

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04139

研究課題名(和文) AIに基づく外科医の術中技能の定量化による次世代低侵襲手術手技訓練システム

研究課題名(英文) AI-based system for training surgical skills of minimally invasive surgery

研究代表者

諸岡 健一 (Morooka, Ken'ichi)

岡山大学・自然科学学域・教授

研究者番号：80323806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：当該研究は、腹腔鏡下手術の安全性・確実性の向上を目指し、申請者が有する実時間有限要素解析システム(neuroFEM)と、術中内視鏡画像を融合することで、手術中の外科医の手術手技と、手技操作に伴う人体組織の振舞いを計測し、その計測データに基づいた次世代の低侵襲手術手技訓練システムの開発を目的とする。

その成果として、有限要素解析システムmultiphysics DeepFEM(mDeepFEM)の推定精度向上を目指し、1)DNNライブラリを用いたmDeepFEM構築の実装と、2)mDeepFEMのネットワークの構造の最適化を行った。また、各画像から術具領域を抽出・認識するシステムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内視鏡手術の基礎技術の訓練システムは確立しつつあるが、応用技術を訓練・評価する枠組みは未だにない。これに対し、本研究では、我々が有する実時間有限要素解析と、人工知能を組み合わせ、術中内視鏡画像から手術中の外科医の手術手技と、それに伴う人体組織の振舞いを精緻に推定する手法を開発する。これにより、術中の術具の動きと、それに伴う患者指向臓器・組織の形状変形を再現でき、それを用いて応用技術を訓練・評価する次世代の低侵襲手術手技訓練システムが構築できる。このシステムにより、術中と同様の判断や手術手技の訓練を術前に行え、低侵襲手術の安全・正確性の飛躍的な向上に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：We studied an AI-based support system for training surgical skills for minimally invasive surgery (MIS). There are fundamental techniques to construct the support system. Among them, we developed two main techniques: one is the technique for efficiently and reliably constructing multiphysics DeepFEM which estimates the deformation of soft tissues. The other is the DNN-based system for detecting the regions of surgical instruments in surgical images, and identifying its classes.

研究分野：画像情報処理

キーワード：低侵襲手術 手術手技訓練システム 実時間有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

患者への侵襲が少ない低侵襲手術は、早期離床・早期退院が可能であり、患者の生活の質の向上に貢献している。超高齢社会へ向かいつつある日本の社会的背景を踏まえると、低侵襲手術への要望が更に高まることは容易に予想される。一方、通常の開腹手術と比べ、低侵襲手術では、術者は臓器を直視・触診できず、内視鏡画像のみで体内の3次元空間を推測し術具を操作するなど、高度な手技技術や立体感覚が要求され、術者への肉体的・精神的負担が大きい。また、術具の機能や術者の視野には制限があり、それらに起因する低侵襲手術特異な合併症や死亡事故が発生し、社会問題に発展する場合もある。

このような背景を踏まえて、九大病院では2004年より内視鏡手術手技を訓練するトレーニングセンター (<https://mit.med.kyushu-u.ac.jp/>) を設立し、これまで1,500人以上が訓練セミナーを受講している。研究分担者である大内田は、講師として長年センター運営に携わっている。

セミナーでは、仮想現実技術を使った手術手技訓練システム(図1(左))や、人体に見立てた箱の内部に、人体臓器の触感に近いシート(図1(右))を置いたトレーニングボックスを使って、内視鏡手術の基礎的な手技を訓練する。具体的には、訓練者は単純な課題(図1(右)の場合、黒点に針を通し糸で結ぶ)に取り組み、訓練中の術具の動きや課題の成功回数など計測し、得られたデータから手技の正確さや効率などを評価する。この評価と訓練を繰り返しながら、基礎手技

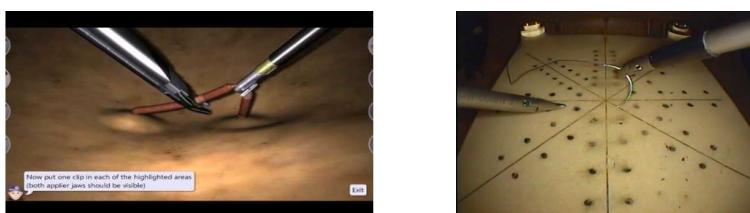


図1：現在の手術手技トレーニングシステム例

を学ぶ。

一方、実際の手術では、患者体内の状態に応じて適切な治療を施すための高度な応用技術も必要である。上述のように、基礎技術の訓練システムは確立しつつあるが、応用技術を訓練・評価する枠組みは未だにない。この要因として、術中の術具の動きや、術具操作による臓器の動きを計測する技術が確立されていないためである。そのため、術中2次元画像から熟練医師の手技の3次元的動きを想像し、それを再現できるように訓練を繰り返す、あるいは多くの手術を経験するのみである。

応用技術の訓練・評価システムを構築するには、術中の術具の動きを計測するだけでなく、その術具操作による臓器の変形をも計測する技術が必要不可欠である。これに対し、我々は、軟性組織変形を精緻に且つ実時間で推定するシステム{neuroFEM}を開発している[1]。まず、非線形有限要素法(非線形FEM)を用いて、術具等により組織に作用する様々な外力に対し、臓器のボリュームモデル(以後、臓器モデル)の変形パターンを多数作成する。このパターンを用いて、「外力に対する組織モデルの変形」という非線形関係を表すニューラルネットワーク(Neural Network: NN)「neuroFEM」を構築する。

非線形FEMによる変形推定精度は高いが、膨大な計算時間を要する。従来、近似計算の導入で非線形FEMを高速化しているが、それによる推定精度の低下は避けられない。これに対し、neuroFEMは、肝臓などの実質臓器や、形状・体積共に変わる管腔臓器(胃など)の非線形変形も、非線形FEMとほぼ同程度の推定精度を保ちつつ、実時間で推定可能である(図2)。また、我々は、立体内視鏡画像から組織表面形状を復元する技術を有し、更に、近年人工知能を使った画像からの物体検出が盛んに行われ、その検出精度はかなり高くなっている。



図2：neuroFEMによる(左)肝臓、(右)胃の変形シミュレーション結果

2. 研究の目的

本研究では、我々の有する技術を拡張し、術中画像と人工知能を有機的に組み合わせることで、術中の術具の動きと、その術具操作による臓器の変形を実時間で且つ精緻に推定する、独創的な手法を開発することで、手術中の外科医の手術手技と、それに伴う人体組織の振舞いを計測し、

それに基づいた次世代の低侵襲手術手技訓練システムを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

まず, neuroFEM を拡張し, 異なる物性の組織間の相互作用を考慮した実時間有限要素解析システム multiphysics DeepFEM (mDeepFEM) の構築と, それによる患者臓器形状の計測法の開発について研究を行った。まず, neuroFEM の入力位置と周囲からの応力を入力としていたため, それに物体の硬さを表す物性値を入力パラメータを加えたシステムに拡張した。ここで, これまで開発した neuroFEM は C 言語で作成していたが, その学習に要する時間が膨大となることが問題であった。そこで, 深層学習で用いられる DNN ライブラリに書き換えることで, 学習の効率化を図った。

次に, mDeepFEM のネットワークの構造の最適化を行った。具体的には, mDeepFEM は, 位置と周囲からの応力の時系列データを入力することで, 臓器変形を推定する。そこで, 時系列データを扱えるニューラルネットワークの1種であるリカレントニューラルネットワーク (Recurrent Neural Network: RNN) や Gated Recurrent Unit (GRU) を mDeepFEM に導入した。

また, 内視鏡画像から術具領域を自動的に抽出するシステムについて研究を行った。このシステム開発では, 術具が写っている内視鏡画像から, 術具領域をラベル付けした学習データからなるデータベースが不可欠である。そのため, 大量の内視鏡画像を収集し, 各画像から術具領域を手動で抽出・ラベル付けを行った。また, 各画像から術具領域を抽出・認識するシステムの開発を行った。

4. 研究成果

まず, DNN ライブラリを用いず, C 言語で, mDeepFEM の学習を実装した場合, 最大2日間学習に要した。一方, 本研究において DNN ライブラリで実装した方法では, mDeepFEM の構築に約22分と飛躍的な高速化を実現できた。この高速化の要因として, 計算機の性能向上 (CPU: AMD EPYC 7742 64-Core Processor, GPU: Quad Nvidia A100 80G を使用) が挙げられるが, DNN ライブラリによる実装で, 向上した計算機性能を十分活かすことができたことが大きいと考えられる。

次に, 肝臓の形状モデル (節点: 100 点) を用いて, この形状を推定する mDeepFEM を構築した。この実験では, GRU を導入した DNN (以後, 提案法) と, GRU を導入しない従来の DNN (以後, 従来法) によって mDeepFEM を構築した。また, mDeepFEM の構築に使用した学習・検証・評価用データは, 次の手順でそれぞれ作成した。まず, 肝臓モデルの表面上の点を, 力を加える作用点 (今回は 22 点) とし, 各作用点に様々な大きさや向きの外力を加えた時の変形シミュレーションを行った。また, 物性値も変えてシミュレーションを行い, 「外力とそれによる臓器の変形」を組としたデータを計 44,900 個作成し, このうち学習・検証データとしてそれぞれ 35,891 個, 9,009 個を用いた。一方, テストデータは, 作用点においてランダムに与えた外力を使った変形シミュレーションによって作成した。このテストデータの外力を mDeepFEM に与え, その出力結果である変形データと, テストデータの変形の差を求めることで, mDeepFEM の精度を検証した。

提案手法における実験結果を表 1 に示す。LSTM や RNN など, 時系列データに適用できる DNN のモデルは複数あるが, 特に GRU を導入した mDeepFEM による変形推定精度が向上できた。

| | 物性値 (ポアソン比, ヤング率) | 変位 [$\text{mm} \times 10^{-1}$] | 応力 [$\text{N} \times 10^3 / \text{mm}^2$] |
|------|----------------------|-----------------------------------|---|
| 学習誤差 | 0.2, 200 | 3.94 ± 2.31 | 0.56 ± 1.94 |
| | 0.25, 150 | 5.25 ± 2.81 | 0.58 ± 2.02 |
| | 0.3, 100 | 7.51 ± 3.67 | 0.68 ± 2.37 |
| | 平均 | 5.54 ± 2.92 | 0.60 ± 2.11 |
| 汎化誤差 | 0.2, 200 | 6.09 ± 3.94 | 0.91 ± 3.26 |
| | 0.25, 150 | 7.77 ± 4.77 | 0.92 ± 3.29 |
| | 0.3, 100 | 10.4 ± 6.00 | 0.97 ± 3.43 |
| | 平均 | 8.04 ± 4.88 | 0.93 ± 3.32 |

表 1: mDeepFEM による変形推定精度

術中画像から術具を研究するシステムは, Mask-R CNN を利用して開発した。ここでは, 鉗子, 持針器, ハサミ, の計 3 つクラスに分類するようシステムを構築した。その結果, mIoU 57.4% の高精度で術具を検出・認識できた。

<引用文献>

[1] 諸岡健一, 陳献, 倉爪亮, 内田誠一, 原健二, 砂川賢二, 橋爪誠, 非線形有限要素解析を模したニューラルネットワークを用いた軟性臓器ボリュームモデルの変形シミュレータ, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J93-D, No.3, pp.365-376, 2010

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Mutaguchi Jun, Morooka Ken'ichi, Kobayashi Satoshi, Umehara Aiko, Miyauchi Shoko, Kinoshita Fumio, Inokuchi Junichi, Oda Yoshinao, Kurazume Ryo, Eto Masatoshi | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Artificial Intelligence for Segmentation of Bladder Tumor Cystoscopic Images Performed by U-Net with Dilated Convolution | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Endourology | 6. 最初と最後の頁 1-1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/end.2021.0483 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Mutaguchi Jun, Morooka Ken'ichi, Kobayashi Satoshi, Umehara Aiko, Miyauchi Shoko, Kinoshita Fumio, Inokuchi Junichi, Oda Yoshinao, Kurazume Ryo, Eto Masatoshi | 4. 巻 538 |
| 2. 論文標題 Artificial intelligence for segmentation of bladder tumor cystoscopic images performed by U-Net with dilated convolution | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Endourology | 6. 最初と最後の頁 168225-168225 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/end.2021.0483 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 諸岡 健一 | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 AI画像診断が医療現場を変える：3. 外科治療AI | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 会誌「情報処理」 | 6. 最初と最後の頁 e14-e18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 諸岡 健一 | 4. 巻 36 |
| 2. 論文標題 AI と3次元形状を活用した診断・手術支援 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 医用画像情報学会雑誌 | 6. 最初と最後の頁 1~3 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11318/mii.36.1 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 1. Aiko Umeahra, Ken'ich Morooka, Junya Mutaguchi, Satoshi Kobayashi, Shoko Miyauchi, Ryo Kurazume, Masatoshi Etou |
| 2. 発表標題 Bladder Cancer Segmentation from Cystoscopic Images by Encoder-Decoder Network |
| 3. 学会等名 Computer Assisted Radiology and Surgery 34th International Congress and Exhibition (CARS 2020) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 諸岡健一 |
| 2. 発表標題 情報系研究者から見たAI-CASの今後 |
| 3. 学会等名 第29回日本コンピュータ外科学会大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 諸岡健一 |
| 2. 発表標題 知的医療画像情報処理による診断・治療支援システム |
| 3. 学会等名 第84回メディカルテクノおかやま・サロン（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 諸岡健一 |
| 2. 発表標題 知的画像情報処理による診断・治療支援システム |
| 3. 学会等名 第59回日本生体医工学会大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 榎原愛子, 諸岡健一, 牟田口淳, 小林聡, 宮内翔子, 倉爪亮, 江藤正俊 |
| 2. 発表標題 Tri-Scan強調画像を用いたU-Netによる膀胱鏡画像からの腫瘍検出 |
| 3. 学会等名 第28回日本コンピュータ外科学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ken'ichi Morooka |
| 2. 発表標題 Computer-Aided Support System for Minimally Invasive Surgery Using 3D Organ Shape Models |
| 3. 学会等名 The 24th Asia and South Pacific Design Automation Conference (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 諸岡健一 |
| 2. 発表標題 画像情報処理による医療AI |
| 3. 学会等名 岡山大学Society5.0シンポジウム「AI×医療×工学～AI医療応用最前線～」(招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 寅田信博, 大内田研宙, 諸岡健一, 永井俊太郎, 水内祐介, 河田純, 小田義直, 中村雅史 |
| 2. 発表標題 画像認識による未固定大腸癌切除標本中の病変部検出と腫瘍正常識別および深達度予測 |
| 3. 学会等名 JDDW |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 諸岡健一 |
| 2. 発表標題 3次元AIを用いた画像情報処理による医療支援 |
| 3. 学会等名 第429回CBI学会講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 藤田広志 | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 オーム社 | 5. 総ページ数 160 |
| 3. 書名 医用画像ディープラーニング入門（Chapter18 外科治療画像：諸岡健一） | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| 岡山大学 知的画像メディア学研究室 http://www.cc.okayama-u.ac.jp/~iim/ |
|--|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 大内田 研宙 (Ohuchida Kenoki) (20452708) | 九州大学・大学病院・講師 (17102) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 宮内 翔子 (Miyuchi Shoko) (40828555) | 九州大学・システム情報科学研究院・助教 (17102) | |
| 研究分担者 | 倉爪 亮 (Kurazume Ryo) (70272672) | 九州大学・システム情報科学研究院・教授 (17102) | |
| 研究分担者 | 河村 晃宏 (Kawamura Akihiro) (60706555) | 九州大学・システム情報科学研究院・助教 (17102) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |