

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03032

研究課題名(和文)臓器変形・力学特性のスパースモデリング及び術中推定に関する研究

研究課題名(英文) A Study on sparse modeling of organ deformation and physical characteristics for intraoperative guidance

研究代表者

中尾 恵 (Nakao, Megumi)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：10362526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、内視鏡手術やロボット手術において得られる内視鏡カメラ映像内の限られた視覚情報のみから臓器変形・力学特性をリアルタイムに推定するスパースモデリングの探究を目指した。三次元CT/MRI画像から構築される弾性体モデルを事前知識として活用し、内視鏡画像から頑健性の高い多次元特徴量を選択・抽出することによって、遮蔽や視野外によって直接視認できない領域を含めて臓器変形を推定する方法を開発した。臓器変形・切除に対応して腫瘍位置の実時間可視化を達成する手術支援システムを開発し、患者症例データの適用による臨床応用を想定した実験を通して試作システムの有用性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発システムは内視鏡手術において、手術の安全性向上、医師の負担軽減、手術時間の短縮など先進医療の課題への貢献が可能である点で社会的意義が大きい。また、本研究は数理モデリング・有限要素解析・コンピュータビジョンを融合した独創的な理論体系・基盤技術の探究を軸としている。開発アルゴリズムはカメラ画像処理、形状推定やロボティクスなどの他の学術分野への応用に繋がることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to explore sparse modeling to estimate organ deformation and mechanical characteristics in real time from limited visual information during endoscopic surgery and robot surgery. We have developed a method to estimate organ deformation by using elastic body model constructed from three-dimensional CT / MRI image as prior knowledge and extracting highly robust multi-dimensional feature values from endoscopic images. We designed a prototype surgical support system that achieves real-time visualization of tumor position in response to organ deformation and resection, and evaluated the prototype system by applying patient data assuming clinical application.

研究分野：医用システム

キーワード：臓器変形 コンピュータビジョン スパースモデリング 手術支援システム

1. 研究開始当初の背景

三次元医用画像の認識・分類や可視化技術の確立、近年のコンピュータの性能向上等により、臓器を解剖学的単位で抽出し、様々に可視化して観察できるようになった。一方、手術計画や術中支援に必要な不可欠な臓器の形状情報や力学特性は画像とは異なる形式で扱われてきたが、症例データごとに逐次メッシュの製作と詳細な条件設定を必要とする従来の工学的な解析方式は、多忙な医師が数日後に実施する手術をシミュレートするという臨床現場におけるニーズに十分に答えられていなかった。これに対し、研究代表者らは患者個人の実測 CT/MRI データから構築される三次元像上で想定する臓器変形・加工等の手術プロセスをリアルタイムにシミュレートし、手術時に内視鏡や術具操作と同期して計画内容を術者に提示する術前計画・術中ナビゲーションシステムを目指してきた。

手術ナビゲーションの目的の一つに、手術時における術者や内視鏡カメラの視野、光学的制約を超越した人体・臓器の形態的・力学的な情報の生成がある。内視鏡手術において組織によって遮蔽された臓器の一部や臓器内部の腫瘍を可視化できれば、術者の負担軽減、安全な手術の遂行、手術時間の短縮等に有効と考えられる。しかし、これら概念の実現には、術中における臓器の呼吸性移動、気腹や術野の確保等の手術プロセスの進展に伴う臓器変形への対応が課題となる。熟練した術者は解剖学的な知識や手術経験に基づき、遮蔽された領域の三次元形状や周辺の臓器・脈管との接続状況、癒着などの状態を力学的に推測しつつ手術を遂行する。光学的、臓器表面にマーカーを設置する方式が考えられているが、滅菌が必要で実用には至っていない。熟練者が手術時の限られた視覚情報から臓器の状態を推定できるように、計算機においても形態的かつ力学的に同等あるいはそれ以上の認識・推定を達成できれば、手術時に臓器の変形・切除に合わせた透視イメージの生成が可能になると考えられる。これには臓器変形・力学特性のリアルタイム推定技術、位置合わせ等のセットアップコストを最小限に抑えた臓器局所変位の計測方法の確立が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、近年発展が目覚ましい数理モデリング及びコンピュータビジョン技術に着目し、内視鏡手術やロボット手術において得られる内視鏡カメラ映像内の限られた視覚情報のみから臓器変形・力学特性をリアルタイムに推定するスパースモデリングの探究を目指した。圧縮センシングやスパースモデリングの数理は画像圧縮や超解像等の分野において、その可能性が注目されつつあるが、本研究では臓器変形・力学特性のモデリングへと応用した。例えば、手術用ロボットのマニピュレータや手術鉗子によって臓器や血管を変形させる際、一部を固定・把持することで操作されることが多く、外力のスパース性を仮定できると考えられる。スパース性の仮定の下では、一定誤差範囲内で劣決定系の線形連立方程式の解が得られることが知られている。このスパース性への着眼によって次元を圧縮した弾性変形問題として定式化し、臓器全体の情報へと復元することによって、情報損失が少ないリアルタイム推定を達成できる可能性がある。

本研究における技術的な挑戦に関する別の観点として、現行の立体内視鏡や多視点カメラから得られる手術映像のみに基づくマーカーレス局所変位推定を前提としている点が挙げられる。三次元 CT/MRI 画像から構築される弾性体モデルを事前知識として活用し、内視鏡画像から臓器のシルエット等の頑健性の高い多次元特徴量を選択・抽出することによって、遮蔽や視野外によって直接視認できない領域を含めて臓器変形を推定する方法の開発を目指した。さらに、前述の弾性体のスパースモデリングとの融合により、手術時に一部視認できる臓器表面の局所的な変位のみから鉗子操作が臓器に及ぼす外力・内部応力などをオンラインで推定する理論体系の確立を目指した。研究期間の後半では、開発したアルゴリズムと計測装置を用いて、臓器変形・切除に対応して腫瘍位置の実時間可視化を達成する拡張内視鏡手術支援システムを開発した。臨床への適用を想定した術中実測、患者症例データの適用などを通して試作システムの有用性を評価した。

3. 研究の方法

本研究課題は、外科手術で扱われる形態・力学情報のスパース性に着眼した臓器変形・力学特性のスパースモデリング理論の構築と時系列画像に基づくマーカーレス局所変位計測・推定方法の開発に大別できる。平成 27、28 年度にこれら基礎理論・アルゴリズムの構築に取り組み、テーマごとの検証・性能評価を実施した。平成 29、30 年度に臓器変形推定・可視化アルゴリズムと内視鏡位置・姿勢計測装置を統合した臓器変形対応型の拡張内視鏡手術支援システムを試作し、動物の摘出臓器や患者症例データを用いて、臨床現場への導入を想定した機能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 臓器大変形・切除に対応したボリューム可視化アルゴリズムの開発

手術時に臓器に生じる大変形に加えて、切除による構造変化などの一連の手術プロセスをシミュレートするボリューム可視化アルゴリズムの開発を目指した。患者固有の三次元 CT 画像に基づいて肝切除プロセスをシミュレートし、切除の進展に伴って出現すると想定される肝血管の走行と外観を再構成する 臓器切除プロセスマップの概念を提案した。

(2) 圧縮センシングを応用した弾性体の変形推定理論の構築

手術時を想定した外力のスパース性の仮定の下で、有限要素解析に圧縮センシングの考え方を導入し、観測される部分変位から弾性体の力境界条件を復元・推定する方法を検討した。弾性体操作時に観測される一部の境界条件から、弾性体に及ぼされている外力、全体の変形や内部応力を推定するスパース有限要素モデリングとしての理論体系の構築を目指した。

(3) 多視点カメラによる任意視点内視鏡映像生成システムの開発

胸腔や気腹後の腹腔内で空間的に展開可能な多視点カメラを想定し、複数視点画像の特徴量ベースモザイクングにより仮想のカメラ位置からの任意視点映像をリアルタイムに合成する方法を開発した。

(4) 時系列内視鏡画像に基づく臓器の局所変位計測法の開発

内視鏡画像において視認可能な臓器表面から局所変位を計測する方法を開発した。光学マーカーの設置を必要とせず、現行の立体内視鏡や多視点カメラから得られる複数視点画像から GPU による並列演算を活用した実時間画像処理によって臓器のシルエットなどの多次元特徴量を安定的に獲得する方法を開発した。

(5) 弾性体力学特性のスパースモデリング理論の構築

(2)の L1 再構成に基づく変形・応力推定方法の考え方をヤング率等の臓器力学特性の疎表現へと応用した。本研究では、特に手術支援における実時間変形・切除シミュレーションを想定した臓器力学特性のスパースモデルについての理論構築を目指した。

(6) カメラ画像を用いた臓器変形推定アルゴリズムの開発

三次元 CT/MRI 画像から構築される弾性体モデルを事前知識として活用した推定によって、単眼カメラ画像の輝度情報を用いた弾性体の変形推定方法を提案した。

(7) 内視鏡カメラ・術具の位置・姿勢計測環境の構築

本講座で保有する光学式モーショントラッキングシステムを用いて、手術鉗子の先端位置、及び、臓器を模した 3D プリンタモデルの表面変位を 約 0.5mm の精度で計測可能な実験評価環境を構築した。

(8) 臓器変形に対応した腫瘍位置の実時間可視化方法の開発

(4)(6)によって推定された臓器局所変位と術前に取得された三次元 CT/MRI 画像に基づいて、変形を反映した臓器外形と腫瘍のボリューム可視化を達成するアルゴリズム及びソフトウェアを開発した。

(9) 弾性体試料を用いた弾性体変形推定アルゴリズムの検証・評価

本研究では、臓器内部構造を含めた局所変位の可視化を目的としており、その推定精度の検証が重要である。3D プリンタによって形状・内部構造が自明の弾性体試料を設計・製作し、検証・評価を行った。

(10) 臓器変形・切除手術支援システムの試作・評価

(8) のベースプログラムを呼吸器外科、胆管膵・移植外科における手術プロセスに合わせて拡張及びカスタマイズし、術中変形・切除に対応した手術支援システムを試作した。

(11) 術中計測に基づくスパース臓器モデルのオンライン最適化の研究

(6) によって内視鏡画像から計測される臓器の局所変位を、(5)のスパース弾性体モデルの推定結果と比較し、推定結果とのずれを最小化するようモデルをオンラインで更新することによって、情報損失の少ない復元、変形推定の高速度化を達成するオンライン最適化の枠組みについて検討した。

(12) 臓器変形・力学特性の有限要素スパースモデリングライブラリの開発

(2), (5), (11)で開発した L1 再構成に基づく弾性体の変形・応力推定、力学特性のオンライン最適化アルゴリズムを有限要素スパースモデリングライブラリとしてまとめた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- [1] M. Morita, M. Nakao, T. Matsuda, "Model-based Estimation of Elastic Moduli by Local Displacement Observation of an Elastic Body", Advanced Biomedical Engineering, pp. 39-46, 2018. <https://doi.org/10.14326/abe.7.39>
- [2] M. Nakao, S. Aso, Y. Imai, N. Ueda, T. Hatanaka, M. Shiba, T. Kirita and T. Matsuda, "Automated Planning with Multivariate Shape Descriptors for Fibular Transfer in Mandibular Reconstruction", IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol. 64, No.8, pp.1772-1785, Aug 2017. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2621742>
- [3] M. Nakao, M. Senoo, T. Matsuda, "Fingertip-based Feature Analysis for the Push and Stroke Manipulation of Elastic Objects", IEEE Trans. on Haptics, Vol. 10, No. 4, pp. 523-532, Oct 2017. <https://doi.org/10.1109/TOH.2017.2720598>
- [4] S. Wu, M. Nakao, T. Matsuda, "SuperCut: Superpixel based Foreground Extraction with Loose Bounding Boxes in One Cutting", IEEE Signal Processing Letters, Vol. 24, No. 12, pp.1803-1807, Oct 2017. <https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2761393>
- [5] S. Wu, M. Nakao, T. Matsuda, "Continuous Lung Region Segmentation from Endoscopic Images for Intra-operative Navigation", Computers in Biology and Medicine, Vol. 87, No. 1, pp. 200-210, Aug 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.05.029>
- [6] R. Sakata, M. Nakao, T. Matsuda, "Estimation of External Forces on the Basis of Local Displacement Observations of an Elastic Body", Advanced Biomedical Engineering, Vol. 6, pp. 21-27, Mar 2017. <https://doi.org/10.14326/abe.6.21>
- [7] M. Nakao, S. Aso, Y. Imai, N. Ueda, T. Hatanaka, M. Shiba, T. Kirita and T. Matsuda, "Statistical Analysis of Interactive Surgical Planning Using Shape Descriptors in Mandibular Reconstruction with Fibular Segments", PLoS One, 11(9): e0161524, Sep 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161524>
- [8] M. Nakao, S. Endo, S. Nakao, M. Yoshida and T. Matsuda, "Augmented Endoscopic Images Overlaying Shape Changes in Bone Cutting Procedures", PLoS One, 11(9): e0161815, Sep 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161815>

[学会発表] (計 16 件)

- [1] 森田 充樹, 中尾 恵, 松田 哲也, 局所変位観測に基づく弾性率分布のモデルベース推定, 電子情報通信学会技術報告 (MI), Vol. 118, No. 286, pp. 1-6, Nov. 2018.
- [2] M. Morita, M. Nakao, T. Matsuda, "Model-based Estimation of Elastic Moduli by Local Displacement Observation of an Elastic Body", 生体医工学シンポジウム, p122, Sep 2017. (ポスターアワード)
- [3] 森田 充樹, 中尾 恵, 松田 哲也, "局所的な変位観測に基づく弾性体の弾性率推定", VR 医学会学術大会抄録集(第 17 回大会), OP2-3, Aug 2017.
- [4] 中尾 恵, 松田 哲也, "弾性体の局所変位観測に基づくモデルベース外力・変形推定", VR 医学会学術大会抄録集(第 17 回大会), OP2-3, Aug 2017. (学術奨励賞)
- [5] M. Morita, M. Nakao, T. Matsuda, "Elastic Modulus Estimation Based on Local Displacement Observation of Elastic Body", 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp.2138-2141, Jul 2017. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8037277>
- [6] M. Nakao, A. Saito, T. Matsuda, "A simulation study on deformation estimation of elastic materials using monocular images", Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery, 12(1), S257-258, Jun 2017.
- [7] S. Wu, M. Nakao and T. Matsuda, Super pixels based deformation recognition for endoscopic images, Proc. The 4th Conference on Medical and Biological Imaging, JSMBE-MBI2016-02, Mar 2017.

- [8] 坂田 良平, 中尾 恵, 松田 哲也, "弾性体の局所的な変位観測に基づく外力推定 ～ 可解性向上のための制約条件の検討 ～", 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), No.42, pp.1-8, Jan 2017.
- [9] 齋藤 陽, 中尾 恵, 浦西 友樹, 松田 哲也, "カメラ画像の大域的な輝度情報に基づく弾性体の変形推定", 電子情報通信学会技術報告 (MI), pp. 13-18, Jan 2017.
- [10] S. Wu, M. Nakao and T. Matsuda, "Automatic GrabCut based Lung Extraction from Endoscopic Images with an Initial Boundary", 13th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), pp.1374-1378, Nov 2016. <https://doi.org/10.1109/ICSP.2016.7878051>
- [11] M. Nakao, K. Taura, T. Matsuda, "Deformable resection process map for intraoperative cutting guides", 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 2554-2557, Aug 2016. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591251>
- [12] M. Nakao, K. Taura, T. Matsuda, "Deformable resection process map for estimating local appearance of vascular structures in cutting procedures", Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol. 11, S268-269, Jun 2016.
- [13] 坂田 良平, 中尾 恵, 松田 哲也, "弾性体の局所的な変位観測に基づく外力の推定", 電子情報通信学会技術報告 (MI), pp.43-48, Nov 2015.
- [14] A. Saito, M. Nakao, Y. Uranishi and T. Matsuda, "Deformation Estimation of Elastic Bodies Using Multiple Silhouette Images for Endoscopic Image Augmentation", IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR), pp. 170-171, Sep 2015. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2015.49>
- [15] 中尾 恵, 田浦 康二朗, 松田 哲也, "三次元画像に基づく臓器切離プロセスのモデリング", VR 医学会学術大会抄録集(第 15 回大会), Vol. 15, suppl-1, pp.23-24, Sep 2015.
- [16] 齋藤 陽, 中尾 恵, 浦西 友樹, 松田 哲也, "内視鏡手術支援のための多視点シルエット画像を用いた柔軟体の変形推定", 電子情報通信学会技術研究報告 医用画像 (MI), Vol. 115, No. 25, pp. 13-18, May 2015.

〔図書〕 (計 1 件)

- [1] 中尾 恵, "人体・臓器形態のバーチャル化と手術計画・術中支援への応用", VR/AR 技術の開発動向と最新応用事例, ISBN : 978-4-86104-694-0, pp.445-452, 2018.

〔産業財産権〕

○ 出願状況 (計 4 件)

名称：情報処理装置、情報処理方法及びプログラム

発明者：中尾 恵

権利者：京都大学

種類：特許

番号：特願 2017-002641

出願年：2017 年

国内外の別：国内

名称：情報処理装置、情報処理方法及びプログラム

発明者：中尾 恵, 松田 哲也, 森田 充樹

権利者：京都大学

種類：特許

番号：特願 2016-254752

出願年：2017 年

国内外の別：国内

名称：情報処理装置、情報処理方法及びプログラム

発明者：中尾 恵, 浦西 友樹, 齋藤 陽

権利者：京都大学

種類：特許
番号：特願 2015-097380
出願年：2015 年
国内外の別：国内

名称：情報処理装置、情報処理方法及びプログラム
発明者：中尾 恵, 松田 哲也, 坂田 良平
権利者：京都大学
種類：特許
番号：特願 2015-120581
出願年：2015 年
国内外の別：国内

[その他]

ウェブサイト：<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~meg/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：浦西 友樹
ローマ字氏名：Yuki Uranishi
所属研究機関名：大阪大学
部局名：サイバーメディアセンター
職名：准教授
研究者番号 (8 桁)：00533738

研究分担者氏名：佐藤 寿彦
ローマ字氏名：Toshihiko Sato
所属研究機関名：京都大学
部局名：医学研究科
職名：准教授
研究者番号 (8 桁)：40388822

研究分担者氏名：松田 哲也
ローマ字氏名：Tetsuya Matsuda
所属研究機関名：京都大学
部局名：情報学研究科
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：00209561

研究分担者氏名：黒田 知宏
ローマ字氏名：Tomohiro Kuroda
所属研究機関名：京都大学
部局名：医学研究科
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：10304156

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。