

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 28日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760185

研究課題名（和文）

レオロジー物体のダイナミック塑性変形分布制御

研究課題名（英文）

Dynamic Plastic Deformation Distribution Control of a Rheological Object

研究代表者

東森 充 (HIGASHIMORI MITSURU)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30346522

研究成果の概要（和文）：レオロジー物体の塑性変形分布を制御する手法を提案した。物体の概形とその変形特性を表現する7ノード粘弾性モデルを導入し、概形成形手法として、グリッパによる把持動作によって入力軸とこれに直交するもう1軸の対象物長さの比率を制御する手法を構築した。ここでは、1軸応力積分値に対する塑性変形分布則に基づき、把持解放後の最終的な物体概形を能動的に管理する手法を提案した。実機実験により提案手法の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：A shaping strategy of a rheological object was proposed. We introduced a seven-nodes viscoelastic model for approximating the outline and the dynamic characteristics of the object. Then, we showed a shaping method of the object's outline, where the proportion of the input axis to another one, which is perpendicular to the input one, is controlled by using a parallel jaw gripper. Based on the plastic deformation distribution for the integrated input stress, the proposed method can actively manage the object's final outline. We showed the experimental results for confirming the validity of the proposed method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：レオロジー物体，成形制御，粘弾性モデル，変形分布制御，食品ハンドリング

1. 研究開始当初の背景

食品などのレオロジー物体の変形特性は、粘弾性要素の組み合わせにより表現することができ、接触力の与え方によって、対象物の後に復元する一時的な変形（弾性変形）と永久的な変形（塑性変形）のバランスが変化する。塑性変形は、消費者に対して食品の見た目を魅力的な商品として維持するための重要な要素となるが、単

純なグリッパ方式の生産ラインでは、塑性変形まで操る技術は実現できていないのが現状である。運搬および盛り付け等の一般的な食品製造ラインを想定する場合、食品の厳密な形状を管理することより、2次元概形程度の管理と処理時間の短縮に優先度が割り当てられる。レオロジー物体の2軸以上の長さを同時に管理する場合、それぞれの軸方向からグリッパをアプローチさせ、

型枠式に固定して成形する手法が最も単純な手法である。この手法では、最終形状を司る塑性変形を生み出すために、把持中に対象物内に蓄積された弾性変形エネルギーが完全に散逸されるまでグリッパを把持状態で維持する必要がある。このような2軸型枠式の手法は受動的な成形手法と位置付けられ、対象物の粘弾特性を知る必要が無い一方で、操作時間は長くなってしまふ。

2. 研究の目的

以上の点を踏まえ、本研究では、柔軟物体の塑性変形応答を能動的に管理し、対象組織の内部変形分布の制御手法を構築することを目的とする。特に、概形管理におけるグリッパ自由度の簡素化と操作時間の短縮化を試みる。動特性モデリングとマニピュレーション技術を融合させ、従来、職人の技巧に依存していた塑性変形制御技術の自動化・高速化のための要素技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、レオロジー物体の成形問題について議論し、対象物の概形を能動的に制御する手法を確立する。

(1) レオロジー物体の変形特性をモデル化する。ここでは、対象物中心に対して点対称である6つのノードによって対象物全体の概形を表現し、ノード間を連結する4要素粘弾性ユニットによってレオロジー物体の変形特性を近似する。次に、1つの頂点に加えられる応力と対象物全体に分布するひずみとの関係式を導出する。

(2) グリッパの把持動作によって、レオロジー物体の概形を制御する手法を提案する。グリッパ入力軸とこれに直交するもう1軸の対象物長さの比率を概形比率と定義し、目標概形比率を実現するためのグリッパ動作計画を構築する。対象物の把持解放後の概形を司るのは塑性変形である点に着目し、まず、1軸応力積分値に対する対象物全体への塑性変形分布則を導出する。この分布則に基づいて、目標概形比率を実現するための応力積分値を算出し、力制御によるグリッパ把持動作を実行する。この提案手法では、対象物の一時的な過大弾性変形成分にかかわらず、最終的な概形に直結する塑性変形成分を能動的に操作する。このため、2軸型枠式による受動的な手法と比較して、提案手法はグリッパ自由度機構の簡素化および把持時間の短縮化の両面から優位性を有する。

(3) 実機実験により、提案手法の有効性を確認する。概形生成精度、把持時間、目標概形比率に対する適応性について確認する。

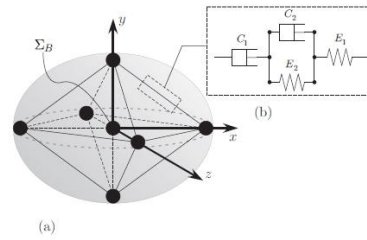


図1 7ノード粘弾性モデル

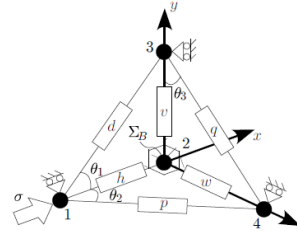


図2 4ノード概形モデル

4. 研究成果

(1)モデル化

①解析モデル

図1(a)にレオロジー物体の概形モデルを示す。物体表面に内接するように x , y および z 軸上に6つのノードを配置し、これらと物体中心を合わせた計7ノードによって対象物概形を表現する。一般に、レオロジー物体の変形特性を粘弾性モデルで表現するためには、4要素(弾性 $\times 2$, 粘性 $\times 2$)以上の使用が適している。本研究では、図1(b)に示すBurgerモデルの粘弾性ユニットを各ノード間に配置することでレオロジー物体全体の変形特性を表現する。以下のような仮定を設ける。

仮定 1: 対象物は均質である。

仮定 2: Σ_B を対象物中心を原点とした座標系とし、対象物形状は Σ_B について点対称である。

仮定 3: 表面の粘着は無視できるほど小さい。

仮定 4: 外界との接触はノードのみで起こり、接触面積は一定で近似可能である。

②定式化

図1(b)のBurgerモデルによる4要素粘弾性ユニットにおいて、 C_1, C_2 は粘性要素、 E_1, E_2 は弾性要素である。ユニットの長さを l 、初期長を l_0 、ひずみを ε 、応力を σ とする。ここで、ある1つのノードに対して、対象物中心向きの応力が加わる場合を考える。このとき、対象物の均質性と対称性から、各軸方向の変形特性は対称となる。したがって、図1(a)の7ノードモデルから1/8の部位を切り出し、図2に示す4ノードモデルを用いて対象物全体の概形と変形特性を表現することができる。図2において、ノード1, 3および4はそれぞれ x , y および z 軸上に存在し、2は対象物中心に対応する。ノード2は固定端、1, 3, 4はそれぞれ x , y , z 軸上のみを自由に移動可能であるよう拘束条件を与え

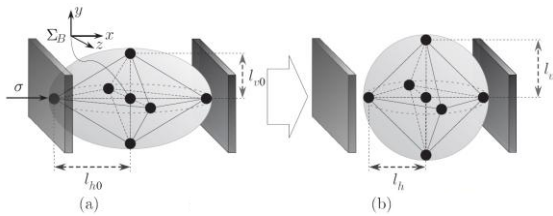


図3 概形制御

る. ノード 1 に x 軸に沿って与えられる応力 σ と 6 ユニットのひずみベクトル \mathbf{e} との関係は, 次式で整理できる.

$$A_2 \mathbf{s}^T(t) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}(t) + A_1 \mathbf{s}^T(t) \boldsymbol{\varepsilon}(t) = B_2 \ddot{\sigma}(t) + B_1 \dot{\sigma}(t) + \sigma(t)$$

A_1, A_2, B_1, B_2 は粘弾性によって決定する係数である. \mathbf{s} はこの関係を示すための各ユニットのひずみに対する重みベクトルであり, 対象物概形の幾何学的条件によって決定される. なお, 上付き添え字 T は転置を示す.

(2) 塑性変形分布に基づく概形制御

① 問題設定

レオロジー物体の概形制御問題として, 以下を取り上げる. 対象物の x 軸と y 軸 (または z 軸) における長さについて, ここでは, この 2 軸間の長さの比を概形比率 α と定義する. 図 3(a) に示すように, 初期状態において概形比率 $\alpha_0 = l_{h0}/l_{v0}$ である対象物を考える. この対象物に対して, グリッパの把持動作によって x 軸方向への応力を与え, 1 軸の押し込み変形を与えることによって, 把持解放後に図 3(b) に示すように目標概形比率 $\alpha_d = l_h/l_v$ が最終的に生成されるようなグリッパ動作計画を構築する. ただし, z 軸 (または y 軸) の長さについては考慮しない. なお, グリッパは対象物を押し込むことだけが可能であり, 引っ張ることはできない.

② 概形制御手法

グリッパによる把持解放後の十分に時間が経過した状態において, 把持中に対象物に与えられていた応力の積分値と最終的に残存しているひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}(\infty)$ の関係は, 次式で示すことができる.

$$C_1 \mathbf{s}^T(\infty) \boldsymbol{\varepsilon}(\infty) = \int_0^{T_h} \sigma(t) dt$$

これは, 1 軸応力積分値に対する塑性変形の分布則と位置付けられる. なお, T_h は把持時間である. 次に, 図 2 に示す 4 ノードモデルにおいて, グリッパ入力軸上に存在するユニット h のひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}_h$ と他ユニットのひずみとの関係を次式の線形関係によって近似する.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{r} \boldsymbol{\varepsilon}_h$$

ただし,

$$\mathbf{r} \triangleq [1, r_v, r_w, r_d, r_p, r_q]^T$$

この近似により, 概形比率 α に対応するユニット h のひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}_{hp}$ は次式で表現される.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{hp}(\alpha) = \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0 - \alpha r_v}$$

同様に, 概形比率 α に対する重みベクトルも, α の関数として $\mathbf{s}_p(\alpha)$ で表現することができる. 以上の力学的関係式および幾何学的関係式を整理することにより, 把持解放後の $t = \infty$ において目標概形比率 α_d が実現される応力積分値を次式で算出することができる.

$$\Omega_p(\alpha^d) = C_1 \mathbf{s}_p^T(\alpha^d) \mathbf{r} \boldsymbol{\varepsilon}_{hp}(\alpha^d)$$

対象物に与える応力を監視し, 応力積分値が上式の $\Omega_p(\alpha_d)$ となるように把持動作を行えば, 目標概形比率 α_d が生成できる. 実際には, 対象物を破壊しない範囲で最大応力 σ_{max} を設定し, 応力積分値が $\Omega_p(\alpha_d)$ となる目標応力波形を設計すればよい. このような提案手法では, 応力積分値を通じて最終的な概形をリアルタイムに管理していると位置付けられる. したがって, 対象物には一時的な過大変形が発生するが, 把持解放後に対象物の弾性変形がゆっくりと復元し, 自動的に目標概形が生成される. すなわち, 弾性エネルギー散逸のための変形復元時間を待つことなく, グリッパはこの対象物への操作を完了することができる.

(3) 実験による提案手法の有効性確認

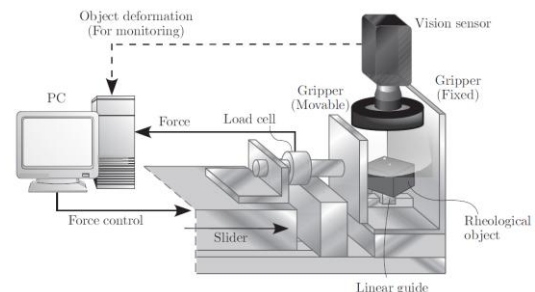


図4 実験システム

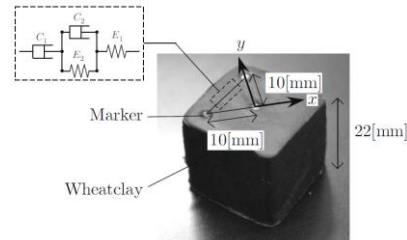


図5 試験対象物

① 実験システム

図 4 に実験システムの構成を示す. 把持部分は並行グリッパで構成されており, 一方を土台に固定し, もう一方を PC で制御可能な 1 軸スライダに装着している. また, ロード

セルを可動側グリッパ軸に接続し、接触力情報を得ることで、応力積分値 Ω が監視できるようになっている。対象物は、グリッパ間に置かれ、下面に働く摩擦力を軽減するため、1軸のリニアガイド上に載せている。グリッパと対象物間の粘着を避けるために、両者の間に紙を挟んでいる。また、対象物の変形の様子をとらえるために、対象物上方にビジョンセンサを設置しており、対象物上方に取り付けた3つのマーカの位置をビジョンセンサで取得することで、対象物の変形情報を得ることができる。対象物は、図5に示すような一辺22[mm]の立方体形状の小麦粘土を用い、対角方向からグリッパで把持される。グリッパ面と対象物の接触面積は100[mm²]で一定として取り扱う。なお、実験は図2に示す4ノードモデルのxy面の観察と位置づけ、ユニット w, p, q の粘弾性パラメータを0とみなし、ノード1, 2, 3およびユニット h, v, d のみを有効とする。図5に示すように、3つのマーカは $l_h, l_v=10$ [mm] となるように配置し、これらのマーカを仮想的なノード1, 2, 3として取り扱う。対象物の粘弾性パラメータは、事前に推定した値を用いる。また、ひずみ間の比率ベクトル \mathbf{r} はパラメータ推定時のひずみデータから線形近似により算出する。4回の推定パラメータの平均値、 $C_1=0.787$ [MPa \cdot s], $r_v=-0.323$, $r_d=0.241$ を対象物のパラメータとして使用する。

②実験結果

図6に実験の様子の一例を示す。ただし、図6(a)~(d)はそれぞれ初期状態、負荷状態、解放直後、十分な時間の経過後の様子を示している。図6より、3つのノードで構成された概形モデルの変形挙動が視覚的に確認できる。図6(a)(b)より、グリッパからの把持力が加わると、把持方向については対象物が圧縮され、これと直交する方向については拡張していく様子が確認できた。その後、把持から解放されると、図6(c)(d)に示すように、両方向の変形は復元していくのを確認できた。図7および図8に初期概形比率 $\alpha_0=1.0$ 、最大応力 $\sigma_{\max}=0.02$ [MPa]の条件の下で、目標概形比率 $\alpha_d=0.95$ および 0.8 を与えたときの応力、ひずみ、概形比率の時系列データを示す。これらの結果から、把持により応力が加わるとひずみが増大し、応力が消失するとひずみが徐々に復元するレオロジー物体の特性が表れていることが確認できた。図7, 8に示すように、それぞれ $T_h=2.6, 9.5$ [s]の把持操作によって、最終的に目標概形比率を達成することができた。

図9に、目標概形比率 $\alpha_d=0.95, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4$ について、それぞれ5回ずつの概形制御を試行した結果を示す。生成された概形比率の平均値は、 $\alpha=0.96\pm 0.010, 0.93\pm 0.0074, 0.77\pm 0.052, 0.69\pm 0.026,$

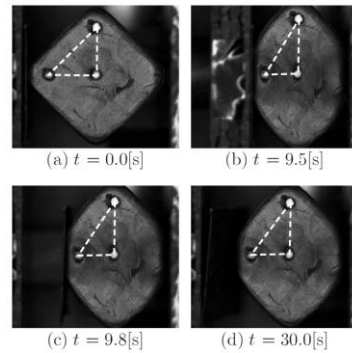


図6 概形制御実験の様子

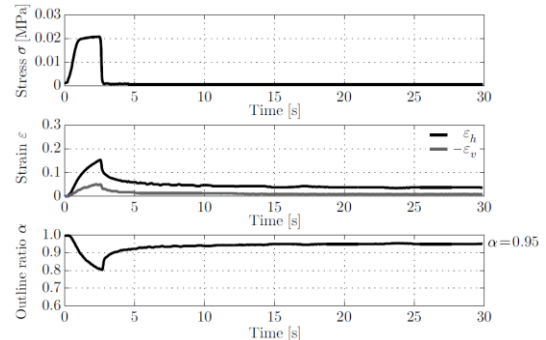


図7 実験結果 ($\alpha_d = 0.95$)

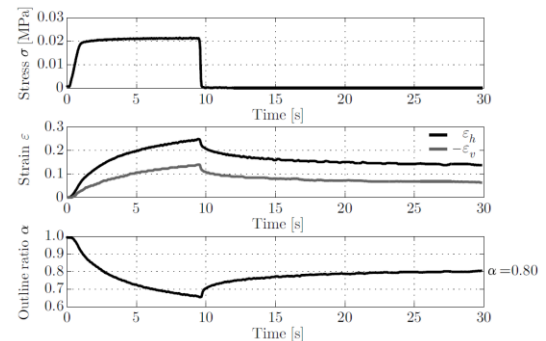


図8 実験結果 ($\alpha_d = 0.80$)

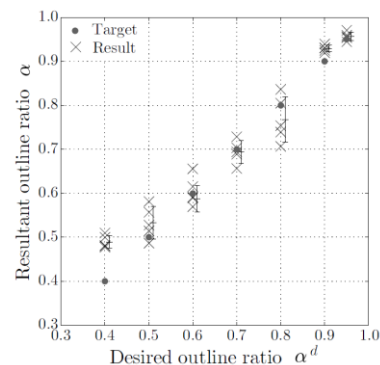


図9 目標概形率と実験結果の関係

$0.59\pm 0.030, 0.53\pm 0.037, 0.49\pm 0.014$ である。この結果より、 $\alpha_d=0.6\sim 0.95$ の範囲では、ばらつきは存在するものの、提案手法によって目標概形比率 α_d が生成可能であることが確認できた。ばらつきの原因としては、対象物の粘弾性パラメータおよび初期概形

の個体差，配置位置と姿勢の誤差の影響と考えられる．一方， $\alpha_d=0.4, 0.5$ では，生成される α は α_d よりも大きくなっている．これは，図6で観察できるような接触面積の拡大によって，応力積分値 $\Omega_p(\alpha_d)$ が正確に与えられていないことに起因している．以上の点を踏まえ，大変形を伴う概形制御を遂行する場合については，ひずみ関係の非線形化と同時に接触面積の可変モデルの導入が有効であることがわかった．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計4件)

1. T. Inahara, M. Higashimori, K. Tadakuma, and M. Kaneko: Dynamic Nonprehensile Shaping of a Thin Rheological Object, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2011), (San Francisco, CA, USA, 2011.9.27), pp.1392-1397.
2. I.G. Ramirez-Alpizar, M. Higashimori, M. Kaneko, C. Tsai, and I. Kao: Nonprehensile Dynamic Manipulation of a Sheet-like Viscoelastic Object, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA11), (Shanghai, China, 2011.5.12), pp.5103-5108.
3. 稲原知幸, 東森充, イクシエル・ラミレス, 金子真: 非把持形態によるレオロジー物体の変形制御, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, 2A1-K04, 2011.5.28, 岡山市.
4. ラミレス イクシエル, 東森充, 金子真: 粘弾性物体の非把持ダイナミックマニピュレーション, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1D1-4, 2010.9.22, 名古屋市.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

東森 充 (HIGASHIMORI MITSURU)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30346522