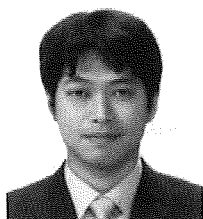


高速ハイパーヒューマン技術に基づくレオロジー物体の ダイナミック塑性変形分布制御

Dynamic Plastic Deformation Control of a Rheological Object Based on
High-speed Hyper Human Technology

1091019



研究代表者	大阪大学大学院 工学研究科 准教授	東 森 充
共同研究者	大阪大学大学院 工学研究科 教授	金 子 真

〔研究の目的〕

食品などのレオロジー物体は、外力の与え方により、一時的で後に復元する変形（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、食品の見た目を魅力的な商品として維持するための要素となるだけでなく、実際に消費者が口にした際の食感にも影響を及ぼす繊細で重要なポイントと成るが、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。本研究では、『人間と機械の調和の促進』として、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・高速化を目的とし、食品分野に留まらず、装飾・芸術分野にまで及んだロボットシステムによる高速成形技術の確立という意義を持つ。

〔研究の内容、成果〕

本研究では、未知レオロジー物体に対し、変形特性をセンシングした上で目標塑性変形量を生成するための一連のハンドリング戦略について考察した。はじめに、レオロジー物体の変形特性を、4要素粘弾性モデルで近似し、粘弾性変形と塑性変形の関係を定式化した。次に粘弾性パラメータを推定した後、粘性要素の1つと

接触力積分値に基づいて目標塑性変形量を生成する戦略を提案した。最後に、提案手法の有効性を実機実験により定量的に確認した。

1. モデル化

1.1 解析モデルと定式化

レオロジー物体の変形特性の近似モデルとして、Fig. 1 (b) の4要素粘弾性モデル（弾性×2、粘性×2）を用いる。Fig. 1 (b)において、 x_h , x , f はそれぞれグリッパの変位、対象物の変形量、グリッパと対象物間の接触力である。

Fig. 1 (b) のモデルにグリッパの把持操作によって接触力 f が作用した場合を考える。Fig. 1 (b) から得る力学的関係式から、次式を得る。

$$a_2 \ddot{x}(t) + a_1 \dot{x}(t) = b_2 \ddot{f}(t) + b_1 \dot{f}(t) + f(t) \quad (1)$$

$$a_2 \equiv \frac{c_1 c_2 (k_1 + k_2)}{k_1 k_2}, a_1 \equiv c_1,$$

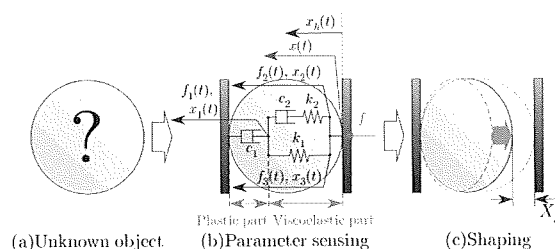


Fig. 1 Active shaping of a rheological object

$$b_2 \equiv \frac{c_1 c_2}{k_1 k_2} \quad b_1 \equiv \frac{c_1 k_2 + c_2 (k_1 + k_2)}{k_1 k_2}$$

式 (1) より, グリッパからの接触力 u に対する対象物全体の変形量 x の応答を得ることができる。

1. 2 弾 / 塑性変形の分離性

Fig. 2 (i)~(iv) に示すように, グリッパから対象物へ加える接触力 f を以下のように与える場合を考える。

- (i) 増荷重 ($0 \leq t < t_1$): 接触力 $f = f_c$ まで増加。
- (ii) 定荷重 ($t_1 \leq t < t_2$): 接触力 $f = f_c$ に維持。
- (iii) 除荷重 ($t_2 \leq t \leq T_h$): 接触力 $f = 0$ まで減少。
- (iv) 無荷重 ($T_h < t \leq \infty$): 接触力を $f = 0$ に維持。

また, グリッパと対象物が実際に接触している時間をハンドリング時間 T_h とする。Fig. 2 下部実線に式 (1) より得られる対象物の変位応答 $x(t)$ を示す。 $x(t)$ の応答より, 把持解放後に変形の一部が復元し, 一部が残存するレオロジー物体の特徴が表現できていることが分かる。

ここで, Fig. 2 (a) の 4 要素の働きに着目し, k_1, k_2, c_2 で構成される部位の変位 $x_2 = x_3$ と, c_1 の変位 x_1 に分離して考える。前者については, 除荷重終了後に, 時刻 $t \rightarrow \infty$ で変位が完全

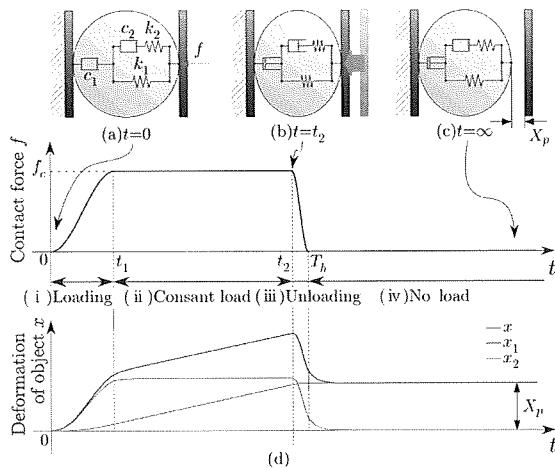


Fig. 2 Decomposition of object's response

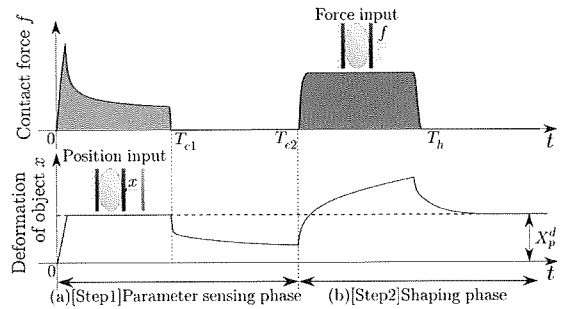


Fig. 3 Two-step strategy for generating the desired plastic deformation

に復元する。一方, 後者については, 除荷重終了時の変位が維持される。以上の性質を踏まえると, Fig. 1 (a) に示すように, レオロジー物体全体の変形応答 $x(t)$ を塑性変形 $x_1(t)$ と弾性変形 $x_2(t)$ に分離して, 次式のように表現することができる。

$$x_1(t) = \frac{1}{c_1} \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$x_2(t) = x(t) - x_1(t) \quad (3)$$

2. 未知レオロジー物体のシェイピング戦略

2. 1 [Step 1] パラメータセンシング相

粘弾性パラメータが未知の状態では, 1. 2 節のように接触力を入力として対象物に変形を与えると, 変位応答が推測できないため, 最悪の場合, この時点で塑性変形量が目標値を超えてしまう危険性がある。Fig. 1 に示すような引っ張り力を生成できないグリッパ方式のハンドでは, 目標値を超えて定常状態となった変形を復元することができない。一方で, 対象物の変形動特性を精度よく推定するためには, できるだけ大きな変形を観測することが望ましい。以上の点を踏まえ, 本ステップでは目標塑性変形量 X_p^d を最大値とした位置入力を用いて対象物に変形を与える。この操作により, パラメータがどのような値であっても, 把持解放後の塑性変形量が目標値を超えないことが保証される。以上の操作の間 ($0 \leq t \leq T_e$) の接触力情報, 対象物変位情報および式 (1) より, 式 (1) の係数パラメータの最小自乗近似解を算出する

ことができる。

2.2 [Step 2] シェイピング相

Fig. 2 (iv) で示される無荷重状態において無限時間が経過し、定常状態になった際の対象物の変形量を、塑性変形量 X_p とする。このとき、 $X_p = x_1(\infty) + x_2(\infty)$ について、 x_2 は粘弾性変形のため、把持解放後、 $x_2(\infty) = 0$ である。一方、 x_1 は塑性変形であり、 $f(t) > 0$ 、すなわち $0 \leq t \leq T_h$ の間のみ変形するので、 $x_1(\infty) = x_1(T_h)$ となる。したがって、 $f = f_1 = c_1 \dot{x}_1$ より、対象物に最終的に残存する塑性変形量 X_p は、次式で与えられる。

$$X_p = x_1(T_h) = \frac{1}{c_1} \int_0^{T_h} f(t) dt \quad (4)$$

式 (4) および c_1 を用いて、目標塑性変形量 X_p^d を生成するための接触力積分値 $F^d(X_p^d)$ を次式で求めることができる。

$$F^d(X_p^d) = c_1 X_p^d - \int_0^{T_h} f(t) dt \quad (5)$$

式 (5) 右辺第 2 項は、[Step 1] で既に対象物に与えられた接触力積分値である。式 (5) に基づき、接触力 f をセンサ系からリアルタイムで取得しながら接触力積分値を監視することで、本ステップでは、レオロジー物体の全変形量に含まれる塑性変形量をアクティブに管理する。これにより、対象物の変形が $x = X_p^d$ で定常となるには、理論上 $t \rightarrow \infty$ が必要となる一方で、グリッパの操作を有限時間 T_h で完了することができる。

3. 実験

3.1 実験システム

Fig. 4 に実験装置の概要を示す。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 で制御可能な一軸スライダで駆動する。スライダは、位置および力フィードバック制御が可能である。また、ビジョンセンサにより、対象物全体の変形情報 $x(t)$ を得ることができる。実対象物として、概形で幅 44 [mm] × 奥行き 22 [mm] × 高さ 22

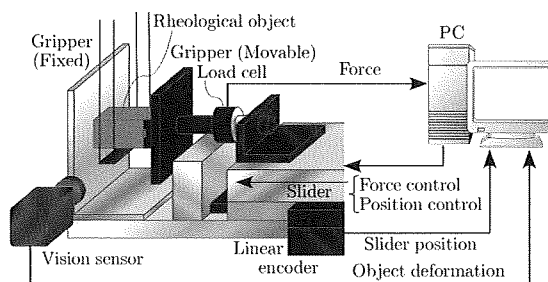


Fig. 4 An overview of experimental system

[mm] の直方体形状の小麦粘土を用いた。

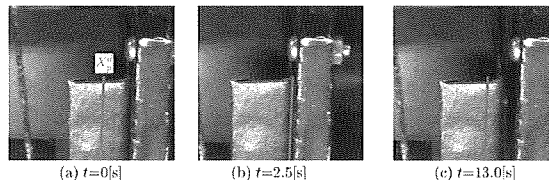
3.2 実験結果

Table 1 に、 $f_c = 5.0$ [N] の下で目標塑性変形量 $X_p^d = 5.0$ [mm] を与えた際の実験結果として、4 回の試行 I ~ IV における粘弾性パラメータの推定値と塑性変形量を示す。目標値 $X_p^d = 5.0$ [mm] に対し、平均値 $X_p = 4.7$ [mm] が実現できている。Fig. 5 に試行 I における実験の様子を示す。Fig. 6 に、同試行時の接触力 f と対象物の変形量 x の時系列データを示す。なお、Fig. 6 (a) ~ (f) の時刻はそれぞれ Fig. 5 (a) ~ (f) の状態と対応している。Fig. 6 の破線は、[Step 1] によって得た推定値と接触

Table 1 Experimental results

	c_1	c_2	k_1	k_2	X_p
I	5.13	1.49	1.04	1.76	5.1
II	4.11	0.915	1.11	2.28	4.3
III	3.46	0.500	0.622	1.41	4.8
IV	3.08	0.364	0.661	1.46	4.6
Avg.	3.95	0.817	0.858	1.73	4.7

[Step1] Parameter Sensing Phase



[Step2] Shaping Phase

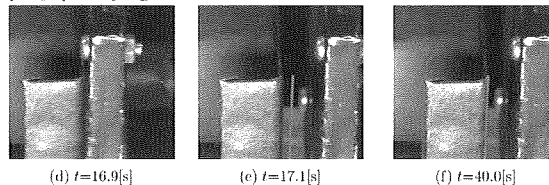


Fig. 5 A series of photos during an experiment

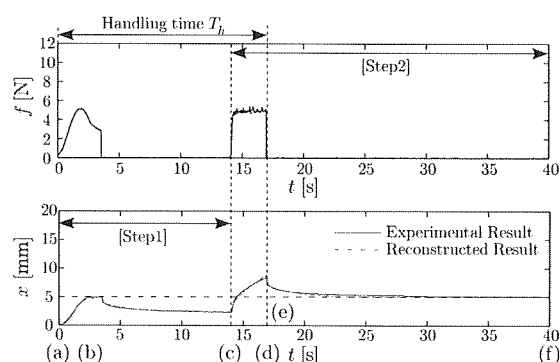


Fig. 6 Contact force and deformation of object with respect to time

力 f を式 (1) に代入して得た変形量 x の再現波形である。[Step 1] での力-変形情報のみで推定した粘弾性パラメータにもかかわらず、再現波形は全域で実験値波形とよく一致した。また、[Step 2] では対象物の変形が目標値を一度超えてしまうが、グリッパを離すと対象物が徐々に復元し、目標塑性変形量に近づいていくことが確認できた。Fig. 6 (f) に示すように、最終的な目標塑性変形量 X_p^d の生成が完了する時刻は $t \sim 40$ [s] にも及ぶが、実際にグリッパが対象物を操作しているのは、Fig. 6 (d) に示すように $t = T_h = 16.9$ [s] までであった。

このように、本手法では対象物全体の変形に含まれる塑性変形をアクティブに管理することによって、ハンドリング時間 T_h を短縮できるという利点を有することを、実験的に確認することができた。

[今後の研究の方向、課題]

今後は、食品等の実対象物への適応性を考慮し、非均一モデルおよびシェイピング問題の多軸化を検討する予定である。

[成果の発表、論文等]

- [1] 吉本佳世, 東森充, 金子真: 未知レオロジー物体の弾 / 塑分離性に基づくアクティブシェイピング, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1 A 2-05 (2009)
- [2] M. Higashimori, K. Yoshimoto, and Makoto Kaneko: Active Shaping of an Unknown Rheological Object Based on Deformation Decomposition into Elasticity and Plasticity, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 10), pp. 5120-5126 (2010)