

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700507

研究課題名(和文) 触診ロボット・三次元医用画像・軟組織変形モデルによる生体内弾性分布の定量的同定法

研究課題名(英文) Identification of the Elastic Moduli of Tissues Using Reactive Force, 3D Medical Image, and Finite Element Analysis

研究代表者

星 雄陽 (Hoshi, Takeharu)

早稲田大学・理工学術院・講師

研究者番号：50535284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：人体内部の軟組織の硬さに関する情報は、軟組織の変形の数値シミュレーションにおいて必要不可欠であるが、これまで硬さ情報を定量的に同定することが困難である問題があった。本課題では、「医用ロボット」・「医用画像処理」・「計算力学」の技術を活用した『力学モデルベース弾性分布同定法』を提案し開発をおこなった。試作ロボットシステムを使用した検証実験を実験室環境にて実施し、提案手法が軟組織の弾性率値分布を定量的に同定する能力を有することを確認した。

研究成果の概要(英文)：Accurate values of the elastic modulus of human tissues are key elements in a computer-aided surgical system using a deformable organ model. In this research project we developed a quantitative identification method for the elastic modulus, where combinations of robotic force measurement, three-dimensional medical imaging, finite element analysis, and nonlinear optimization are used. Experiments using tissue phantoms and experimental systems were carried out to verify the effectiveness of the proposed method. The experimental results demonstrate that the method is able to concurrently identify the Young's moduli of the tissues.

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：コンピュータ外科学 医用ロボティクス 医用計算力学 軟組織変形シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

乳房・肝臓・脳といった臓器の軟組織について数値シミュレーションによって定量的な変形の予測をおこなう技術の活用が期待されている。切開・切除・穿刺といった外科的処置にともなう軟組織の変形に対して定量的な予測を実現することで、「根拠に基づく適切な治療計画の提示」や「手術支援ロボットによる精密な手術」等が実用化されることが見込まれている。

ここで、軟組織の変形を数値シミュレーションによって信頼性のある精度で計算するためには、変形の数値計算モデルに設定される軟組織の弾性率値(硬さ)が実際の患者における軟組織の特性を精確に再現している必要がある。

しかし、ヒト軟組織の特性は年齢・性別等に起因する多様性があることや空間的に不均質であることといった生来的な個人差を有し、また、生体内の軟組織の弾性を非侵襲的かつ定量的に測定する技術は現在までに確立されていない。このため、従来の数値シミュレーション研究で用いられてきた軟組織の弾性率値の分布は不確かな概算値にとどまってきた問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究は、生体内の軟組織における弾性分布について定量的に同定する技術を開発し、個人差による弾性分布の不確定性問題を解決することを目的とした。

従来研究を踏まえ、報告者らは力学に基づく検討の実施によって、軟組織の弾性分布を定量的に同定するためには、画像情報に加えて変形の力学モデルを活用する「力学情報」に基づく手法が不可欠であるとの認識にいたった。

そこで、本課題では、力学情報に基づいて弾性分布を同定する手法を提案するとともに、試作システムを開発し提案手法の妥当性の検証を実施することを主たる研究内容とした。

## 3. 研究の方法

本課題では、次の方法で研究を進めることとした：(1) 軟組織の弾性率値分布について同定するための『力学モデルベース弾性分布同定法』を提案、(2) 提案手法を実現する各技術要素と統合システムに関する研究開発、(3) 試作システムによって軟組織の弾性率値分布を同定する検証実験の実施、である。

報告者が提案する『力学モデルベース弾性分布同定法』は、次の過程により構成される(図1)：触診ロボットによって実人体

に触診した(故意の変形を与えた)際の生体内の変形場を画像処理によって生成し、また同時に組織変形の数値シミュレーションによって解析される変形場を生成し、両変形場の差分が最小となるように組織の弾性分布の推定値を最適化することによって、生体内の弾性分布を非侵襲かつ定量的に同定する。

この提案手法を構成する技術要素は大別して次のようになり、それぞれ本課題の研究開発の対象とした：

- I. 触診ロボットによる生体内医用画像と接触力の同時計測技術
- II. 医用画像処理に基づく観測変形場の生成技術
- III. 軟組織変形モデルを用いた有限要素シミュレーションによる解析変形場の生成技術
- IV. 弾性率値分布の推定精度を向上する数値最適化技術

本課題では、研究期間を2年間に設定し、前後半に2分割した研究計画とした。

研究期間の前半となる平成24年度は、提案する弾性分布同定の手法について、特に理論面からの検証を重点的に行った。提案手法を構成する技術要素に関して実験室環境に特化した一次試作システムを開発し、検証実験を実施した。これにより、基本構成を検証するとともに、実証環境下を想定した場合に必要なシステムの課題を抽出した。

研究期間の後半となる平成25年度は、前半で抽出した課題をもとに、より実証環境を想定して安全性や性能を向上させた二次試作システムを開発した。また、これを用いた検証実験を実施し、提案手法の機能と性能について評価をおこなった。

## 4. 研究成果

本課題では、『力学モデルベース弾性分布同定法』を構成する技術要素について、次のような研究成果を得た：

### (1) 触診ロボットの要求仕様導出

触診ロボットの機構と制御系について、非侵襲な接触力計測と画像撮像を可能にする要求仕様を理論的、ならびに、実験的に導出した。

### (2) 触診ロボット試験機の構築

導出された要求仕様に基づき、実験室環境用途の触診ロボット試験機を構築した。試験機は、対象に接触するためのマニピュレータ、接触力の大きさを測定する力センサ、超音波プローブを備えた構成とした(図2)。

### (3) 触診ロボットの安全機構の開発

ロボットによる触診の機構的安全性向上を意図して、アクチュエータとアクチュエータ先端に取り付ける超音波プローブの間に機械式伝達力遮断装置を設ける機械設計を実施し、人体への過度な圧迫を回避する安全性の高い触診ロボット機構を開発した。

### (4) 生体軟組織の力学特性の測定

一般的な生体軟組織の力学的特性を検討するために、ブタ乳房等より摘出した軟組織について、粘弾性測定器によって力学特性の測定を実施した(図3)。また、得られた測定結果より、材料非線形性についてモデリングをおこなった。

### (5) 生体軟組織ファントムの作成

がんなどのしこりを内包する軟組織の材料特性分布を模擬したファントム(模擬生体軟組織)を作成し、実験室環境における触診対象として用いた。作成したファントムはゼラチンと水を主成分とし、粘弾性測定器による測定との比較によって、生体軟組織の弾性特性に近い性質を再現した(図4)。

### (6) 有限要素解析変形シミュレータ試作1

実験室環境での検証のため、線形弾性に近似される変形を計算する有限要素変形シミュレータを構築した(図5)。有限要素モデルは四面体要素・線形弾性を使用した。これにより、弾性範囲の軟組織変形の高速計算を可能とした。

### (7) 有限要素解析変形シミュレータ試作2

軟組織特性をより精確に表現する非線形材料モデルを用いた軟組織変形シミュレータを構築した。本シミュレータにより、軟組織変形における非線形弾性特性と粘弾性特性を反映した変形シミュレーションを実現した。

### (8) マニピュレータ接触条件の評価

ブタより摘出した軟組織に対し、触診マニピュレータで静的強制変位を加え、マニピュレータの接触位置や押し込み方向等の接触条件による変形結果について検討を実施した(図6)。また、有限要素変形シミュレータによる解析を実施し、変形の様子を比較した。

### (9) 画像観測による変形場生成法の構築

3次元医用画像の特徴点と濃淡値に基づいて変形場を生成する手法について開発をおこなった。また、有限要素解析と3次元医用画像により得られる2つの変形場の比較システムを構築した(図7)。

### (10) 弾性率値の数値最適化システムの構築

有限要素解析と3次元医用画像により得られる2つの変形場の差異が最小となるよ

うに組織の推定弾性率値を最適化するシステムを構築した。ここで、2つの変形場の類似度評価として正規化相互相関、数値最適化法として焼きなまし法を用いた。

### (11) 提案手法の評価実験

開発された試作システム一式を使用した検証実験を実験室環境にて実施した。試作システムにより推定された軟組織ファントムの縦弾性率値は粘弾性測定器より算出した値におおむね一致しており、提案手法によって弾性率値が定量的に同定されることが確認された(図8)。

以上の本研究の成果より、報告者が提案する『力学モデルベース弾性分布同定法』は一定の環境下において、軟組織の弾性率値分布を定量的に同定する能力を有することを確認した。

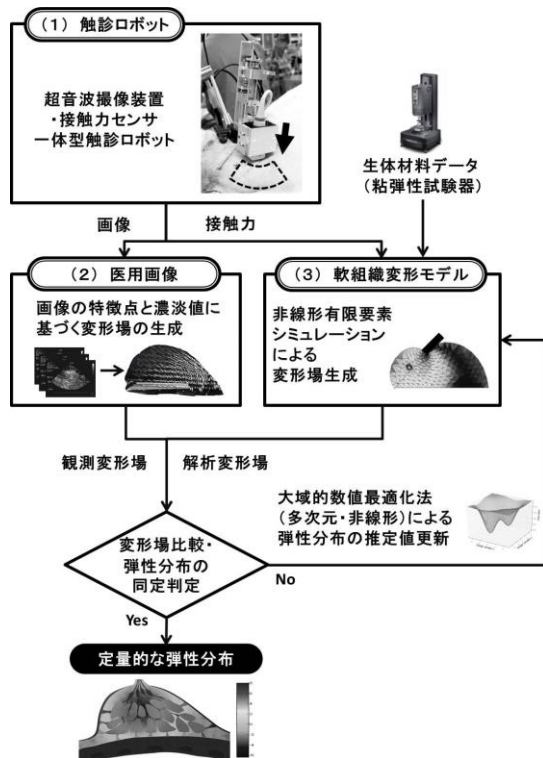


図1 力学モデルベース弾性分布同定法

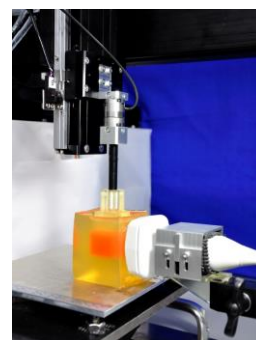


図2 触診ロボット試験機

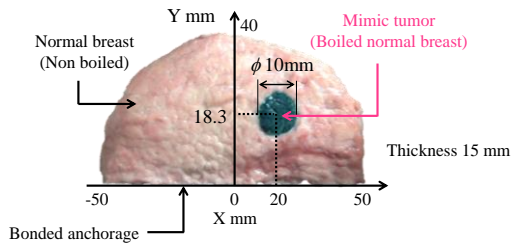


図3 生体軟組織の力学特性の検討

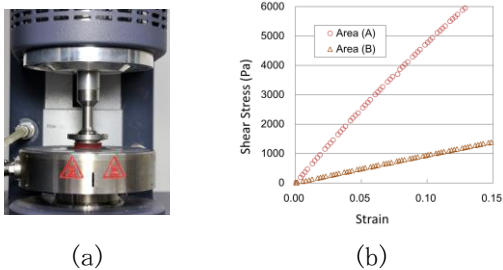


図4 生体軟組織と実験試料の力学特性測定

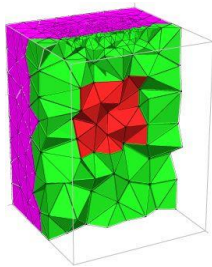


図5 変形解析のための有限要素モデル

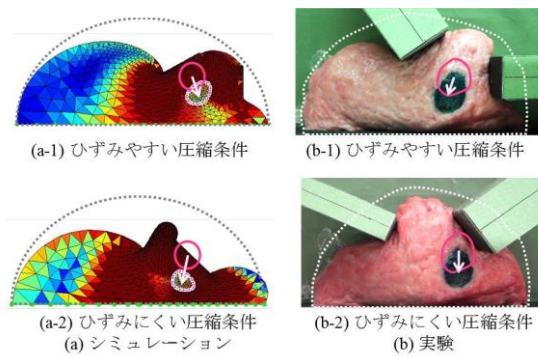


図6 変形シミュレーションと変形実験

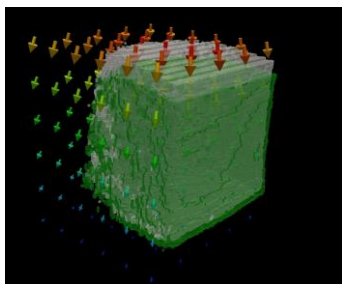


図7 画像とシミュレーションの変形場比較

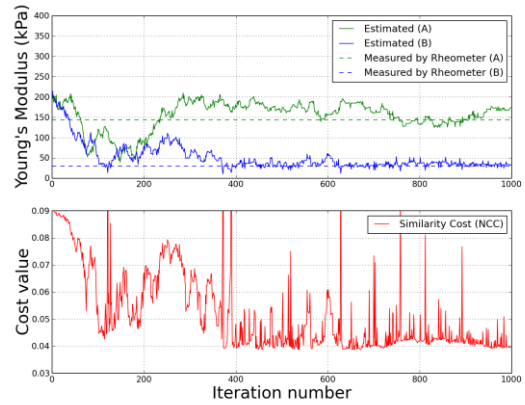


図8 提案手法による弾性率値の同定実験

今後は本課題で得られた成果を基盤とし、軟組織の材料非線形性・材料異方性・非圧縮性等のより複雑な機械特性についての検討を加える計画とする。

本研究は、従来「画像情報」ベースであった医療行為に対し、ロボット技術と計算力学技術を融合し生体の「力学情報」を活用可能にするものである。本課題の成果は、変形シミュレーションを活用した『根拠に基づく医療』の確立に貢献すると期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

- ① M. Tsukune, Y. Kobayashi, T. Hoshi, T. Miyashita, M.G. Fujie, Y. Shiraishi, T. Yambe, M. Hashizume, "Feasibility of histological discrimination based on nonlinear viscoelastic tissue parameters", Computer Assisted Radiology and Surgery, 28<sup>th</sup> International Congress and Exhibition (CARS 2014), CAR/CARS-045, 2014年6月27日(発表決定), Fukuoka Japan
- ② 星雄陽, 築根まり子, 小林洋, 宮下朋之, 藤江正克, "有限要素解析と超音波画像の比較に基づく組織弾性同定法", 第21回日本コンピュータ外科学会, 12(VIII)-42, 2012年11月2日, 徳島県徳島市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

星 雄陽 (HOSHI, Takeharu)  
早稲田大学・理工学術院・講師  
研究者番号: 50535284