

柔軟物の内部変形計測による非一様 FE モデルの力学パラメータ同定方法の検証

遠藤 和美, 張 鵬林, 平井 慎一 (立命館大学)

徳本 真一 (和歌山県工業技術センター)

Validation of nonuniform physical parameters identification through measurement of inner deformation

Kazumi Endo, Zhang Peng-lin and Shinichi Hirai Ritsumeikan Univ.

Shinichi Tokumoto Industrial Technology Center of Wakayama Prefecture

Abstract: This paper describes a method to identify nonuniform physical parameters through measurement of inner deformation. We identify physical parameters by deforming an unknown parameter object using a known parameter object. We evaluate our method in simulation and experimentally.

1 はじめに

近年, 手術シミュレーション分野において, 柔軟物のモデリングが必要とされている. 生体組織は変形特性が非一様で, 力学パラメータの値が場所により異なる. このような, 非一様な変形特性を持つ物体の力学パラメータを同定する方法は確立されていない. 筆者らは, 超音波装置や MRI, CT による柔軟物の内部変形の計測結果から力学パラメータを同定する手法を提案した [1]. 本論文では, この手法を用いてシミュレーションと実験において力学パラメータ同定を行うことによって提案した手法の有効性を検証する.

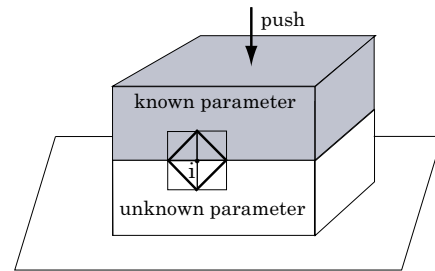


Fig.1 The method of physical parameters identification

2 力学パラメータ同定方法

超音波装置や CT, MRI による内部変形の計測結果から FE モデルの力学パラメータを同定する方法を述べる. あらかじめ圧縮同定試験によって力学パラメータを求めておいた物体を用いて, 力学パラメータが未知の物体を変形させる. ここで, 力学パラメータとはヤング率とポアソン比である. Fig.1 は, 力学パラメータが既知である部分 (色を塗った部分) と, 未知である部分 (色を塗っていない部分) が接触している様子を示している. FE モデルでは物体を四面体要素の集合として表現している. 節点 i 回りの四面体要素 (Fig.1 の太枠で囲った領域) について考えると, 節点 i における力のつりあいは,

$$\sum_{T \in U_i} f_i^T = - \sum_{T \in K_i} f_i^T \quad (1)$$

となる. ここで, K_i は力学パラメータが既知である四面体要素の集合, U_i は力学パラメータが未知である四面体要素の集合である. また, f_i^T は四面体要素 T の変形により節点 i に生じる弾性力である. 式 (1) に内部変形計測結果を代入し, 整理することにより力学パラメータが未知である物体の各四面体要素のヤング率とポアソン比に関する一次式となる.

3 シミュレーションによる検証

前章で述べた力学パラメータ同定方法を用いて, シミュレーションによる力学パラメータの同定を行う. シミュレーションでは, 物体を Fig.2 に示すようにメッシュを分割し, 四面体要素のヤング率 E とポアソン比 ν を設定す

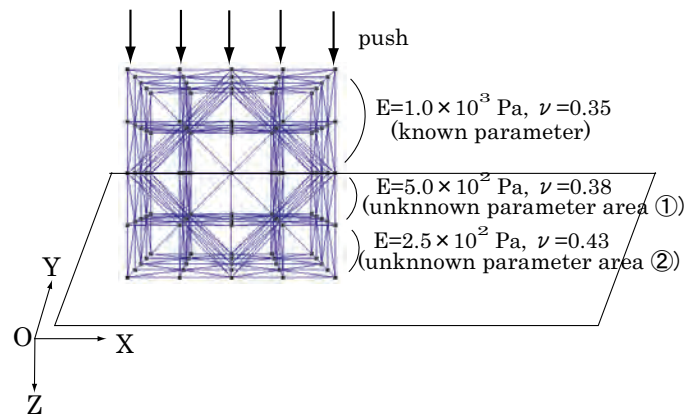


Fig.2 The size of the object in simulation

る. 物体の大きさは $0.04 \times 0.04 \times 0.04$ m, 縦, 横, 奥行き方向のエッジ数はそれぞれ 4 個, 各エッジの幅は 0.01 m である. 物体を床から離れないように拘束し, 物体上面全体を押し. 物体上面の節点の変位量は, X 方向に 0.00 m, Y 方向に 0.00 m, Z 方向に 0.01 m である. 初期状態から変形状態の変位データを取得する. 物体の上半分を力学パラメータが既知である一様物体, 下半分を力学パラメータが未知である非一様物体と仮定して, 未知パラメータを同定する. 力学パラメータが同じ四面体要素の領域ごとに平均値を算出した結果を Table 1 に示す. 誤差は非常に小さく, 本手法の計算アルゴリズムが有効であることが確認できる.

Table 1 The result of physical parameters identification in simulation

	true value		result		error [%]
	E [Pa]	ν	E [Pa]	ν	
area	2.5×10^2	0.43	2.51×10^2	0.43	1.37×10^{-2}
area	5.0×10^2	0.38	5.18×10^2	0.32	

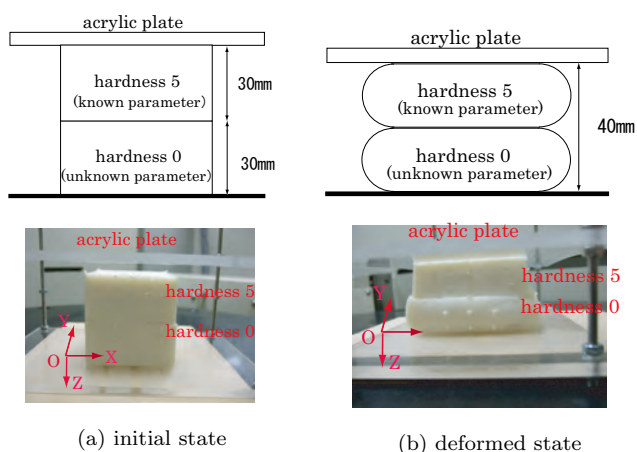


Fig.3 Soft objects in initial and deformed states

4 CT による実験検証

今回は、力学パラメータが一樣な物体を使用して実験を行う。CT を用いて柔軟物の内部変形を計測するために、柔軟物を作成する。パラメータが既知な物体は(株)エクシールコーポレーション製の人肌ゲル硬度 5 (腕程度のやわらかさ)、パラメータが未知な物体は硬度 0 (腹部程度のやわらかさ)を用いて作成した。人肌ゲルはウレタン系オールブレンドを原液とし、イソシアネートの硬化剤を混ぜることによって固めることができる。物体の内部変形を計測するために、人肌ゲルを流し込む型の内部に等間隔に十字方向に糸を張り、その交差点にマーカーを配置している。マーカーは M1 の丸座金 (外径 2.8mm, 長さ 0.3mm) で、人肌ゲルが硬化した後に糸を引き抜くことで、マーカーを物体内部に設定することができる。両物体のサイズは $60 \times 60 \times 30\text{mm}$ で、マーカーは 10mm 間隔に合計 50 個を配置している。本実験では内部変形を計測するためにマーカーを使用した。生体を対象とした場合は血管や組織などの特徴点をもとに生体内部の変形を計測する。Fig.3 に示すように 2 つの物体を重ねアクリル平板を用いて物体全面を高さ 40mm となるまで押す。初期状態と変形状態の様子を CT で撮影する。CT の画像分解能は、X, Y 方向が 0.29mm, Z 方向が 0.5mm である。得られた断面画像を 2 値化し、両物体の内部変形を計測する。

本実験に用いる柔軟物の力学パラメータを計測する。人肌ゲルの硬度 5 と硬度 0 から試験片を製作し、圧縮同定試験機を用いてヤング率を算出する。今回用いた圧縮試験機は、横歪が計測することができないためポアソン比を同定することができない。そこで、初期状態と変形状態の CT 画

Table 2 Physical parameters of soft objects

	E [Pa]	ν
hardness 5	2.22×10^5	0.44
hardness 0	1.25×10^5	0.33

Table 3 The result of physical parameters identification in experiment

	E [Pa]	ν
physical parameters (hardness 0)	1.25×10^5	0.33
result	1.39×10^5	0.28

像から計測した横歪と縦歪の値からポアソン比を算出する。本実験に用いる柔軟物の力学パラメータを Table 2 に示す。

Table 2 に示す力学パラメータの値から力学パラメータの同定を行う。人肌ゲル硬度 5 の物体の力学パラメータが既知、硬度 0 の物体の力学パラメータが未知であると仮定して、硬度 0 の未知パラメータを同定した結果を Table 3 に示す。ヤング率は精度よく同定できているが、ポアソン比は 0.05 の違いがある。シミュレーションで同程度の違いがあるが誤差は非常に小さいため、これは許容できると考える。

今回は力学パラメータが一樣な物体を使用して実験を行っているが、非一樣物体を使用して実験を行った場合、あるいは生体組織の力学パラメータ同定を行った場合、同定精度は今回の実験結果より悪くなると考えられる。力学パラメータが既知である物体は未知物体に対してどれくらいのかたさが最適であるのか、メッシュの分割の違いによって同定精度にどれくらい影響するのかも検証する必要がある。

5 おわりに

本論文では、非一樣 FE モデルの力学パラメータ同定法をシミュレーションと実験により検証した。シミュレーションでは、非一樣物体の力学パラメータを同定することができ、本手法の計算アルゴリズムが有効であることを示した。実験では、CT を用いた柔軟物の内部変形計測結果から力学パラメータを同定することが可能であることを確認した。今後は、人肌ゲルで非一樣物体を製作し、実験検証する。また、生体組織を用いて本手法を検証する予定である。

参考文献

- [1] 遠藤 和美, 村松 潤治, 平井 慎一, "柔軟物の内部変形計測による FE モデルの力学パラメータ同定", ロボティクス・メカトロニクス'07 講演会, 2007.
- [2] 徳本 真一, 平井 慎一, "CT スキャナを用いたパラメータ同定のための柔軟物の内部変形計測" ロボティクス・メカトロニクス'07 講演会, 2007.