

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600155

研究課題名(和文)手術支援のための人腹腔の力学モデルの構築

研究課題名(英文)Development of mechanical modeling techniques of human abdominal structure to aid surgery

研究代表者

山田 貴博 (Yamada, Takahiro)

横浜国立大学・環境情報研究院・教授

研究者番号：40240022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の目的は、手術支援の基板となる腹腔内組織全体を表現した力学モデルを構築することである。そこで、膜・網組織の力学的モデル化手法として、臓器には非圧縮超弾性体に対する圧力安定化四面体1次ソリッド要素、膜・網組織には初期張力を考慮した三角形1次膜要素を適用し、臓器と膜の相互作用を摩擦の無い接触状態として、ピンボールアルゴリズムで評価する計算手法を提案した。また、腹腔内において臓器が膜・網で被われた幾何学モデルとして、膜・網組織を閉じた曲面とし、自己釣り合いを満足する初期状態を生成するアルゴリズムを開発した。さらに、これらの数値シミュレーションで用いるための物性値の取得方法についても検討した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research project is to develop a mechanical model representing the entire abdominal structure for application to the surgical simulator and navigation system. Abdominal organs are modelled by the pressure stabilized linear tetrahedron element and membrane tissues such as mesentery are represented by the linear triangle elastic membrane element with initial tension. Contact algorithm is applied to evaluate interaction between organs and membrane tissues. For geometrical modelling, an algorithm to generate an initial state of organs and membranes, in which the self-equilibrium is satisfied and membranes are formed as closed surfaces, is developed. Further a measurement technique to obtain mechanical properties for these numerical simulations is investigated.

研究分野：計算力学

キーワード：バイオメカニクス 手術支援 力学モデル 人腹腔 生体計測

### 1. 研究開始当初の背景

解像度の高い CT, MRI などの画像診断装置や微細な制御が可能なロボットの開発とコンピュータの高速化, 小型化が相まって, コンピュータ技術を援用することにより高度な外科手術を可能とする技術(Computer Aided Surgery)が発展してきている. このような中, 申請者等の研究グループでは泌尿器系の内視鏡手術のための手術シミュレータの開発を行っている. 内視鏡手術においては, 術野と操作範囲が限定されているため, 術前の計画や訓練が重要である. 申請者等の手術シミュレータでは, 医用画像の再構成に基づき患者固有の組織の有限要素モデルを作成し, 力覚を含んだ手術の再現として事前訓練が可能である. しかしながら, このシステムにおいては, 特定の臓器近傍の局所的な有限要素モデルを用いているのみであり, 腹腔内組織全体の变形を予測するものとはなっていない.

一方, 手術前の CT, MRI 画像撮影時の体位と手術時の体位は一般に異なるため, 作用する重力の方向が変わり, その結果各臓器位置が変化する. 内視鏡手術における腹腔鏡や鉗子などを体内に挿入するための切開創(ポート)の位置は, 他の組織への影響を最小化しつつ患部にアプローチするものとして, 変形した臓器の位置を考慮して決定することが求められるが, このような事前の手術計画における問題も腹腔内組織全体の变形の予測が必要である.

このように腹腔内組織全体の变形を力学的に表現するためには, 臓器を腹壁等に固定する役割を行っている膜・網組織を含めたモデル化が必要となる. しかしながら, 医用画像から膜・網組織を再構成することは困難であり, また, その力学的物性値の評価もほとんど行われていないのが現状である.

### 2. 研究の目的

本研究課題では, 手術支援システムとして術前の計画や訓練を行う手術シミュレータと手術中の危険回避のための情報を提示する手術ナビゲーションを想定する. このようなシステムに適用するための腹腔内の臓器の膜・網組織による支持状態を考慮した腹腔内組織の有限要素解析手法を開発することが本研究課題の目的である.

### 3. 研究の方法

本研究課題では, 以下の3項目を開発すべき技術課題と設定した.

腹腔内組織変形の有限要素解析における膜・網組織の力学モデル化

CT, MRI 画像に基づく膜・網組織を含む有限要素モデルの生成

腹腔内組織の力学モデルにおける力学的物性値の同定

腹腔内組織変形の有限要素解析において膜・網組織の力学的モデル化手法の開発 に

おいて, 軟組織の力学的挙動に対しては, 生体の分野では一般的となっている非圧縮超弾性体によりモデル化するものとし, 研究代表者が開発した圧力安定化1次要素による有限要素解析手法を適用する. 膜・網組織については, 材料構成則は軟組織と同様に超弾性体とし, 曲げ剛性は無視し, 初期張力を考慮した曲面膜として, 三角形1次要素を適用する. また, 軟組織と膜・網組織の相互作用は, 接触問題として取り扱うものとする.

CT, MRI 画像に基づく膜・網組織を含む有限要素モデルの生成 において, CT, MRI 画像からは膜・網組織は直接決定することが困難である. そこで, 本研究課題では組織の位置に対する解剖学的な観点および力の伝達メカニズムについての力学的観点を考慮して有限要素モデルを生成することを考える.

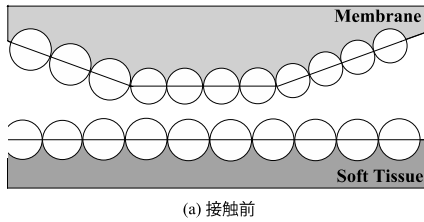
腹腔内組織の力学モデルにおける力学的物性値の同定 については, シミュレータへの適用性の観点から生体の物性値の測定法について検討を行う.

### 4. 研究成果

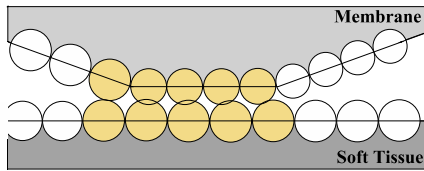
(1) 腹腔内組織変形の有限要素解析において膜・網組織の力学的モデル化手法として, 臓器には非圧縮超弾性体に対する圧力安定化四面体1次ソリッド要素, 膜・網組織には初期張力を考慮した三角形1次膜要素を適用した. このとき, 初期張力が導入された初期状態を構造全体で自己釣り合い状態が満足されたものとして設定する必要があることから, 研究代表者が以前に開発した弾性膜に対するALE有限要素法を応用し, 変形状態にある膜に対して初期張力を導入し釣り合い状態を探索する初期張力導入手法を開発した.

(2) 臓器と膜・網組織の相互作用については, 臓器と膜・網組織が固着状態ではなく, 滑りが許容される接触状態としてモデル化することが適切であると考えた. また, 接触を考慮するための数値計算手法としては, 手術シミュレータおよび手術ナビゲーションシステムを想定した場合, ロバストかつ計算負荷の小さい手法とすることが必要であると考え, 図1に示すピンボールアルゴリズムによる摩擦無し接触モデルを採用した. さらに, 数値計算によるアルゴリズムの検証過程において, 膜が臓器に貫入し, 適切な接触状態を維持できなくなる場合があることが明らかとなった. そこで, 図2のように臓器表面に外向きとなる法線ベクトルを設定することで, 適切な幾何学的状態を維持するアルゴリズムを開発した.

(3) 腹腔内組織としては, 臓器だけではなく血管もモデル化することが必要である. 臓器については上述のようにソリッド要素を使うこととなるが, 血管のような棒状の組織の一部については, はり要素によりモデル化す



(a) 接触前



(b) 接触後

図1 ピンボールによる接触モデル

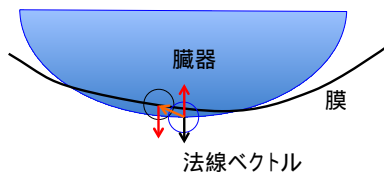


図2 法線ベクトルを用いた接触判定

ることが可能である．はり要素は少ない自由度で曲げ変形を高精度に計算できるものであり、手術シミュレータにおける実時間有限要素解析を実現するための有効な手法と考えられる．そこで本研究課題では、Nitsche法に基づく不整合メッシュの接続手法を応用し、図3のようにソリッド要素とはり要素を接続する手法を開発した．この手法では、ソリッド要素とはり要素を変位のみではなく応力の伝達も考慮することで、全体をソリッド要素でモデル化した場合と同程度の計算精度を確保した．さらに図4の計算結果から分かるように、従来の手法では困難であった生体のような柔軟な構造の大変形問題にも対応できる計算手法であることが確認できた．

(4) 以上の膜・網組織と臓器をモデル化するための有限要素解析プログラムを開発し、人体の組織を模したCADモデルを作成し、基本的な数値計算手法の妥当性を評価した．この評価の過程において、腹腔内における臓器が膜・網で被われた幾何学モデルとしては、膜・網組織が閉じた曲面となっていることを再現しなければ、膜・網組織が担う力学的機能を考慮することはできないことが明確となった．しかしながら、当初計画で想定していたCT、MRIなどの医用画像に対する画像処理でこのような膜・網組織の生成を行うことは困難である．そこで、腹腔の空間部に幾何形状とは独立な閉曲面を配置し、それを拡大

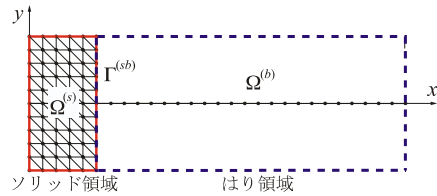


図3 ソリッド要素とはり要素の接続

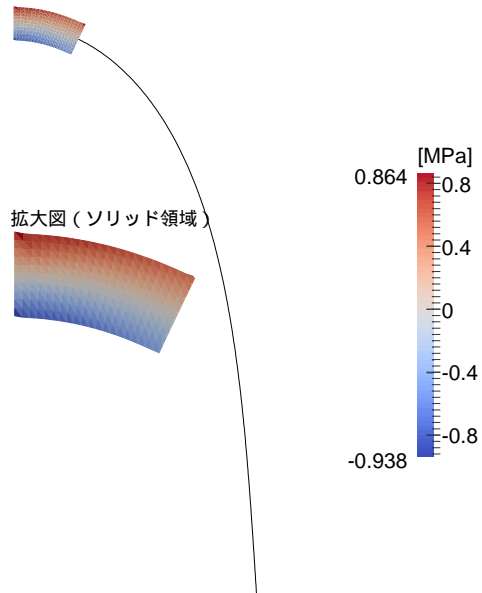


図4 ソリッド要素とはり要素の接続  
(計算例)

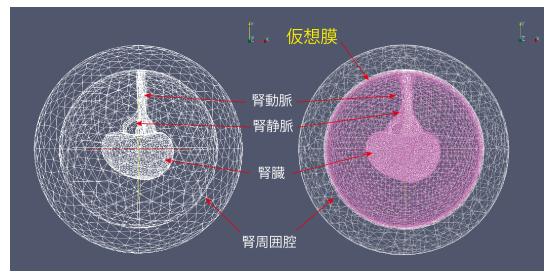


図5 閉曲面となる膜の生成

することで臓器表面を被う閉曲面として膜組織を生成するアルゴリズムを開発した．このアルゴリズムについて、図5に示す臓器を模したCADモデルを用いて検討を行い、閉曲面となる膜を生成できることが確認された．閉曲面として生成され、初期張力が導入された膜を含むモデルについて、接触を考慮した大変形解析を行い、計算手法の妥当性を確認した．図6に計算された簡易腹腔モデルの応力状態を示す．膜を考慮しない場合に比べ、変形および応力が小さい計算結果が得られ、膜が腹腔内の力の伝達に寄与していることが確認できた．

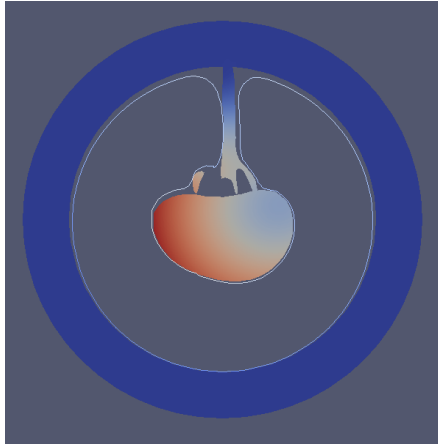


図6 膜を考慮した臓器の応力状態

(5) 数値シミュレーションに用いるための力学的物性値を取得する方法については、当初計画では間接的な物性値の推定を考えていた。それを実現するものとして、本研究課題において、変位と軸力が計測可能な棒状器具を開発し、画像観察と併用することで物性値を同定する手法について予備的な実験も行ったが、安定したデータが得られないことが分かった。そこで、本研究課題では、手術で摘出された臓器に対して適当な点加力に対する3次元計測を行うとともに、それをモデル化した有限要素解析結果と比較することで物性値を同定する手法の開発に切り替え、その基礎的な検討を行った。この手法については、本研究課題の研究期間内に実際の実験を行うことはできなかったが、複数の3次元カメラを用いた3次元計測法について、動物の臓器で基本的な検証を実施し、その有効性が確認された。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

山田貴博, 仲田光秀, Nitsche 法に基づくはり要素とソリッド要素の接続手法土木学会論文集 A2 分冊(応用力学), 査読有, Vol. 71, (2015), I\_319-I\_326.

H. Yamanaka, K. Makiyama, K. Osaka, M. Nagasaka, M. Ogata, T. Yamada and Y. Kubota, Measurement of the Physical Properties during Laparoscopic Surgery Performed on Pigs by Using Forceps with Pressure Sensors, 査読有, Advances in Urology, 2015, (2015), 1-10  
DOI:10.1155/2015/495308

綿貫達也, 山田貴博, 松井和己, 領域分割型重合メッシュ法による応力解析, 土木学会論文集 A2 分冊(応用力学), 査読有, Vol. 70, (2014), I\_255-I\_264

〔学会発表〕(計4件)

緒方正人, 圓佛泰司, 山田貴博, 手術シミュレーター/ナビゲーションへの応用を目指した軟組織計算モデル, 計算工学講演会, 2014年6月11日~2014年6月13日, 広島

Y. Embutsu, T. Yamada and K. Matsui, Finite element model of membranes for surgical simulators, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics and 4th International Symposium on Computational Mechanics, 2013年12月11日~2013年12月14日, シンガポール

M. Ogata and T. Yamada, An implementation of stabilized nearly-incompressible hyperelastic model in interactive speed, International Conference on Computational & Mathematical Biomedical Engineering, 2013年12月16日~2013年12月18日, 香港

T. Yamada, Edge-based Stabilized Tetrahedral Element for Nearly Incompressible Hyperelasticity, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics and 4th International Symposium on Computational Mechanics, 2013年12月11日~2013年12月14日, シンガポール

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 貴博 (YAMADA, Takahiro)  
横浜国立大学・大学院環境情報研究科・教授  
研究者番号: 40240022

(2) 研究分担者

松井 和己 (MATSUI, Kazumi)  
横浜国立大学・大学院環境情報研究科・准教授  
研究者番号: 00377110

緒方 正人 (OGATA, Masato)  
横浜市立大学・大学院医学研究科・客員教授  
研究者番号: 70501154

(3) 連携研究者

窪田 吉信 (KUBOTA, Yoshinobu)  
横浜市立大学・大学院医学研究科・教授  
研究者番号: 10106312