性体

とみなし、広範囲の変形領域における応力と歪の関係を近似する、実時間処理を考慮した計算手法を開発する。実時間処理を達成するには、基盤モデルを自作し、チューニングが必要と考える。幾何的非線形モデル、超弾性体モデルといった非線形有限要素法を実装した基盤プログラムを構築し、評価検証および改良を行い、シミュレータへの適用、処理の高速化を行う。

(3) 微細な操作感を模擬できる模擬術具用力覚装置の開発

専門医は術中に鉗子の先で臓器を触ったり、鉗子の中間部位で臓器を押し上げたりして視界の確保を行い、手術を容易にする。また、鉗子の鉗部で血管を切除する際、その微妙な硬さで血管の脆さを感じる。これらの複雑な操作に対応可能な力覚装置を開発する。まずは、既開発品である、把持提示機能の試作(1号機)による、把持操作の評価実験を行う。この評価結果を分析し、方式設計を行い、試作2号機を構築する。設計条件として、開発中のシミュレータに組み込み、操作に影響のない機構(重量、サイズ)であることとする。試作2号機の動作検証を行い、最終的には開発中のシミュレータに組み込み、上記の変形手法も統合した、手術シミュレータ改良システムを構築し、評価を行う。

4. 研究成果

(1) 専門医用手術手技訓練法の研究

3名の術者が、13名の患者に対し、患者特異的腹腔鏡手術シミュレータを用いて、術前模擬手術を施行した。模擬手術と実際の手術を比較すると、腎血管・腎静脈に流入する血管・腫瘍・尿管など腎臓周囲の臓器はほぼ正確にシミュレータ内に再現されていたが、性腺静脈が流入する位置が違うなど、4か所 minorな相違が認められた。術者の評価は概ね良好で、1.術前訓練は役に立つか? 2.術前訓練することで実際の手術時に安心感はあるか? のふたつの質問に対しては5点満点中4点以上の高評価を頂いた。特に内臓逆位症例や複雑な腎血管を呈していた腎盂尿管移行部狭窄症患者に対する模擬手術は、術前トレーニングとして大変有用であった。患者特異的シミュレーションを臨床例で術前に腹腔鏡手術で行った報告はほとんどなく世界に先駆ける成果である。ただし、結合組織の剥離において、模擬手術と実際の手術での感覚の相違

を訴える術者がおり、結合組織のよりリアルな模擬は今後の課題と考えている。

(2) 生体組織の運動を正しく模擬する実時間非線形力学計算手法の確立

非線形力学計算モデルとして、超弾性体モデルのシミュレーションプログラムを構築した。プログラムの検証のため、市販 S/W (ADINA) と比較し、平均誤差 1.0% 以内と構築したモデルの妥当性が得られた。自重による変形結果実験では、超弾性体はそれらしい動きをしているが、LBBK (Ladyszehenskaya - Babuska - Brezzi - Kikuchi Condition) 条件を満足しないため圧力振動が発生する。シミュレータで必要とする連続的な挙動を模擬するためには、この振動を抑える必要があるため、LBBK 条件を満足するモデルとして、総エネルギー汎関数に緩和条件を追加した。

$$\int_{\Omega} \delta \lambda \left(W^V - \frac{\lambda}{\kappa} \right) d\Omega - \sum_e \frac{\beta h}{\kappa} \int_{\partial \omega_e} [\lambda] [\delta \lambda] dS = 0$$

緩和条件

これにより、もともと 100,000 オーダの圧力振動であったが、緩和条件のパラメータを調整する($\beta = 1000$)ことで 1,000 以下になり、振動は 100 分の 1 に抑えられた (図 1)。

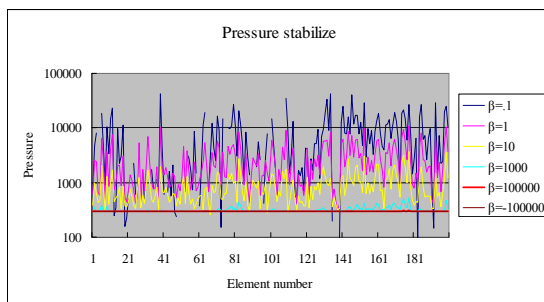


図 1 圧力項の安定化

構築した非線形臓器変形アルゴリズムを CPU マルチコアによる処理の高速化を実施した。1 スレッド 400ms であった処理時間が、8 スレッドによる並列処理で 140ms と半分以下の処理時間を達成した。

本研究により、非線形の挙動を実時間で模擬できる変形シミュレーションモデルを構築した。これにより、より生体に近い挙動を示すモデルをインタラクティブに処理できる。本来、非線形シミュレーションは処理が重く、オフラインシミュレーションであったが、本

研究の成果により、実時間の可能性が見えた。本研究の目的は、訓練用手術シミュレータであるが、応用製品として、手術ナビゲーションにおける、手術での臓器の挙動をトレース・予測するアルゴリズムや、手術ロボットでの危険予知のための予測アルゴリズムへの発展が期待できる。

(3) 模擬術具用力学装置の開発

既開発品の把持提示機構に術具開閉操作のセンサを取り付け、単体システムを構築し、実験を行った。モータの駆動回路の更新レートが 30Hz と遅く、遅れが目立つことがわかった。一般的に力覚提示には 1 kHz の高更新レートが必要といわれており、改良を実施した。既存システムの課題である更新レートの向上と、さらなる小型・軽量化を目指して、試作 2 号機を開発した。試作 1 号機に比べ、体積比が半分以下となった。作成した試作 2 号機の評価試験を実施した (図 2)。1.7 [N] 程度の把持力を提示できることが検証できた。摩擦による提示メカニズムのため、表面粗さの工作精度、個体差に依存する面があるが、モータ指令値 (トルク) と比例関係となり、連続的な力変化を提示することができた。

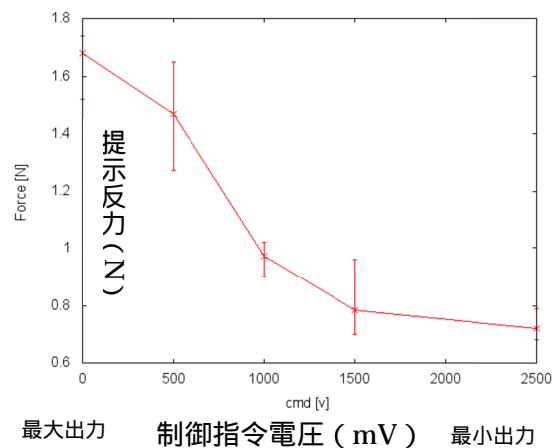


図 2 実験結果

また、小型・軽量である本装置は、保有する既存の開発中のシミュレータシステムの触覚装置に取り付けることができ、臓器を押しするような腕全体の触覚に加え、膜の剥離のような微細な操作に対する触覚を提示できるシステムへ拡張できる。

5. 主な論文発表等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

1. Ogata M, Makiyama K, Yamada T, Nagasaka M, Yamanaka H, Kubota Y: Dynamic measuring of physical properties for developing a sophisticated preoperative surgical simulator: how much reaction force should a surgical simulator represent to the surgeon? *Stud Health Technol Inform* 184, 査読有, 312-318, 2013
2. 山中弘行、槇山和秀、上野大樹、長坂学、乾谷徹、高波健太郎、緒方正人、井尻敬、横田秀夫、姫野龍太郎、窪田吉信: 患者特異的シミュレータの実際の手術への応用. *日本 VR 医学会雑誌* 11, 査読有, 1-6, 2013.
3. 緒方正人、長坂学、乾谷徹、坂本英男、高波健太郎、槇山和秀、窪田吉信: 患者固有の形状データに基づく手術手技訓練用シミュレータ. *情報処理学会論文誌* 53, 査読有, 421-431, 2012
4. 槇山和秀: 患者特異的腹腔鏡手術シミュレータ. *Jpn J Endourol* 25, 査読有, 84-88, 2012.
5. Makiyama K, Nagasaka M, Inuiya T, Takanami K, Ogata M, Kubota Y: Development of a patient-specific simulator for laparoscopic renal surgery. *Int J Urol*. 19, 査読有, 829-835, 2012.
6. Makiyama K, Sakata R, Yamanaka H, Tatenuma T, Sano F, Kubota Y. Laparoscopic Nephroureterectomy in Renal Pelvic Urothelial Carcinoma With Situs Inversus Totalis: Preoperative Training Using a Patient-specific Simulator. *Urology* 80, 査読有, 1375-1378, 2012.
7. Yamanaka H, Makiyama K, Tatenuma T, Sakata R, Sano F, Kubota Y. Preparation for pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction using a patient-specific laparoscopic simulator: a case report. *J Med Case Rep*. 6, 査読有, 338, 2012. doi: 10.1186/1752-1947-6-338.
8. 槇山和秀: シミュレータを用いた腹腔鏡手術支援. *Urology Today* 19, 査読無, 48-49, 2012.

9. 槇山和秀: 術前に腹腔鏡下腎摘除術が終わっている、次世代型患者特異的シミュレータ. *泌尿器外科* 24, 査読無, 465-466, 2011.
10. Ogata M, Nagasaka M, Inuiya T, Makiyama K, Kubota Y: A development of surgical simulator for training of operative skills using patient-specific data. *Stud Health Technol Inform*. 163, 査読有, 415-421, 2011.

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 槇山和秀: シミュレーションシステムの開発～腎部分切除術を中心に～. 第 102 回日本泌尿器科学会総会. 2014.4.26. 神戸.
2. 槇山和秀: 有効な腹腔鏡トレーニング方法は? : Virtual reality simulator. 第 26 回日本泌尿器内視鏡学会総会, 名古屋, 2013.11.9.
3. 槇山和秀、窪田吉信: 患者特異的腹腔鏡手術シミュレータの開発: 医工連携プロジェクトで見た光と影. 第 26 回日本泌尿器内視鏡学会総会, 名古屋, 2013.11.8.
4. Makiyama K, Yamanaka H, Ueno D, Sano F, Nakaigawa N, Kubota Y: Face and content validation of a patient-specific simulator for laparoscopic renal surgery. American Urological Association annual meeting 2013, San Diego, 2013.5.6.
5. 槇山和秀: 腹腔鏡下腎臓手術の個別化シミュレーション. 第 26 回日本泌尿器内視鏡学会総会, 仙台, 2012.11.24.
6. Makiyama K, Yamanaka H, Ueno D, Sano F, Kubota Y: Clinical use of a patient-specific simulator for laparoscopic renal surgery. American Urological Association annual meeting 2012, Atlanta, 2012.5.21.
7. 槇山和秀: 画像からボリュームデータへ: 手術シミュレータへの応用. 第 100 回日本泌尿器科学会総会. 2012.4.24. 横浜
8. Makiyama K: Laparoscopic renal surgery simulation- What 's new. 29th World congress of Endourology and SWL. 2011.12.1. Kyoto.
9. 槇山和秀、上野大樹、山中弘行、長坂学、

乾谷徹、高波健太郎、緒方正人、横田秀夫、姫野龍太郎、窪田吉信：患者特異的腹腔鏡下手術シミュレータの開発。第11回日本VR医学会総会。2011.8.27. 奈良

10. Makiyama K, Sakata R, Kubota Y, Inuiya T, Nagasaka M, Ogata M, Yokota H, Himeno R: The development of patient specific simulator for laparoscopic renal surgery. American Urological Association annual meeting 2011, Washington DC, 2011.5.17.

11. 榎山和秀：腹腔鏡手術シミュレータの最前線。第99回日本泌尿器科学会総会。2011.4.21. 名古屋

〔産業財産権〕

○出願状況（計5件）

1. 名称：手術シミュレータ用鉗子
発明者・権利者：窪田吉信、榎山和秀、緒方正人、長坂学
種類：特許 番号：特許願 2012-286773
出願年月日：2012.12.28.
国内外の別：国内

2. 名称：手術シミュレーション用モデルの生成方法、手術シミュレーション方法、及び手術シミュレータ
発明者・権利者：窪田吉信、榎山和秀、菊川孝明、長坂学、坂本英男、緒方正人
種類：米国特許 番号：特許願 13/376697
出願年月日：2010.6.4.
国内外の別：国外

3. 名称：トロカール位置設定用模擬術具装置
発明者・権利者：窪田吉信、榎山和秀、菊川孝明、寺田尚史、本郷新、長坂学、緒方正人
種類：特許 番号：特許願 2009-295602
出願年月日：2009.12.25.
国内外の別：国内

4. 名称：トロカールポート位置決定シミュレーション方法及びその装置
発明者・権利者：榎山和秀、窪田吉信、本郷新、長坂学、緒方正人
種類：特許 番号：特許願 2009-295603
出願年月日：2009.12.25.
国内外の別：国内

5. 名称：手術シミュレーション用モデルの生成方法、手術シミュレーション方法、及び手術シミュレータ
発明者・権利者：窪田吉信、榎山和秀、菊川孝明、長坂学、坂本英男、緒方正人

種類：特許 番号：特許願 2009-136898
出願年月日：2009.6.8.

国内外の別：国内

○取得状況（計2件）

1. 名称：Method for generating model for preoperative simulation
発明者・権利者：窪田吉信、榎山和秀、長坂学、高波健太郎、緒方正人
種類：米国特許 番号：登録番号 8681152
取得年月日：2014.3.25.
国内外の別：国外

2. 名称：術前シミュレーションのためのモデル生成方法
発明者・権利者：窪田吉信、榎山和秀、長坂学、高波健太郎、緒方正人
種類：特許 番号：特許 5215828 号
取得年月日：2013.3.8.
国内外の別：国内

〔その他〕

受賞（計2件）

1. 第3回阿曾賞：榎山和秀：患者特異的腹腔鏡手術シミュレータの開発。2013.11.8.
2. 2012年情報処理学会論文賞：緒方正人、長坂学、乾谷徹、坂本英男、高波健太郎、榎山和秀、窪田吉信：患者固有の形状データに基づく手術手技訓練用シミュレータ。情報処理学会論文誌 53, 421-431, 2012

ホームページ

<http://www-user.yokohama-cu.ac.jp/~urology/kenkyu/surgicalsimulatorindex.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎山和秀 (MAKIYAAMA, Kazuhide)

横浜市立大学・医学部・准教授

研究者番号：40347307

(2) 研究分担者

窪田吉信 (KUBOTA, Yoshinobu)

横浜市立大学・医学研究科・教授

研究者番号：10106312

長坂学 (NAGASAKA, Manabu)

横浜市立大学・医学研究科・客員研究員

研究者番号：20526420

緒方正人 (OGATA, Masato)

横浜市立大学・医学研究科・客員教授

研究者番号：70501154