

レオロジー物体のシミュレーションと力学パラメータの同定

Simulation and Identification of Rheological Object

浪間 一希, 遠藤 和美, 張 鵬林, 平井慎一 (立命館大学 ロボティクス学科 平井研究室)

田中弘美 (立命館大学 知能情報学科 田中研究室)

Hirai Lab., Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

Tanaka Lab., Dept. Computer Science, Ritsumeikan Univ.

連絡先: 平井慎一 立命館大学ロボティクス学科 滋賀県草津市野路東1-1-1

Contact: Shinichi Hirai, Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ,

Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

1 はじめに

現在, 食品工学における食品素材や生体組織などの様々な特性を有する物体のモデリングが必要とされている. しかし食品や生体組織などのレオロジー的変形特性を有する物体のモデリング手法は確立していない. 塑性変形が残ることや, 物体が複数の力学パラメータをもつ複雑な構造をしているためである. これらのシミュレーションには, 適切なモデルの設定と力学パラメータの同定が必要である. 本稿では, レオロジー物体のモデリングに用いる三要素モデルの手法と変形計算手法を示す. また, 非一様な弾性物体の力学パラメータ同定方法を提案する.

2 三要素モデル

Fig.1-(a) に示す初期形状の物体に外力を印加したとき, Fig.1-(b) に示すように変形すると仮定する. 外力を開放したときの形状は粘弾性モデルの場合, Fig.1-(c) に示すように初期形状と一致する. 塑性モデルの場合, Fig.1-(d) に示すように残留変形がなく, 変形したときのそのままの形状が維持される. 三要素モデルの場合, Fig.1-(e) に示すような残留変形を残す. 食品や生体組織などのレオロジー的性質を有する物体は外力を印加したときに, 若干の残留変形を残すものが多い. これらをモデリングするときには, 残留変形に着目する必要があるため, 三要素モデルが適しているといえる.

三要素モデルは Fig.2 のように, 粘弾性フォークト部に直列にダンパーを配置したものである. 弾性要素 k と粘性要素 b が戻り変形を表す. そして粘性要素 b' が残留変形を表す. ゆえに, 三要素モデルの変形特性は k, b, b' で決まる. 三要素モデル全体の変位を d , フォークト部の変位を d^{voigt} , ダンパー部の変位を d^{vis} , モデルの発生力を f とすると, このモデルの挙動は,

$$d = d^{\text{voigt}} + d^{\text{vis}}, \quad (1)$$

$$f = kd^{\text{voigt}} + bd^{\text{voigt}}, \quad (2)$$

$$f = b'd^{\text{vis}} \quad (3)$$

で表すことができる. 二次元では三角形要素, 三次元では四面体要素を組み合わせて表す. 各頂点に質点, 稜線にモデル要素を配ることにより, 変形を動的に表すことがで

きる. 順次番号を, i 番目の質点を P_i とし, k 番目のモデル要素を E_k として表す. モデル要素 E_k は両端の質点番号を属性として含み, その一方を始点, 他方を終点とよぶ.

これより三要素モデルで構成された物体の運動方程式を導く. 質点 P_i を始点, P_j を終点とした質点がモデル要素 E_k で接続されているとする. 質点 P_i の変位を x_i , 速度を v_i , 質量を m_i で表し, モデル要素の長さを l_k , フォークト部の長さを d_k とする. このときダンパー部の長さは $l_k - d_k$ で表すことができる. また, フォークト部の自然長を L_k とする. このモデル要素の状態変数は x_i, v_i, x_j, v_j, d_k である. ここで, R_i を質点 P_i を始点とする三要素モデルの集合, S_i を P_i を終点とする三要素モデルの集合とし, F_i^{ext} を質点 P_i に作用する外力とする. 三要素モデルの運動方程式は,

$$m_i \dot{v}_i = \sum_{k \in R_i} f_k e_k - \sum_{k \in S_i} f_k e_k + F_i^{\text{ext}}, \quad (4)$$

$$\dot{d}_k = \frac{-k(d_k - L_k) + b'l_k}{b + b'} \quad (5)$$

と表すことができる. 運動方程式の解を数値的に計算することにより, 三要素モデルの動的変形を求めることができる.

3 スライダー付三要素モデル

三要素モデルのフォークト部と直列に繋いだダンパー部は, 力が作用している限り変形し続ける. このダンパー部の変形を防ぐため, スライダー付三要素モデルを導入する.

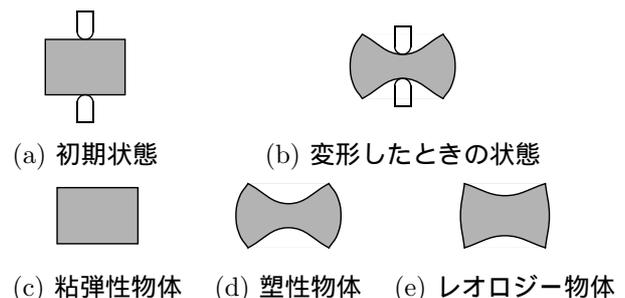


Fig. 1: 粘弾性物体, 塑性物体, レオロジー物体

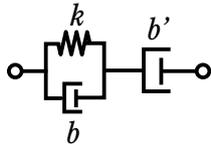


Fig. 2: 三要素モデル

スライダーは、指定された条件を満たすときにはダンパーの変形を許す．また、条件が破られたときにダンパーの変形を禁止する．スライダーを導入するにあたって、ダンパーの変形を表す式として、式 (3) の代わりに次式を用いる．

$$b'd^{\text{vis}} = \begin{cases} f & \text{条件が満たされているとき} \\ 0 & \text{条件が破れているとき} \end{cases} \quad (6)$$

三要素モデル全体の長さを l 、フォークト部の長さを l^{voigt} とする．このとき、以下の条件を課す．

$$0 \leq l^{\text{voigt}} \leq l. \quad (7)$$

これを一般化すると、

$$a_{\min}l \leq l^{\text{voigt}} \leq a_{\max}l \quad (8)$$

となる．ただし、 $0 \leq a_{\min} \leq a_{\max} \leq 1$ である．ここで a_{\min} と a_{\max} はフォークト部の長さ三要素の長さの比 l^{voigt}/l の最小および最大値を表す．三要素モデルの初期長さを l_{init} 、フォークト部の初期長さを $l_{\text{init}}^{\text{ela}}$ とすると上式の条件は以下のように表すことができる．

$$a_{\min}(l_{\text{init}} + d) \leq l_{\text{init}}^{\text{voigt}} + d^{\text{voigt}} \leq a_{\max}(l_{\text{init}} + d) \quad (9)$$

4 変形シミュレーション

レオロジー物体の変形シミュレーションを行った例を示す．Fig.3 は、二次元の計算例である．テーブル上のレオロジー物体に、剛体の棒を押し下げて変形させ、その後に棒を引き上げる．三要素モデルのパラメータは $k = 1.2$ 、 $b = 1.5$ 、and $b' = 15$ であり、物体の質量 30 は、各質点に等分に配分されている．図に示すように、戻り変形と残留変形が生じており、レオロジー的な性質を表現できていることがわかる．三要素モデルのパラメータを変えることにより、弾性に近い変形特性から塑性に近い変形特性まで表現することができる．Fig.4 は、ピザ生地の変形シミュレーションを表す．テーブル上に置かれた生地を、回転するローラにより成形する．実際の成形過程で確認できる、生地の後方が膨らむという現象が、シミュレーションにより表されていることがわかる．このように、仮想レオロジー物体を適用することにより、生地や粘土の変形過程、食品の嚙下過程などを、動的にシミュレーションすることができる．

5 MRI による内部変形の計測

実際の変形過程をシミュレーションするためには、モデルに含まれる力学パラメータを同定する必要がある．同定

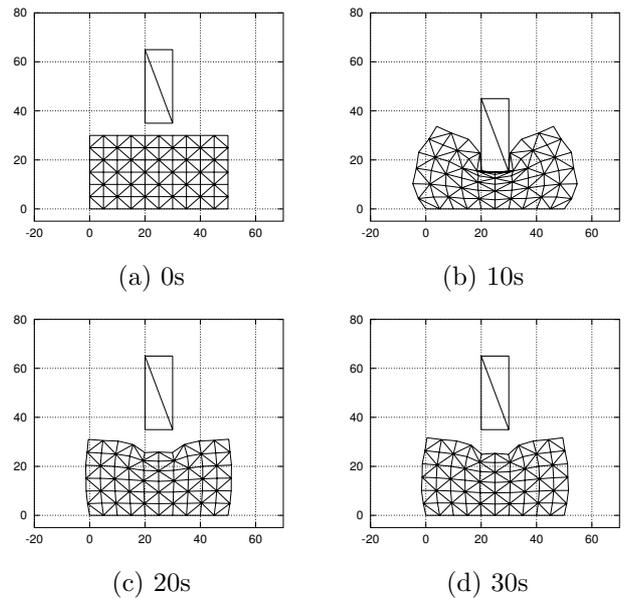
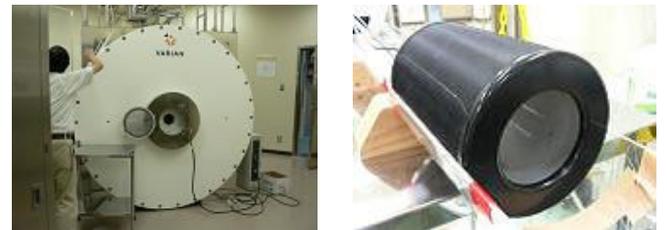


Fig. 3: 二次元のレオロジー変形の計算例



(a) 全体像

(b) RF コイル

Fig. 5: MRI 装置

を支えるセンシングは、物体の表面形状と表面の分布圧力のセンシングであり、レオロジー物体内部の挙動は未知のまま残されている．結果として、モデル同定の評価が不十分であり、さらには実際のレオロジー物体に表れるであろう変形の非均一性や非線形性、異方性に対応できない可能性が高い．近年、超音波画像装置や CT, MRI に代表される三次元イメージング技術が発展している．これらの技術を用いることにより、柔軟物の内部挙動を計測し、計測結果をベースにするモデリングが可能になると期待できる．

MRI では、物体の断面を複数枚撮影し、得られた二次元画像を構成して三次元映像を得る．この断面画像をスライス画像、スライス画像間の間隔をスライス間隔と呼ぶ．MRI の長所は、物体内部を任意の切断面で撮影できること、物体内部の三次元的な変形を得られることである．しかし、撮影時間が長いので、物体の動的変化を得ることは困難である．本実験では、滋賀医科大学に設置されている MRI 装置を使用した．撮影においては、対象物を RF コイル内に設置する．MRI 装置の外見を Fig.5-(a) に、RF コイルの外見を Fig.5-(b) に示す．

今回は、非均一な性質を持つ下腿を撮影した．下腿を圧迫していない状態 (初期状態) および下腿の下にプラスチックの箱を置き圧迫した状態 (変形状態) を撮影した．撮影条件は、スライス間隔 2mm, FOV20 × 20cm, 積算 2 回とし、それぞれ 76 枚のスライス画像を得た．画像サイズは

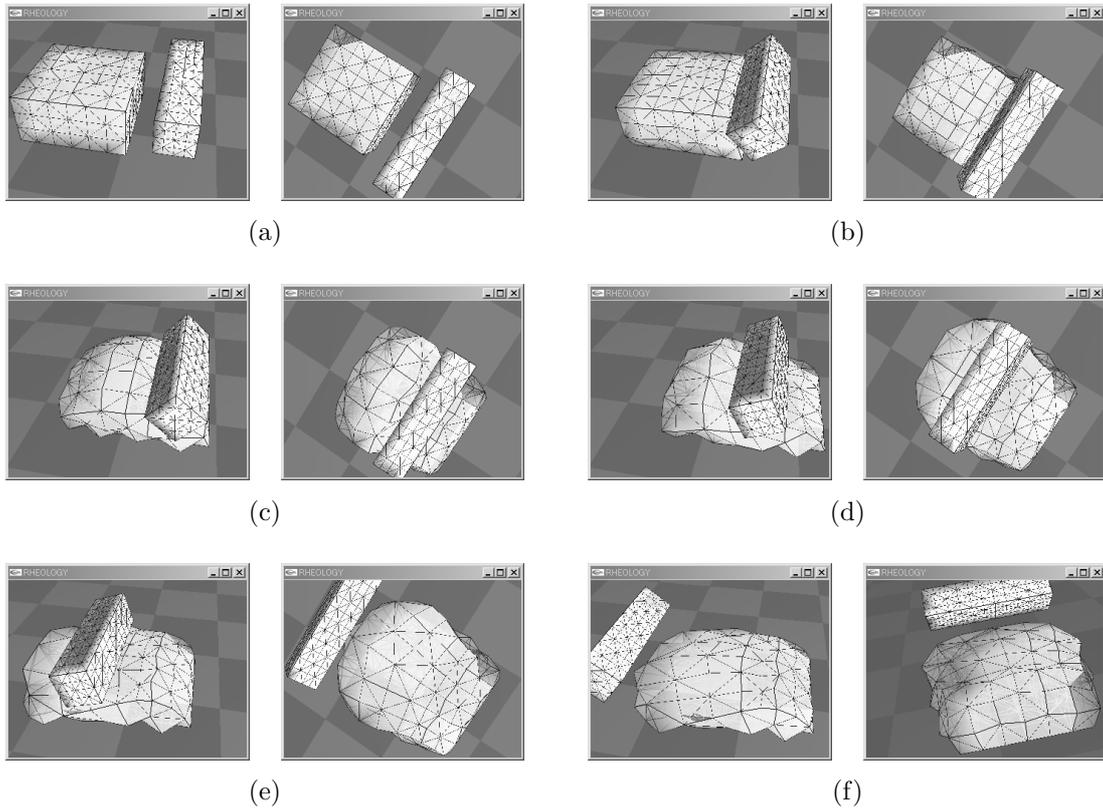
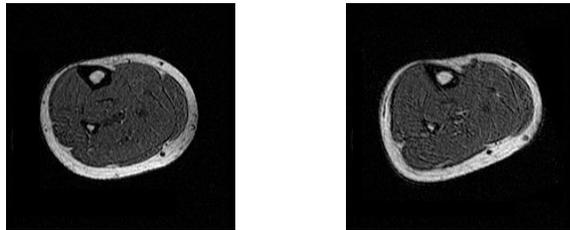


Fig. 4: ピザ生地の成形シミュレーション



(a) 初期状態 (b) 変形後の状態

Fig. 6: MRI による下腿の内部撮影

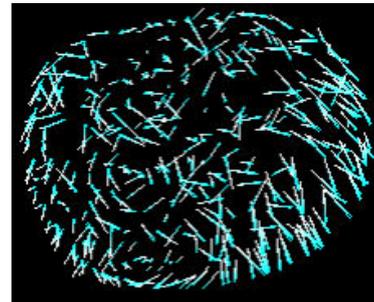


Fig. 7: 下腿の内部変形計測結果

256 × 256pixels, 画素サイズは 0.8mm/pixel である．変形状態では，プラスチックの箱を置くために下腿の位置をずらしたため，レジストレーション (画像の位置合わせ) を行う必要がある．剛体部分である頸骨 (下腿の太い方の骨) の周りから同一の点である 3 点を，それぞれ初期状態と変形状態の画像から選択してレジストレーションを行った．レジストレーション後の下腿の初期状態を Fig.6-(a) に，変形状態を図 6-(b) に示す．これらを画像解析し，変形計測を行った結果を Fig.7 に示す．

6 力学パラメータの同定

前章の MRI による内部変形計測結果をもとに，物体の力学パラメータを同定する．MR 空間内には磁性体材料を持ち込むことができないため，ロードセル等の力を計測する装置を用いることができない．ゆえに，本章では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

を提案する．Fig.8 に示すように，力学パラメータが既知の物体を用い，力学パラメータが未知の物体を変形させて，内部変形を計測する．この方法は力を計測する必要がないため，MR 空間内でも力学パラメータを同定することができる．

この力学パラメータ同定方法を用いて弾性物体のシミュレーションによる検証を行った．物体を Fig.9 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 を設定する．物体の大きさは $0.04 \times 0.04 \times 0.04\text{m}$ ，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 0.01m である．物体を床から離れないように拘束し，物体上面全体を押す．物体上面の節点の変位量は， X 方向に 0.00m ， Y 方向に 0.00m ， Z 方向に 0.01m 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

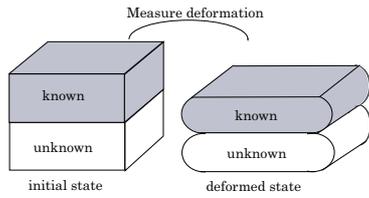


Fig. 8: 力学パラメータの同定方法

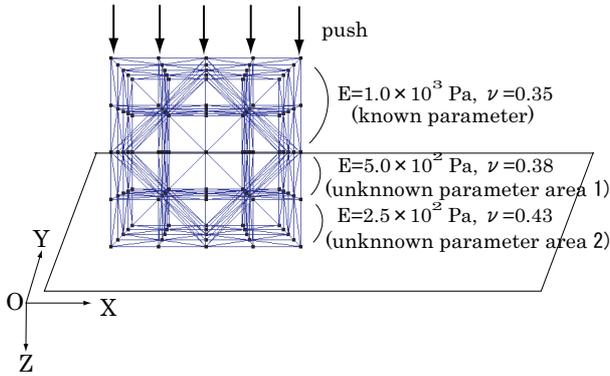


Fig. 9: シミュレーション上での物体の力学パラメータ

Table 1: シミュレーションによる力学パラメータの同定

	true value		result		error [%]
	E [Pa]	ν	E [Pa]	ν	
area 1	2.5×10^2	0.43	2.51×10^2	0.43	1.37×10^{-2}
area 2	5.0×10^2	0.38	5.18×10^2	0.32	

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。

7 おわりに

本稿では、レオロジー物体のモデリング手法と変形計算手法を示した。この手法は、すでに三次元に拡張しており、生地成形過程や食品の飲み込み過程のシミュレーションに適用している。また、モデルの格子を細かくすると、変形を計算する時間が増加する。そこで、ユーザが回路を設計できる LSI である FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いて、変形の高速計算を実現している。

現在のレオロジー物体モデルは、線形の弾性要素と粘性要素から構成されている。ゆえに、粘性要素を含めたモデルの同定方法を新たに提案する必要がある。また、非線形要素の導入はオプションであるが、力学パラメータの同定が困難になることが予想される。むしろ、線形で異方性を有する変形モデルや非均一性を表す変形モデルを導入し、MRI による内部計測を用いて力学パラメータの同定を進

める予定である。

参考文献

- [1] 遠藤 和美, 張 鵬林, 平井 慎一, 徳本 真一, 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, 計測自動制御学会, 2007.
- [2] 活田 崇至, 村松 潤治, 早見 信一郎, 森川 茂廣, 平井 慎一, 超音波画像と MRI を用いた内部計測による柔軟物の FE モデルの検証, ロボティクスシンポジウム予稿集, 2006.
- [3] 友國誠至, 平井慎一, FPGA による仮想レオロジー物体のリアルタイム変形シミュレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.3, pp.443-452, 2005.
- [4] 友國誠至, 平井慎一, FPGA による仮想レオロジー物体のリアルタイム変形計算, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, pp.979-980, 2004.
- [5] Ryo Nogami, Hiroshi Noborio, Seiji Tomokuni, and Shinichi Hirai, *A Comparative Study of Rheology MSD Models whose Structures are Lattice and Truss*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3809-3616, Sendai, September, 2004.
- [6] Naoki Ueda, Shinichi Hirai, and Hiromi T.Tanaka, *Extracting Rheological Properties of Deformable Objects with Haptic Vision*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3902-3907, New Orleans, April, 2004.
- [7] Ryo Nogami, Fumiaki Ujibe, Hiroki Fujii and Hiroshi Noborio, *Precise Deformation of Rheologic Object under MSD Models with Many Voxels and Calibrating Parameters*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1919-1926, New Orleans, April, 2004.
- [8] 平井慎一, 友國誠至, レオロジー変形の動的モデリング, ロボティクス・メカトロニクス'04 講演会予稿集 CD-ROM, 2004.
- [9] 友國誠至, 杉山勇太, 平井慎一, 実時間計算可能な仮想レオロジー物体の構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp.247-254, 2003.
- [10] 野上良, 榎亮, 登尾啓史, レオロジー物体を表現する 3 つのモデルの変形特性に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp.271-278, 2003.