



測定反力と提示反力の誤差を最小化する 柔軟物体モデリングの 2 次元数値実験による検討

A Preliminary 2D Study of Soft Object Modeling that Minimizes
the Error Between Measured and Displaying Reaction Force

鈴木裕也¹⁾, 佐瀬一弥²⁾

Yuya SUZUKI and Kazuya SASE

1) 東北学院大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

2) 東北学院大学 工学部 機械知能工学科

概要：従来の柔軟物体モデリングは多大な手間を要する為、触覚 VR コンテンツ開発のハードルが高い。本研究では、柔軟物体モデル生成における対象物の材料パラメータ決定手法の開発を行う。内部材料特性は表面剛性の実測値をもとに、物理シミュレーションと最適化アルゴリズムによって決定することで妥当な材料特性の取得を目標とする。本研究では 2 次元柔軟物体における最適化手法の比較について述べる。実験の結果、均一の実測値を用いた場合妥当性のある材料特性を得られた。

キーワード：最適化、材料特性、ハプティクス

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) における柔軟物体に対する力覚インタラクションは実用化が大いに期待されている。その中で、現実中存在する物体の感触を VR で再現することが要求される場合がある。しかしながら、従来の材料試験に基づく材料特性同定のアプローチでは、試験片の作成や試験の実施に手間を要し、また、対象によっては侵襲的な方法は用いることができない。さらに力覚提示シミュレーションではバーチャルカップリング (VC) による提示剛性の変化や計算量削減のためのモデル簡略化など様々な誤差要因があるため、正確に材料特性が得られたとしても最終的に提示される力覚は実際の力覚に似たものになるとは限らない。

そこで本研究では、力覚センサプローブを実際のモデル化対象物体に押し付け、その測定値を最終的な力覚提示シミュレーションで再現できるような柔軟物体モデリング手法の開発を目指す。この手法では、正確な材料特性同定を目指すのではなく、最終的な力覚提示が実際の測定に近くなるような各種パラメータ (材料パラメータや VC パラメータなど) を決定することを目指す。その第一段階として、力覚の実測値とシミュレーション値の間の誤差を最小化する材料パラメータ (ヤング率) を探索する最適化手法について 2 次元数値実験による検討を行った。本稿では力覚の実測値の代わりに、材料特性が既知なモデルの数値シ

ミュレーションの結果を用い材料特性が未知の状況を仮定して正解のヤング率を最適化アルゴリズムにより探索する手法を提案し、評価のために行った 2 つの実験について報告する。

2. 従来の柔軟物体モデリング手法

ここでは従来の柔軟物体モデリングのアプローチ手法である、モデルベース手法および Data-driven 手法について、それぞれの概要および課題について述べる。

2.1 モデルベース手法

柔軟物体の変形計算のために有限要素モデルなどの力学モデルが必要であり [1]、モデルの生成には試験片を用いた材料試験および領域抽出などが必要となる。モデルが構築できれば実用性の高い手法であるが、測定誤差・モデル化誤差・離散化誤差などの蓄積、モデリングコストの高さ、膨大な計算量などの課題がある。また、均一な材料特性を持つ変形モデルにおける誤差最小化のためのパラメータ推定アプローチ [2] もあるが、内部材料特性が不均質な場合における手法は確立していない。

2.2 Data-driven 手法

物体内部の詳細なモデリングは行わず、測定データの補完により高速に提示反力を計算する手法である [3]。粘弾性や切断時反力の提示が実現されているが [4]、点接触の力覚提示に特化しており、複雑形状物体同士の面接触、6

自由度力覚提示への応用に課題がある。

3. 測定データに基づくモデル生成手法

本研究では Data-driven 手法に類似した計測を行い、測定した力覚データに基づいて有限要素モデルを構築する。力学的モデルは四面体メッシュによる形状モデルと、要素ごとの材料パラメータによって表される。また、本研究では材料パラメータは、測定によって得られた力覚データに基づき、最適化アルゴリズムによって決定する (Fig. 1)。

最適化の決定変数は各有限要素の材料特性とし、非圧縮性の静的線形弾性体モデルの場合、最適化される材料パラメータの一例としてヤング率が考えられ、決定変数は

$$e = \{E_1, E_2, \dots, E_{n-1}, E_n\} \quad (1)$$

である。ここで、 n は要素数である。力覚データ測定では、力覚センサプローブで物体表面を押し込み、その時のプローブ位置 p に対して柔軟物体からの反力 $f_{measured}$ を記録する。このような柔軟物体に対する押し込み操作を、VR コンテンツ上で用いるのと同じ物理シミュレーション上で模擬し、ヤング率群 e に対する反力 $f_{simulated}$ を計算可能とする。この場合、測定反力と提示反力の誤差を目的関数とした場合、次式のような目的関数 g が考えられる。

$$g(e) = \sum_i |f_{simulated}(t_i) - f_{measured}(t_i)|^2 \quad (2)$$

ここで、 t_i は力覚記録時のサンプル i における時刻、 $f_{simulated}(t_i)$ および $f_{measured}(t_i)$ はそれぞれの時刻 t のときの、シミュレーションで得られる反力と記録された反力を示す。目的関数 g を制約条件のもとで最適化を行うことで、記録された力覚データとシミュレーションによる力覚データ間の誤差を最小化する材料パラメータを探索する。

4. 2次元 FEM 柔軟物体変形実験 I

4.1 実験条件

2次元 FEM における材料不均質柔軟物体材料特性決定における最適化手法の妥当性の検証を目的とし、MATLAB における最適化ソルバーを使用した場合の、反力のシミュレーション値および実測値の誤差の最小化を行った。最適化に用いる実測値データは、全 59 要素のヤング率 (正解値) が 5000[Pa] のモデルを用意し比較対象とした。Fig. 2 にシミュレーション CG の例を示す。柔軟物体の頂点部に剛体を垂直に押し込むシミュレーションである。また、今回用いた柔軟物体材料特性は不均質と仮定し、全 59 要素のヤング率を決定変数 (未知) として最適化を行った。

最適化には、MATLAB Optimization Toolbox, Global Optimization Toolbox を用いた。使用した最適化ソルバーは、fmincon interior-point, 遺伝的アルゴリズム, パターン

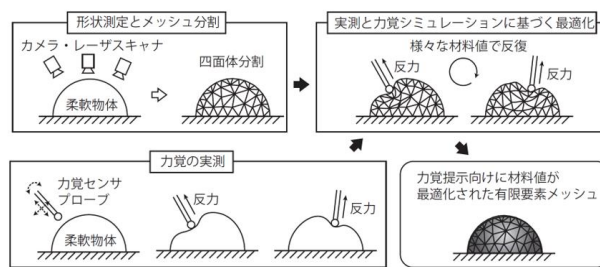


Fig. 1 測定データに基づく柔軟物体モデリングの流れ

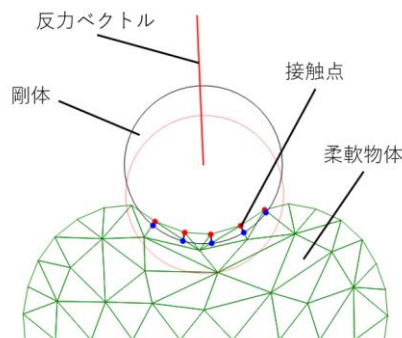


Fig. 2 柔軟物体シミュレーション例

Table 1 柔軟物体変形実験Iにおける実験条件

最適化ソルバー	開始点[Pa]	制約	
		下限[Pa]	上限[Pa]
fmincon	4000	1000	10000
fmincon	6000	1000	10000
遺伝的アルゴリズム	null	1000	10000
パターン探索	4000	1000	10000
焼きなまし法	4000	1000	10000

Table 2 実験結果

最適化ソルバー	目的関数 g (誤差)
fmincon(開始点: 4000[Pa])	0.265
fmincon(開始点: 6000[Pa])	3.37
遺伝的アルゴリズム	0.0246
パターン探索	0.0636
焼きなまし法	0.00362

探索, 焼きなまし法である。各ソルバーにおける最適化条件を Table 1 に示す。遺伝的アルゴリズムは開始点を設定する必要はなく、Table 1 に記載された条件以外はすべてデフォルトのままとした。また、fmincon は極小値に落ちる可能性があることが分かっていたため、開始点が異なる 2 パターンを行った。

4.2 結果および考察

各最適化ソルバーを用いた場合の目的関数 g の収束値を Table 2 に示す。また、最適化により決定された各要素のヤング率分布を Fig. 3 に示し、シミュレーション値および実測値における提示反力のグラフの一例を Fig. 4 に示す。最も小さい誤差を示したのは焼きなまし法であり、焼きなまし法のほかに遺伝的アルゴリズム, パターン探索は

誤差が小さくなったことがわかる。ただし、`fmincon` に関しては開始点によって極小値に落ちることがわかる。これらの結果より、今回の条件下では内部材料特性が不均質な場合でも遺伝的アルゴリズム、パターン探索、焼きなまし法を用いた場合最適化は成功したといえる。また、今回は Table 1 に示した条件以外はすべてデフォルトの設定を使用したため、その他のオプションについても検討することにより小さい誤差にすることが可能であると考えられる。

5. 2次元 FEM 柔軟物体変形実験 II

柔軟物体変形実験 I では比較する実測値データが全要素均一としたデータであるため、不均質である場合における最適化が可能であるかは不明である。

そこで本実験では、実測値データとして柔軟物体のヤング率が均一ではないデータを用意し、それを最適化に用いる実測値データとした。実測値データとして作成したモデルの各メッシュのヤング率分布を Fig. 5 に示す。外側のヤング率が 8000[Pa]、内部のヤング率が 5000[Pa]であるデータを用意した。本実験では、MATLAB Global Optimization Toolbox を用い、最適化ソルバーにはパターン探索を使用した。パターン探索における条件を、Table 3 に示す。また、Table 3 以外はデフォルトの設定を利用した。

本実験においては、最適化開始から 96 時間経過時に目的関数である誤差が約 2200 であり、約 72 時間の間に微小な減少しか見られなかった。96 時間時点での各メッシュのヤング率の分布を Fig. 6 に示し、実測値とシミュレーション値における y 方向の提示反力の比較を Fig. 7 に示す。最適化をより長時間実行することで小さい目的関数値を得ることができるとは可能性があるが、今回は最適化実験において十分な結果を得ることができなかつたと結論づけた。

6. むすび

本研究では、従来の柔軟物体モデリングにおける材料特性同定を省略するための最適化アルゴリズムを用いた測定反力および提示反力間の誤差を最小化する手法について述べた。

柔軟物体変形実験 I において、MATLAB の 4 種類の最適化ソルバーを用いた誤差最小化を行った。結果として本条件下では、`fmincon` を除く最適化ソルバーでは誤差は十分小さくなり、最適化は成功したといえる。また、柔軟物体変形実験 II では、実測値データとして各要素のヤング率が異なるモデルを用い、パターン探索による最適化を行ったが、十分な結果が得られなかった。

今後は各最適化ソルバーの設定や制約条件の再検討および決定変数の次元削減などを検討する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18K13731, JP18H04102 の助成を受けた。

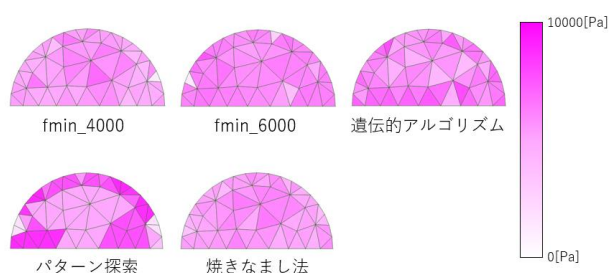


Fig. 3 各最適化ソルバーにおけるヤング率分布

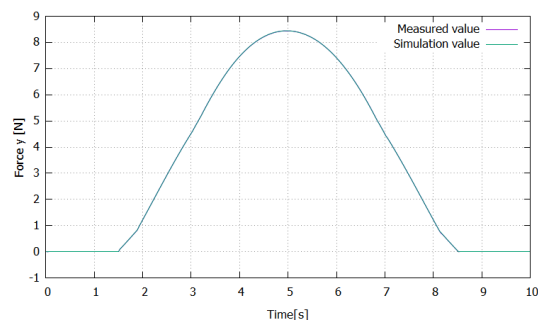


Fig. 4 柔軟物体変形試験 I での焼きなまし法における実測値とシミュレーション値の Y 方向提示反力

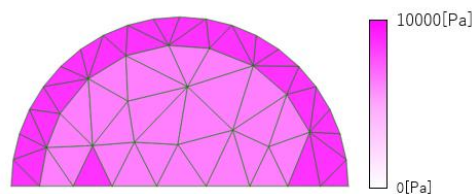


Fig. 5 材料不均質モデル

Table 3 柔軟物体変形実験 II における実験条件

最適化ソルバー	開始点 [Pa]	制約	
		下限 [Pa]	上限 [Pa]
パターン探索	6000	3000	10000

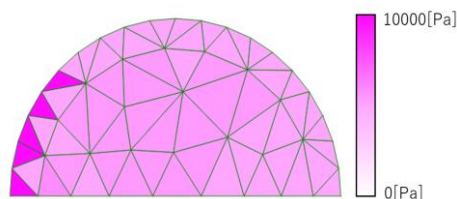


Fig. 6 柔軟物体変形実験 II における最適化 96 時間経過後のヤング率分布

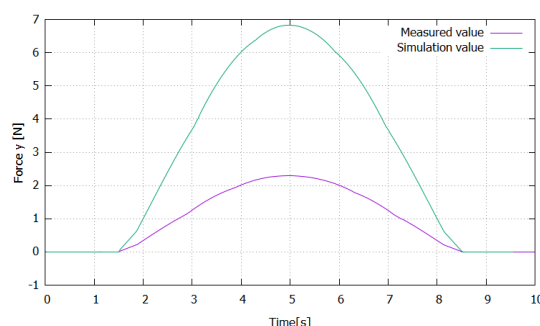


Fig. 7 柔軟物体変形試験 I でのパターン探索における実測値とシミュレーション値の Y 方向提示反力の比較

参考文献

- [1] K. Miller, A. Wittek, and G. Joldes, “Biomechanics of the Brain for Computer-integrated Surgery,” *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, vol. 12, pp. 25-36, 2010.
- [2] B. Frank, R. Schmedding, C. Stachniss, M. Teschner and W. Burgard, “Learning the Elasticity Parameters of Deformable Objects with a Manipulation Robot,” *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010)*, 2010.
- [3] R. Höver, G. Kósa, G. Székely, and M. Harders, “Data-Driven Haptic Rendering—From Viscous Fluids to Viscoelastic Solids,” *IEEE Trans. Haptics*, vol. 2, no. 1, pp. 15-27, 2009.
- [4] S. Yim, S. Jeon, and S. Choi, “Data-Driven Haptic Modeling and Rendering of Viscoelastic and Frictional Responses of Deformable Objects,” *IEEE Trans. Haptics*, vol. 9, no. 4, pp. 548-559, 2016.