

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007 ～ 2008  
 課題番号：19700422  
 研究課題名（和文） 画像列からの術中臓器モデル推定による次世代内視鏡手術支援システムの開発  
 研究課題名（英文） Advanced Support System for Endoscopic Surgery by Estimating Organ Model with Endoscopic Image Sequence  
 研究代表者  
 諸岡 健一（MOROOKA KENICHI）  
 九州大学・デジタルメディスン・イニシアティブ・准教授  
 研究者番号：80323806

研究成果の概要：当該研究は、対象臓器を肝臓とし、術前に作成した患者の肝臓メッシュモデルと、術中に得られる内視鏡画像列を用いて、精緻な術中肝臓モデルを実時間で推定する手法の構築、およびその処理を組み込んだ次世代内視鏡手術支援システムの開発を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,400,000	0	1,400,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	270,000	2,570,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：コンピュータ外科、実時間臓器変形推定、有限要素解析

## 1. 研究開始当初の背景

内視鏡手術は、5mm ～ 2cm くらいの小さな穴を数箇所開いて、その穴に鉗子や内視鏡を挿入し、内視鏡の画像を見ながら鉗子进行操作して行う手術である。通常の開腹手術と比べ、傷口が小さく患者の肉体的負担が軽減できるため、早期回復・早期社会復帰が可能となり、患者の QOL 向上に積極的に貢献できる。このような利点から、内視鏡手術は普及しつつあり、実際、日本内視鏡外科学会のアンケート調査では、2003 年度では 5 万件以上の症例数が報告されている。最近では、ホークスの王貞治監督が受けたことは記憶に新しく、今後も、内視鏡手術への社会的需要はますます高まると予想される。

一方、内視鏡手術には従来の開腹手術とは異なる特有の手術手技が要求される。最も顕著なものは、術者は、患者の様子を内視鏡からの映像だけで把握しなければならない点である。これにより、術者の視野は限定されるだけでなく、画像から 3 次元空間を推定しなければならず、術者には高度な知識と経験が要求されると共に、肉体的精神的に大きな負担がかかる。これに対し、医療事故を防ぎ手術の安全性を高めることを目的とした手術支援システムの開発が、近年盛んに行われている。このシステムの要素技術として、術前に作成した患者のモデルを、内視鏡画像に重ね合わせて表示するものがある。これにより、画像には写らない臓器の表面や内部の様子、その背後にある血管などの情報を術前

モデルによって補完することで、術者の視野を仮想的に広げている。

しかし、鉗子の作業空間を確保するために気腹をする必要があるが、これによる体内圧力が変化することで、術前と術中の臓器形状は異なる。また、術者の鉗子操作などが要因で、術前に作成した臓器、腫瘍、血管の位置は、術中に大きく変動している。従来の支援システムでは、臓器の位置や姿勢は補正するが、変形まで考慮されておらず、提示したモデルは実際の臓器の形態を反映していない。したがって、臨床現場での支援システムとして機能するためには、術中の臓器の物理的な振る舞いを精密且つ高速に推定する技術が不可欠である。

この推定法の有力な手段として、非線形有限要素法(以後、非線形 FEM:Finite Element Method)がある。非線形 FEM は、臓器の力学的特性を記述する構成則を定式化し、術者の操作に対応する境界条件を与えることで、臓器の変形を構造的に解析するものである。その推定精度の良さから、非線形 FEM を導入した臓器変形シミュレーションが注目を集めている。しかし、一般に、非線形 FEM による構造解析には、膨大な時間を要する問題がある。更に、シミュレーションの精度を向上するためには、臓器モデルのデータ数を増やす必要があるが、それに伴い計算時間が指数関数的に増加する。このように、非線形 FEM による臓器変形の推定精度は良好であるにもかかわらず、その計算時間がボトルネックとなり、実際の手術支援システムに導入できないのが現状である。

これに対し、中心差分法による時間応答解析の導入(東京大)、臓器メッシュモデルのデータ数の効率的削減(中京大)など、非線形 FEM の高速化を目的とした手法が提案されている。しかし、これらの手法は、処理時間の短縮に伴い、計算精度が低下することは避けられない。また、非線形 FEM の代わりに、境界要素法や線形 FEM を用いる手法(京都大)がある。境界要素法は臓器表面の変形しか推定できず、腫瘍を含む臓器内部の変形は推定不可能である。また、線形 FEM は非線形 FEM と比べ処理速度は向上するが、微小な変形のみ適用可能であり、術中での臓器の大きな変形を推定する場合には、その推定結果に大幅な誤差が含まれる。このように、上述の従来法を手術支援システムに組み込むことは困難であり、非線形 FEM による計算精度を保ちつつ、術中臓器の様態を高速に推定できる手法が必要である。

ここで、申請者が所属する九州大学デジタルメディシン・イニシアティブ陳献教授と、同大大学院医学研究院橋爪誠教授は、臓器モデルの変形パターン(以後、変形モード)を非線形 FEM で予め推定し、複数の変形モー

ドを重ね合わせることで、新たな変形モードを生成できる可能性を示唆している(参考文献[1])。変形モードの重ね合わせは、単純な計算で実装でき、且つ、これらの図が示すように、その精度は有限要素法による結果とほぼ同程度である。しかし、変形モードの選択やその組合せの決定など、具体的な手法は述べられていない。

参考文献: [1] 陳献, 橋爪誠他 4 名の共著, "有限要素法による肝臓手術ナビゲーションに関する研究", 日本コンピュータ外科学会誌, 5 巻, 55-22(2003).

## 2. 研究の目的

そこで、臓器モデルの変形機能の記述に必要な変形モードと、その最適な組み合わせを予め求めておき、内視鏡画像列を用いて術中の形状変形を実時間で推定することで、術中の臓器の様態を反映した仮想画像を提供する次世代内視鏡手術支援システムを構築する。

これを実現するために、以下の項目について研究を行い、最後に、実験を通して開発したシステムを検証する。

(1) 力学的・幾何学的境界条件を入力信号とし、基本変形パターンの組み合わせによって、患者の肝臓メッシュモデルの任意の変形を推定するシステムの構築

(2) その変形推定システムを用いて、内視鏡画像から術中臓器モデルを推定する手法の確立

## 3. 研究の方法

研究項目ごとに、具体的な研究方法について述べる。

(1) 力学的・幾何学的境界条件を入力信号とし、基本変形モードの組み合わせによって、患者の肝臓モデルの任意の変形を推定するシステムの構築を目的として、以下の研究項目に沿って研究を実施した。ここで、この肝臓モデルは、MRI や CT で撮像した医用画像から予め作成する。

図 1 に、変形推定システムの構築およびそのシステムを使ったシミュレータの流れを示す。外力パラメータを、力の作用点の位置、大きさ、向きベクトルの 3 つの要素で構成し、並列計算機を使って、与えられた外力に対する肝臓モデルの変形を非線形 FEM でシミュレートするシステムを構築した。次に、モデルの表面上の点を作用点として用い、外力パラメータの値を変えながら、その外力に応じて

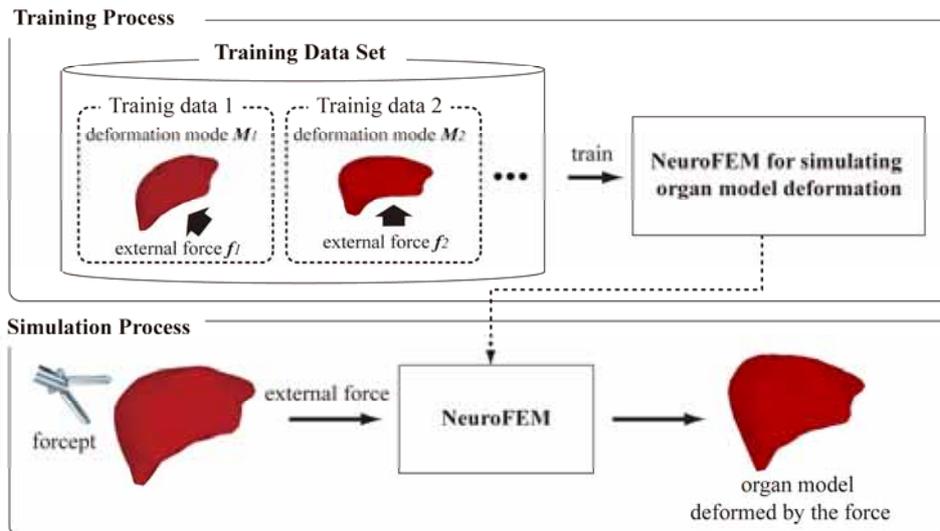


図 1 : 手法の概要

変形した肝臓モデル（以後、変形モードと呼ぶ）を多数生成し、外力とそれにより得られた変形モードの組をトレーニングデータとした。そして、多数のトレーニングデータを用いて、外力を入力して与えると、それにより得られる変形モードを出力するシステムを、ニューラルネットワークを用いて作成した。得られたニューラルネットワークを、neuroFEM と呼ぶ。

(2) 前年度開発した臓器変形推定システム（neuroFEM）をより汎用性の高いものに拡張した。実際の手術で、肝臓をはく離する際、はく離された肝臓表面上の点は固定された状態から自由に動かせる状態に変化する。この状態変化は、シミュレーション上では、初期条件である固定点が変わることに対応する。

そこで、様々な初期条件下での neuroFEM を複数構築する。そして、これらの neuroFEM をノードとし、各ノード間を確率変数を重みとして持つエッジで連結した状態遷移図を作成する。

#### 4. 研究成果

提案手法の有効性を検証するために、図 2 に示す肝臓のボリュームモデル（四面体:15,616、頂点:4,804）を使って実験を行った。このモデルは、医用画像から抽出したデータに基づいて、市販のモデル作成ソフト（CDAJ-Modeler CFD, CD-adapco JAPAN Co., LTD.）を使って作成した。一方、neuroFEM

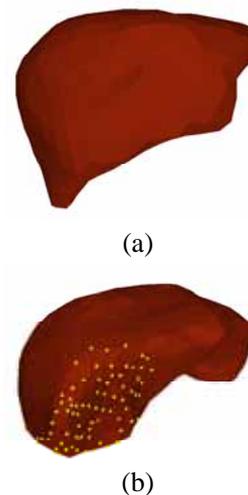


図 2 実験で使用した肝臓ボリュームモデル：

(a) モデルの原形状; (b) モデルの固定点例。

の構築および変形シミュレータは、パーソナルコンピュータ(Intel Pentium IV 2.8GHz with 1G MB memory) 上で実装した。

肝臓の生体内の位置条件を考慮して、肝臓モデルの表面上にある節点から、まず固定点を選択した。図 2(b) の黄色の節点は、選択した固定点を示す。固定点を除く表面上の 351

個の節点を、動節点として使用した。各動節点について、外力の方向ベクトルをランダムに変えながら、27 個の外力ベクトルを選択し、非線形 FEM により変形モードを求めた。したがって、トレーニングデータセットは、

9,477 個のトレーニングデータを含む．この非線形 FEM 解析は，市販の FEM 解析ソフト (Marc, MSC Software Co.) を使って実行した．図 3(b) は，2 種類の外力  $f_1, f_2$  に対

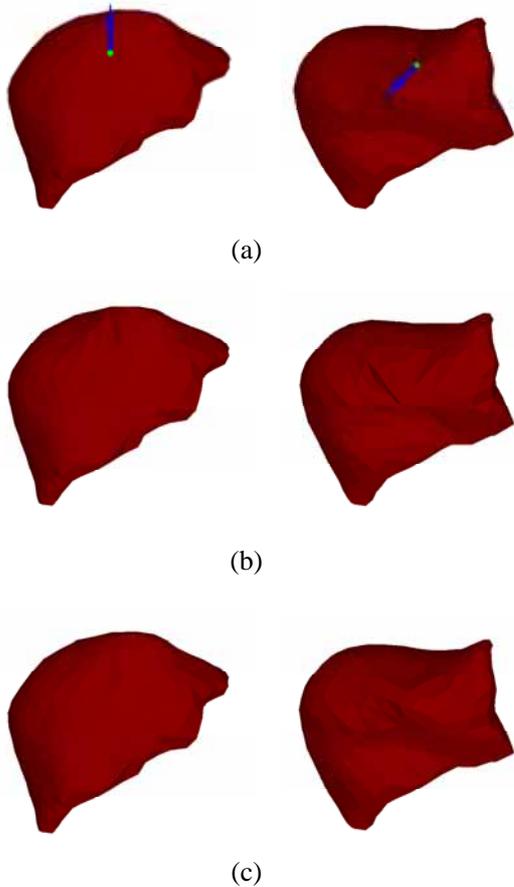


図 3 トレーニングデータを使った肝臓モデル変形：(a) neuroFEM より出力したモデル；(b)元の变形モード；(c)次元削減した变形モード．

応する变形モード  $M_1, M_2$  を示す．主成分分析を用いて，全ての变形モードの次元数は，14,412 (=  $3 \times 4,804$ ) から 24 (累積寄与率 0.99) に削減した．図 3(c) は，図 3(b) の变形モードを削減したモデルを示す．全变形モードを使った平均誤差は，0.005 であり，データ削減後のモデルは，元のモデルを十分な精度で近似しているといえる．今回，累積寄与率を 0.99 に設定しているが，この値を 1 に近い値に設定することで，近似精度をさらに向上させることも可能である．

4 層 (入力層、出力層、2 隠れ層) の階層型ニューラルネットワークを用いた．今回，入力、隠れ、出力層の各ニューロン数は，それぞれ 6, 120, 24 である．ここで，モデルは，モデル  $M$  が  $N_V$  個の節点を含む場合，そのモデル  $M$  は  $3N_V$  次元ベクトルで表す．また，任意の 2 つのモデル間の誤差を，モデルベクトルのユークリッド距離で定義する．

得られた neuroFEM を 2 つの基準で評価し

た．第 1 番目の評価基準は，トレーニングデータセットを用いた学習過程における誤差である．学習中，誤差は単調減少し，最終誤差は 0.148 となった．圧縮した变形モード，および元の变形モードそれぞれに対し，neuroFEM が出力したモデルの誤差は，それ

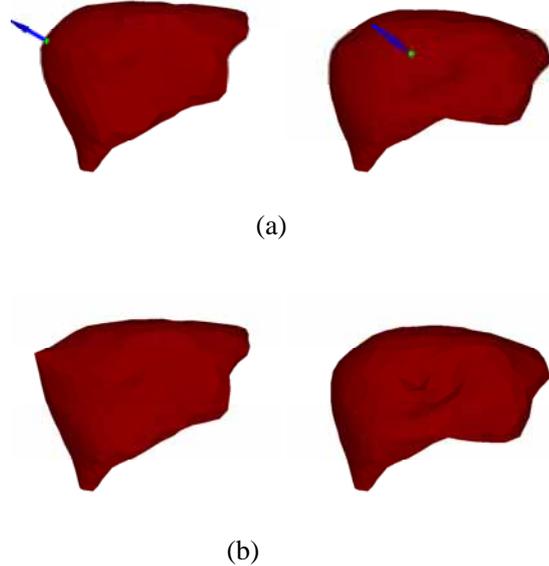


図 4 トレーニングデータに含まれない未知の外力を与えたときの (a) neuroFEM と (b) 非線形 FEM 解析によるモデル比較．

ぞれ 0.010, 0.013 であった．図 3(a) は，外力  $f_1, f_2$  を入力とし neuroFEM が推定したモデルである．

第 2 目の評価基準は，neuroFEM の汎化誤差である．具体的に，この評価では，トレーニングデータセットに含まれない 382 種類の外力に対し，提案手法と非線形 FEM でそれぞれモデルを推定し，それらモデル間の誤差を求めた．図 4 は，提案手法 (同図 (a)) および非線形 FEM (同図 (b)) で推定したモデル例を示す．neuroFEM でモデルを推定するのに要した時間は，平均 0.28 [msec] であり，非線形 FEM の約 1,000 倍の高速化を実現できた．

また，提案手法と非線形 FEM で推定したモデル間の誤差は，0.09 であった．これらの結果から，neuroFEM は，非線形 FEM との計算誤差を許容範囲内で抑えつつ，実時間 FEM 解析を実現できたといえる．

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

Ken'ichi Morooka, X. Chen, R. Kurazume, S. Uchida, K. Hara, Y. Iwashita, M. Hashizume, "Real-time Nonlinear FEM with Neural Network for Simulating Soft Organ Model Deformation", the 11th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, pp.742-749, 2008, 査読有り

諸岡健一,有限要素解析を模したニューラルネットワークによる臓器モデル変形シミュレータ,日本生体医工学会専門別研究会バイオメカニクス研究会,2007,査読無し(講演)

Ken'ichi Morooka, H. Masuda, R. Kurazume, X. Chen, S. Uchida, K. Hara, M. Hashizume, "Real Time Estimation of Deforming Organs By Neural Network for Endoscopic Surgery Simulator", The First International Symposium on Information and Computer Elements, pp.421-428, 2007, 査読有り

[その他]

ホームページ等

<http://www.dimi.kyushu-u.ac.jp/member/morooka/index.html>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

諸岡 健一 (MOROOKA KENICHI)

九州大学・デジタルメディシン・イニシアティブ・准教授

研究者番号: 80323806