

局所的な変位観測に基づく弾性体の弾性率推定

森田充樹¹⁾, 中尾恵¹⁾, 松田哲也¹⁾

1) 京都大学大学院情報学研究科

1. はじめに

腫瘍や癌病変は、一般に健常組織よりも硬くなることが知られており、生体組織の硬さを同定することは診断や治療、医療手技の訓練¹⁾において有用である。近年、臨床的な画像診断法としてエラストグラフィが実用化され、また対象物体のモデル形状を既知としたモデルベースの弾性率再構成手法²⁾も数多く提案されている。しかし、これらの手法は、波が伝播する領域や圧力を加えた近傍領域など、観測した領域に限定された弾性率再構成手法となる。

本研究では、推定対象となる弾性体に観測不可能な領域が存在する場合に着目し、観測可能な領域に対する局所的な変位観測のみから、非観測領域を含めた弾性率分布推定を可能とする手法³⁾を提案する。これによりエラストグラフィや、術野の狭い内視鏡手術の手術支援⁴⁾などへの応用が期待できる。

2. 局所変位に基づく最適化問題の定式化

本研究では、弾性率推定の対象として臓器を想定し、腫瘍などにより一部分のみが硬くなっている状況を考える。提案手法は、鉗子やその他の器具によって臓器に及ぼされる外力の作用点位置と、観測した臓器変形の局所変位を入力とし、外力ベクトルおよび弾性率分布を出力する(図1)。今回は、提案するアルゴリズムが有効であるか否かを検証するために、図1のようなプレート状のメッシュモデルを作成し、一部の頂点変位からモデル全体におけるヤング率の空間分布を求めることを試みる。

メッシュモデルの各頂点に加わる力を $\mathbf{f}$ 、変位を $\mathbf{u}$ 、剛性マトリクスを $\mathbf{K}$ とすると、微小変形時の安定状態において、線形の剛性方程式が成り立つ。推定アルゴリズムは、観測頂点の添え字を $\mathbf{o}$ とすると、観測した頂点の変位 $\mathbf{u}_o$ に対して、ヤング率 $\mathbf{E}$ と外力 $\mathbf{f}$ の更新に伴って導出される推定変位 $\mathbf{u}'_o$ が最も近づくよ

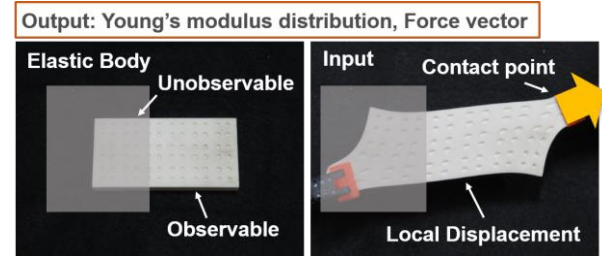


図 1. 提案手法の概要

うな、 $\mathbf{E}$ と $\mathbf{f}$ のパラメータを求める。さらに本研究では、提案アルゴリズムを拡張し推定精度を向上させるために、事前観測する弾性体変形のパターン数と、弾性率変化のスパース性に着目した。スパースとは成分の要素の大部分に0を持つという性質であり、弾性率変化に対するスパース性を導入することで、弾性率の変化が局所的であるという制約を与えることができる。事前に複数回観測した頂点変位ベクトル $\mathbf{u}_o$ を列方向に並べて

$$\mathbf{U}_o = [\mathbf{u}_{1o} \quad \mathbf{u}_{2o} \quad \cdots \quad \mathbf{u}_{\omega o}]$$

とし、スパース係数 λ を用いて目的関数を式(1)のように定義した。

$$\mathbf{E}^* = \underset{\mathbf{E}, \mathbf{f}}{\operatorname{argmin}} \{ \|\mathbf{U}_o - \mathbf{U}'_o\|_F + \lambda \|\Delta \mathbf{E}\|_1 \} \quad (1)$$

3. 評価実験

3.1 実験条件の設定

提案手法によるヤング率の空間分布の推定精度を確認する実験を行った。実験条件を図2に示す。変形状態は(a)-(c)の3パターンを観測することとし、ヤング率の真値は白色部分を1.0、赤色部分を相対値として3.3とした。また観測頂点は弾性体の上部表面の点を5点ずつ-x軸方向へ増やし、5, 10, 15, 20, 25点の5パターンで観測した。なお、最適化問題を解く手法として、CMA-ES⁵⁾ (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) を用いた。

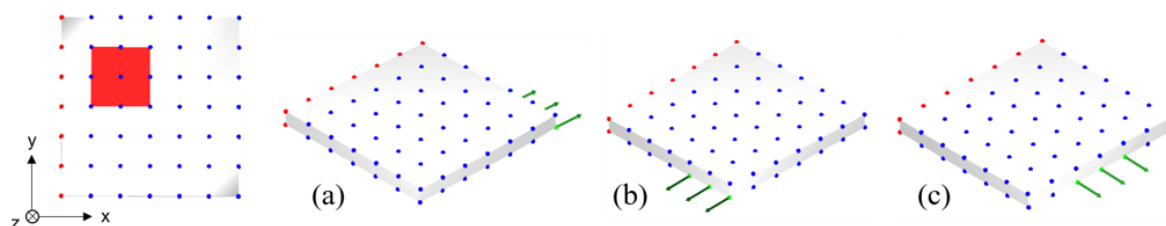


図 2. シミュレーション実験の条件設定

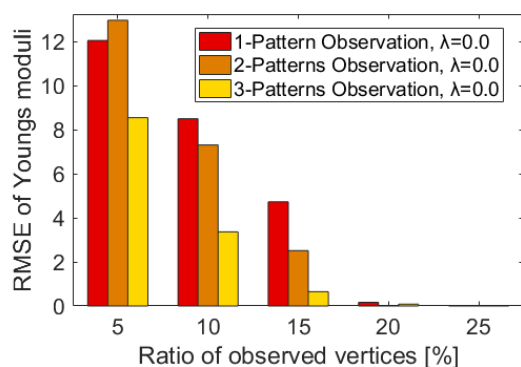


図 3. λ = 0における実験結果

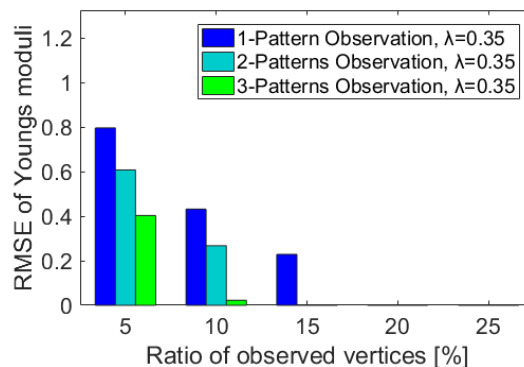


図 4. λ = 0.35における実験結果

3.2 実験結果の評価

本研究では、真値のヤング率 E と推定したヤング率 E' の RMSE により、推定結果を評価した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{(E_i - E'_i)^2\}}$$

事前観測のパターンを 1 から 3 に変更した際の、 $\lambda = 0$ と $\lambda = 0.35$ の場合の結果をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。図 3 の結果から、(1) 観測頂点数が増えるにつれて推定精度が良くなる、(2) 事前に観測する弾性体の変形パターンが多いほど推定精度が向上することが確認された。また図 3 と図 4 の結果を比較すると、スパース係数を正の値とした場合に RMSE が大きく改善されることが確認された。また、このとき全体頂点の 10% 程度の観測により高精度な推定を達成している。以上から、提案方法は部分変位観測に基づいてヤング率の空間分布を算出可能であること、スパース性の導入が推定精度の向上に有効であることが確認された。

一方、より良い観測パターンや実験条件の推定精度への影響は確認できておらず、複雑な形状モデルの場合についても検証していく必要がある。今後は、外力条件や拘束条件による推定精度への影響の検証、また実際の臓器を想定した非線形な変形や大変形の考慮など、さらなるアルゴリズムの改善を目指す。また 3D プリンタモデルを用いた実物体に対する計

測実験も検討予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究 B(課題番号: 15H03032)の助成による。

参考文献

- 1) M. Nakao, T. Kuroda, M. Komori, et al., "Transferring Bioelasticity Knowledge through Haptic Interaction", *IEEE Multimedia*, vol. 13, no. 3, pp.50-60, 2006.
- 2) O. Goksel, H. Eskandari, and S. E. Salcudean, "Mesh adaptation for improving elasticity reconstruction using the FEM inverse problem," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 32, no. 2, pp. 408–418, 2013.
- 3) M. Morita, M. Nakao, T. Matsuda, "Elastic Modulus Estimation based on Local Displacement Observation of Elastic Body", 39th Annual International Conference of the IEEE EMBC, pp. 2138-2141, Jul 2017.
- 4) 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, 2017.
- 5) N. Hansen, "The CMA evolution strategy: A tutorial," *Vu le*, vol. 102, no. 2006, pp. 1–34, 2011.