

# 変形推移グラフを用いた ビジョンに基づくレオロジー物体の自動成形

平井 慎一

立命館大学 ロボティクス学科

## Vision-based Automatic Forming of Rheological Objects Using Deformation Transition Graphs

Shinichi Hirai

Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

### Abstract

Many forming operations of rheological objects such as dough and paste can be found in food industry. Automatic forming operations of rheological objects are eagerly required for the cleanness of food products. In this report, we will realize a vision-based automatic forming of rheological objects using deformation transition graphs.

First, we will develop a forming machine of rheological objects with multi degrees of freedom. A vision system is introduced to capture the deformed shape of a rheological object during its forming process so that the action of the forming machine can be controlled according to the deformed shape. Secondly, we will analyze the forming processes of rheological objects experimentally using the vision system. Outline functions are introduced to describe the deformed shapes of rheological objects. We will investigate the extensional forming corresponding to similar shapes. Thirdly, we will introduce a deformation transition graph so that the forming processes can be described in a systematic manner. Finally, we will propose a forming control method of a rheological object based on the deformation transition graph. We will show that an automatic forming of wheat dough into a circular shape can be performed successfully using the developed forming system and forming control method.

キーワード 変形, 成形, 制御, レオロジー, ビジョン

# 1 緒言

成形作業は、製造業の様々な分野で見うけられる基本的な作業の一つである。たとえば、自動車産業におけるフレームの成形、電気機器における筐体の成形、食品産業における生地やペースト、食肉の成形など、様々な材料を対象とする成形作業が、数多く存在する。これらの成形作業の内、自動車フレームや筐体の成形は、塑性変形を利用する成形であり、自動化が進んでいる。一方、生地やペースト、食肉の成形は、現在でも人手に頼る部分が多い。物体が塑性変形する場合、物体にエフェクタで位置変位を与えることにより、物体を成形することができる。一方、生地やペースト、食肉の成形作業においては、エフェクタが物体から離れた後に物体表面が復元し、また、位置変位の履歴によって復元の状況が異なるため、成形作業を位置制御で実現することは難しい。したがって、生地やペースト、食肉などを成形する場合は、形状のフィードバックを用いる成形制御が必要となる。生地やペースト、食肉などの物体は、粘弾性特性を示すとともに、残留変形が大きいという特性を有する。本研究では、このような物体をレオロジー物体とよび、その成形作業を研究の対象とする。

物体変形に関しては、様々な分野で研究が進められている。柔軟物体のモデリングが、コンピュータグラフィックスやバーチャルリアリティの研究において行われている [1, 2, 3]。これらの研究は、粘弾性物体の変形モデリングを目的としており、粘弾性物体の成形作業は対象外である。すなわち、物体モデルから成形の方策を得る手段は提供されていない。レオロジーにおいては、レオロジー物体の材料学的性質が、詳細に研究されている [4]。しかしながら、レオロジーでは、物体の三次元変形をほとんど扱っていない。一方、柔軟物体のハンドリングに関して、衣料産業や電機産業において研究が進められている [5, 6]。Zheng らは、穴に柔軟なビームを挿入するための作業方策を提案した [7]。和田らは、伸縮性のある布地を位置決めするための制御則を提案した [8]。これらの研究は、弾性物体を対象としており、レオロジー物体は扱われていない。

本報告では、レオロジー物体の自動成形システムを提案する。まず、レオロジー物体を成形するための多自由度メカニズムを提案する。次に、レオロジー物体の変形過程を、ビジョンシステムを用いて分析する。次に、変形推移グラフを導入し、変形過程を統一的に記述する。最後に、レオロジー物体の成形制御則を提案し、成形実験を行った結果を示す。

## 2 多自由度成形システムの開発

本節では、レオロジー物体を成形するために、多自由度を有する成形システムを構築する。図 1 は、ローラーとテーブルの位置関係を表す。ローラーは、テーブルに

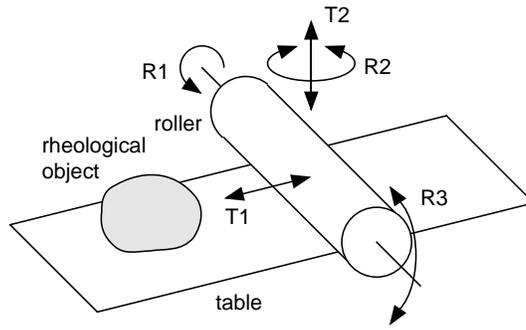
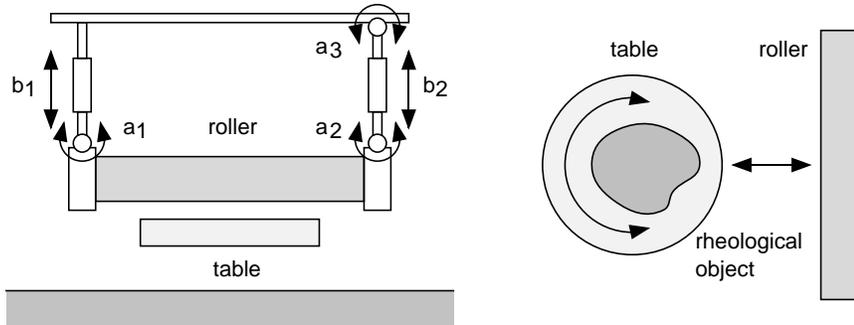


Fig. 1: Motion freedoms of forming machine



(a) Front view

(b) Top view

Fig. 2: Mechanism of proposed forming machine



Fig. 3: Prototype of forming system

対して 6 自由度，すなわち並進 3 自由度と回転 3 自由度を持つ．ただし，ローラーの軸に沿っての並進運動は，ローラー表面とテーブル表面との位置関係を変えないので，除外する．すると，図に示す 5 自由度が必要となる．以上の 5 自由度を，ローラーとテーブルに分配する．

従来の生地伸展機械は，ローラの回転に対応する自由度  $R_1$  とローラーの並進移動に対応する自由度  $T_1$  を持つ．生地伸展機械では，回転自由度  $R_1$  はローラーに，並進自由度  $T_1$  はテーブルに割り当てられている．そこで，これらの自由度は同様に分配する．並進自由度  $T_1$  と回転自由度  $R_2$  は，テーブル面内の平面運動に含まれる．そこで，回転自由度  $R_2$  は，テーブルに分配する．これ以外の自由度  $T_2, R_1, R_3$  は，平面運動に含まれない．そこで，並進自由度  $T_2$  と回転自由度  $R_1, R_3$  を，ローラーに分配する．結局，テーブルには 2 自由度  $T_1, R_2$  を，ローラーには 3 自由度  $T_2, R_1, R_3$  を割り当てる．

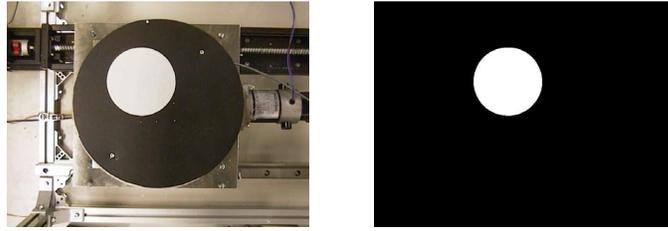
以上の考察を基に，図 2 に示す成型メカニズムを開発する．このメカニズムは，ローラーとテーブル間の 5 自由度を変えることができる．ローラーは，回転ジョイント  $a_1, a_2, a_3$  ならびに並進ジョイント  $b_1, b_2$  から成るリンク機構で支えられている．回転ジョイントはすべて受動的であり，自由に動くことができる．一方，二つの並進ジョイントはアクチュエータにより駆動される．その結果，並進自由度  $T_2$  と回転自由度  $R_3$  を制御することができる．また，テーブルは円形であり，中心軸まわりの回転とテーブル面内の往復運動を制御することができる．すなわち，回転自由度  $R_2$  と並進自由度  $T_1$  を制御することができる．以上 4 個の自由度，すなわち  $T_1, T_2, R_2, R_3$  はすべて，DC サーボモータで駆動される．回転  $R_1$  は，駆動ベルトにより並進  $T_1$  に同期して回転する．すなわち，ローラー表面における接線速度は，テーブルの往復速度に一致する．

成形システムのプロトタイプを，図 3 に示す．上部に CCD カメラが取り付けられ，レオロジー物体の変形形状を撮影することができる．撮影画像は PC に送られ，それに基づき成形メカニズムの運動が決定される．

### 3 レオロジー物体の成形過程

本節では，レオロジー物体の成形過程を分析する．まず，変形形状を表すために輪郭関数を導入する．図 4-(a) に，CCD カメラで撮影した画像の例を示す．レオロジー物体は，テーブル上に載っている．テーブル表面は黒色であり，レオロジー物体は白色である．また，画像内のテーブルの位置は，一定である．したがって，図 4-(b) に示すように，画像から容易にレオロジー物体を抽出することができる．

画像の幅と高さをそれぞれ  $W, H$  で表す．格子点  $(i, j)$  におけるピクセル値を  $p(i, j)$  とする．黒色がピクセル値 0，白色がピクセル値 255 に対応する．このとき，



(a) Original image      (b) Extracted object image

Fig. 4: Images of rheological object

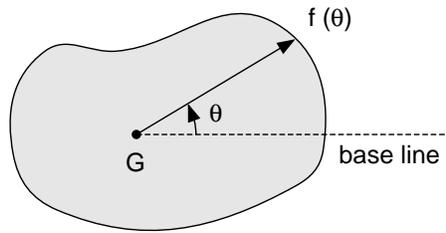
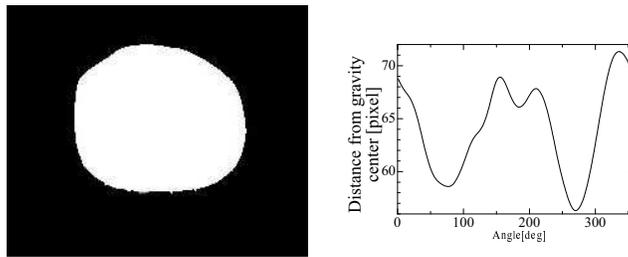


Fig. 5: Outline function of deformed shape



(a) Deformed shape      (b) Outline function

Fig. 6: Example of outline function

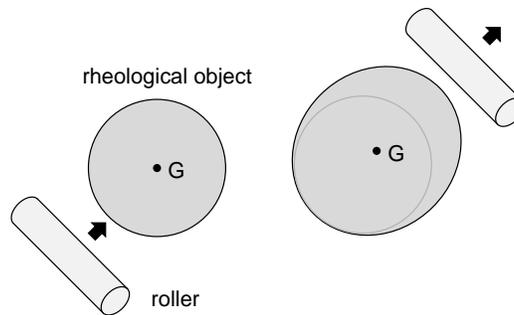


Fig. 7: Extensional forming of rheological objects

変形形状の重心座標  $G = (G_x, G_y)$  は,

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} p(i, j) \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix}$$

で与えられる．ここで,

$$W = \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} p(i, j).$$

である．

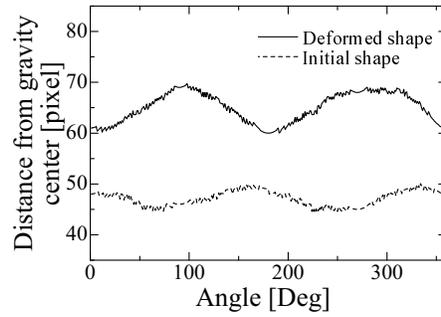
図5に示すように,基準線を設定する．基準線は通常  $x$  軸に一致させる．重心を通り,基準線と角度  $\theta$  を成す直線を描く．図に示すように,この直線が変形形状の輪郭と交わる点と重心との距離を,  $f(\theta)$  で表す．このとき,変形形状は,関数  $f(\theta)$  ( $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ) で表される．この関数を,輪郭関数 (outline function) とよぶ．変形形状の例を図 6-(a) に,これに対応する輪郭関数を図 6-(b) に示す．

レオロジー物体の変形過程を実験を通して分析する．変形過程では,図7に示すように,円柱形状のローラーがレオロジー物体を伸長させる．このとき,重心の位置が,図に示すようにローラーの接近方向に沿って移動する．したがって,レオロジー物体の輪郭点と重心の距離は,たとえ輪郭点が動かなくても,成形過程において変化する．結果として,ローラーがレオロジー物体を伸ばしたとき,輪郭関数の値は,ローラーの接近角度とその反対方向において増加する．図8に,半径 47mm の円形生地を伸ばした結果を示す．図 8-(a) に初期形状,8-(b) に変形後の形状を示す．ローラーの接近角度は  $90^\circ$  である．初期形状と変形形状に対応する輪郭関数を,図 8-(c) に示す．図に示すように,関数値は  $90^\circ$  と  $270^\circ$  で増加している．すなわち,輪郭関数の値は,ローラーの接近角度とその反対方向において増加することがわかる．

次に,相似な形状に対する成形過程を分析する．図 9-(a) に示す半径 57mm の円形生地を,ローラーの接近角度  $90^\circ$  で成形する．図 9-(a) に示す初期形状は,8-(a) に示す初期形状と相似で,1.2 倍の大きさである．ローラーの高さを適切に調整し成形すると,図 9-(b) に示す変形形状が得られる．図 9-(c) に対応する輪郭関数を示す．図 8-(c) に示す輪郭関数の値を 1.2 倍し,図 9-(c) に示す輪郭関数と比較する．このときの関数を,図 10に示す．実線が半径 47mm の円形形状の変形過程に,破線が半径 57mm の円形形状の変形過程に対応する．図に示すように,初期形状,変形後の形状が相似であることがわかる．すなわち,伸長成形においては,ローラーの高さを適切に調整することにより,相似性が良く保存されることがわかる．



(a) Initial shape (b) Deformed shape

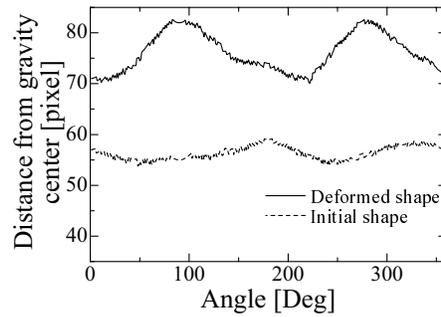


(c) Outline functions

Fig. 8: Forming of circular object of radius 47mm



(a) Initial shape (b) Deformed shape



(c) Outline functions

Fig. 9: Forming of circular object of radius 57mm

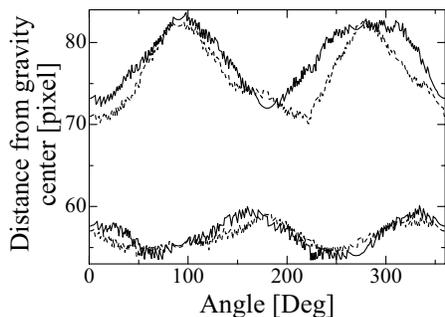


Fig. 10: Normalized outline functions corresponding to forming processes of similar objects

## 4 変形推移グラフ

### 4.1 成形過程の記述

本節では、変形推移グラフ (deformation transition graph) を導入し、レオロジー物体の成形過程を記述する。レオロジー物体の成形においては、一連の成形動作を経ることにより、目標の形状に成形する。変形推移グラフは、一連の成形動作を決定するときには有用である。

成形システムの一つの動作は、レオロジー物体の一つの形状から別の形状への遷移を引き起こす。これは、成形システムの一つの動作が、形状間の遷移に対応することを意味する。ここで、ある形状から別の形状に、適当な動作により遷移できるか否かを分析する。たとえば、図 11-(a) に示す形状  $S_1$  から、図 11-(d) に示す形状  $S_4$  への遷移は、ローラーを水平に並進移動させることで可能である。逆に、形状  $S_1$  から図 11-(b) に示す形状  $S_2$  への遷移は、成形システムのどのような動作でも実現できない。すなわち、形状間の遷移の一部が実現可能であり、それ以外は実現できない。

成形システムの動作を、有限個の動作に制限する。このとき、レオロジー物体の一つの形状は、有限個の動作により、理想的には有限個の形状に遷移する。成形システムの有限個の動作とレオロジー物体の変形形状の関係を、図 12 に示すようなグラフを用いて表そう。グラフのノードは、レオロジー物体の変形形状を表し、ノードを結ぶアークは成形システムの動作に対応する。このようなグラフを、変形推移グラフと呼ぶ。初期形状から目標形状に至る一連の成形動作を決定する問題は、初期形状に対応するノードから目標形状に対応するノードに至るパスを見つける問題に帰着される。このように、変形推移グラフは、成形動作の計画に有用であると考えられる。

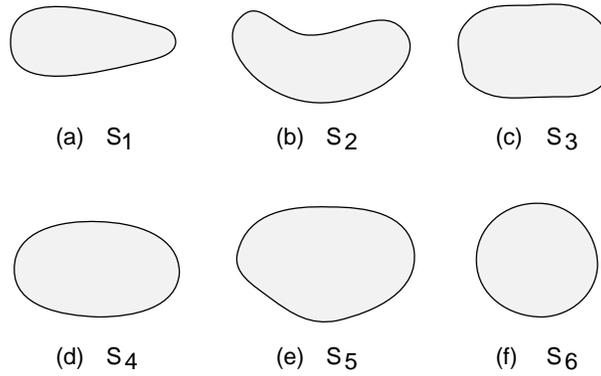


Fig. 11: Examples of different shapes of rheological object

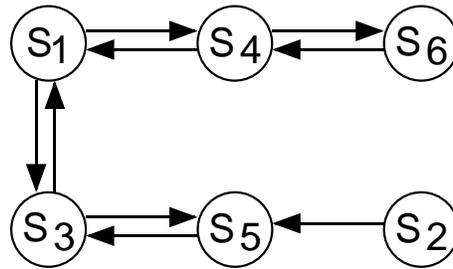


Fig. 12: Deformation transition graph

## 4.2 輪郭関数の特徴抽出

本節では、レオロジー物体の変形形状を分類し、変形推移グラフのノードを定義する。レオロジー物体の伸長成形では、図 13に示すように、ローラーは物体の凸部あるいは凹に向かって接近する。したがって、伸長成形では、物体の凸部と凹部が重要である。そこで、凸部と凹部に着目して、レオロジー物体の変形形状を分類する。

図 14-(a) に示す輪郭関数の例を用いて、変形形状の分類を説明する。変形形状の凸部は輪郭関数の極大に一致し、凹部は輪郭関数の極小に一致する。ここでは、値が小さい二つの極小値と、値が大きい二つの極大値に注目する。一般性を失うことなく、輪郭関数  $f(\theta)$  は、 $\theta = 0$  で最大値を取り、 $\theta = \alpha$  で最小値を取ると仮定することができる。二つの極小と二つの極大における関数値を調べよう。輪郭関数を定性的に表現するために、輪郭関数の値域を、その最大値と最小値を用いて、次のように分割する。

$$\begin{aligned} \text{region 1} &= [f(0) - d, f(0) + d], \\ \text{region 2} &= [f(\alpha) + d, f(0) - d], \\ \text{region 3} &= [f(\alpha) - d, f(\alpha) + d] \end{aligned}$$

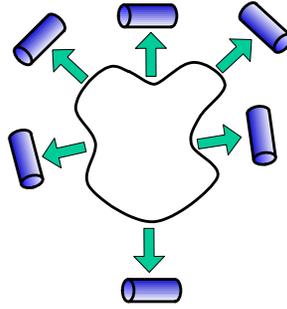


Fig. 13: Possible directions of roller in extensional forming

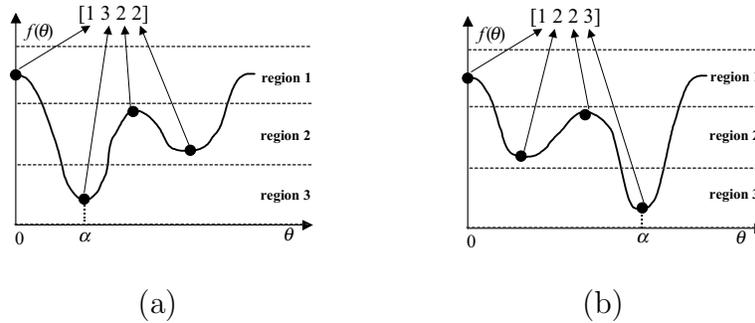


Fig. 14: Symbolic representation of deformed shapes

ここで  $d = (f(0) - f(\alpha))/4$  である．次に，二つの極小と二つの極大における関数値が，どの領域に含まれるかを調べる．たとえば，図 14-(a) に示す輪郭関数では，二番目に大きい極大値と二番目に小さい極小値は，ともに region 2 に含まれる．二つの極小と二つの極大における関数値が含まれる領域の番号を並べることにより，輪郭関数を定性的に表す．このとき，図 14-(a) に示す輪郭関数は，記号 [1322] で表される．また，図 14-(b) に示す輪郭関数は，記号 [1223] で表される．それぞれの記号に，変形推移グラフのノードを対応させる．輪郭関数の最大値は必ず region 1 に含まれるので，変形推移グラフのノードの数は  $3^3 = 27$  個である．

### 4.3 成形動作の決定

本節では，変形推移グラフのアーキに対応する，成形動作を決定する．ここでは，成形メカニズムにおけるテーブルの角度  $\psi$  とローラーの高さ  $D$  を制御する．前節で述べたように，ローラーの接近角度は，二つの極大あるいは二つの極小の方向に対応する．したがって，テーブルの角度  $\psi$  は，この条件を満たすように決定する．

次に、ローラーの高さ  $D$  をどのように決定するかを考察する。第3節で述べたように、ある成形動作は、変形形状の相似性をよく保存する。相似性を保存する成形動作は、一連の成形動作の計画に有用である。そこで、相似性を保存する成形動作を対象とする。現在のローラーの高さを  $D_{present}$ 、レオロジー物体の大きさを  $S_{present}$  とする。また、次の成形動作におけるローラーの高さを  $D_{next}$  で表す。ここで、変形形状の相似性が保たれるように、 $D_{next}$  を決定する。そのために、現在の高さ  $D_{present}$  とレオロジー物体の大きさ  $S_{present}$  に対して、相似性を保つという条件を満たす  $D_{next}$  の値を、あらかじめ実験的に求めておく。すなわち、変形実験を通して、関数  $D_{next} = D_{next}(D_{present}, S_{present})$  を得る。関数  $D_{next}(D_{present}, S_{present})$  が得られれば、現在のローラーの高さ  $D_{present}$  と撮影画像より計算できるレオロジー物体の大きさ  $S_{present}$  に対して、次の動作におけるローラーの高さ  $D_{next}$  を決定することができる。

## 5 レオロジー物体の成形制御

本節では、変形推移グラフを用いて、レオロジー物体を成形する方法を述べる。ここでは、ピザ生地を円形に伸長成形する成形について考察する。この成形における変形推移グラフの目標ノードは、図15に示すように  $[1111]$  で与えられる。目標ノード以外のノードでは、成形動作を一つ決定する必要がある。この成形では、ローラーの接近角度が輪郭関数の最小に対応する方向に一致する動作が選ばれる。

成形実験の結果を以下に示す。レオロジー物体として、小麦粉と水を重量比 1:3 で混合し、混ぜ合わせた生地を用いる。図16に、成形実験の結果の一例を示す。図16-(a)~(f)は、成形の各段階における変形形状を表す。成形過程が進むにつれて、変形形状が円形に近づいていることがわかる。また、それぞれの変形形状に対応する輪郭関数を、図17に示す。図16-(a)に対応する輪郭関数は、図中最も下のグラフであり、図16-(f)に対応する輪郭関数は、図中最も上のグラフである。成形過程が進むに

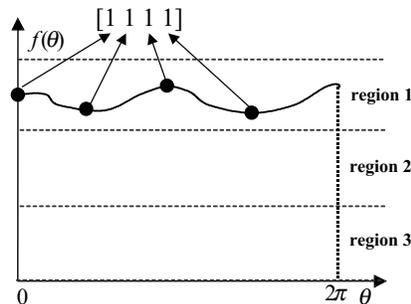


Fig. 15: Outline function at goal node

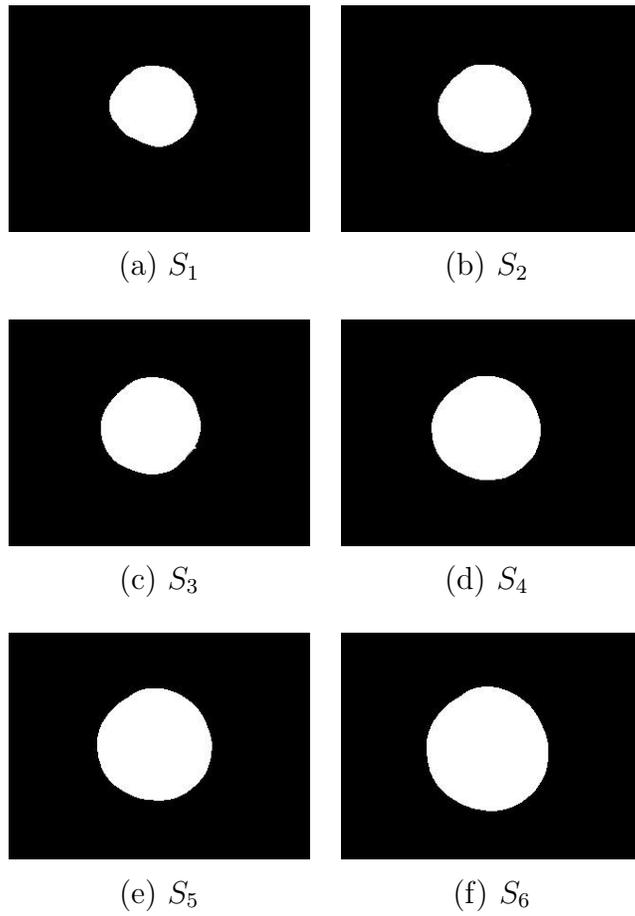


Fig. 16: Deformed shapes of dough at individual iterations

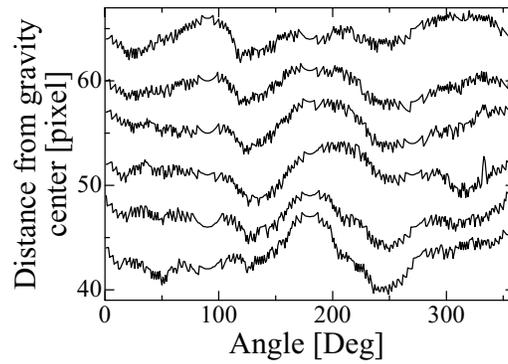


Fig. 17: Outline functions at individual iterations

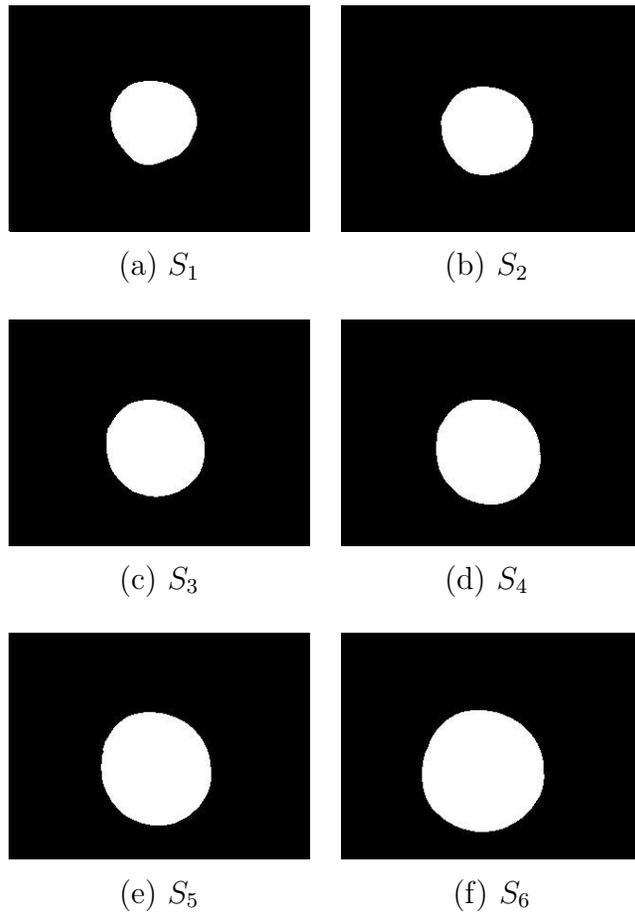


Fig. 18: Deformed shapes of dough at individual iterations

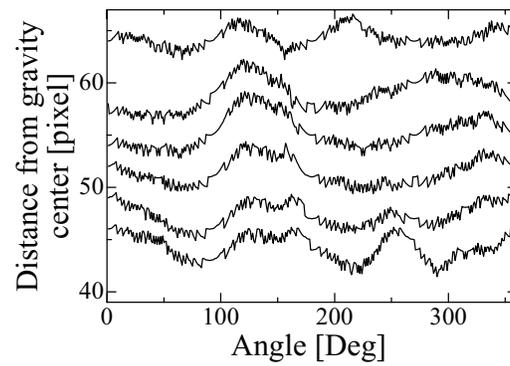


Fig. 19: Outline functions at individual iterations

つれて，輪郭関数が平らになっており，目標形状に近づいていることがわかる．図 18 に，成形実験の結果の別の例を示す．これらの変形形状に対応する輪郭関数を，図 19 に示す．この例においても，成形過程が進むにつれて，変形形状が円形に近づいていることがわかる．

## 6 結言

本報告では，ビジョンに基づいてレオロジー物体を成形制御する手法を提案した．まず，多自由度を有する成形メカニズムを提案した．次に，レオロジー物体の変形過程を，ビジョンシステムを用いて実験的に分析した．次に，成形過程を記述するために，変形推移グラフを導入し，変形推移グラフを用いた成形制御を提案した．最後に，生地を円形に伸長成形する実験を行った．その結果，様々な初期形状を有するレオロジー物体を，円形に成形することに成功した．ただし，動作を決定するには，あらかじめ変形実験を行う必要がある．また，円形以外の目標形状に対しては，形状の記述を再考する必要がある．これらの点が今後の課題である．

本研究を通して，三次元レオロジー物体のモデリングと力学的特性の同定法 [9, 10, 11]，レオロジー物体の成形過程モデリング [12, 13, 14]，レオロジー物体の成形制御 [15, 16, 17, 18] に関する成果を得た．レオロジー物体の操作は，食品産業において適用範囲が広い作業である．今後も研究を展開していきたい．

## 参考文献

- [1] Terzopoulos, D., and Fleisher, K., *Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture*, Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.269–278, Albuquerque, May, 1988
- [2] Joukhader, A., Deguet, A., and Laugie, C., *A Collision Model for Rigid and Deformable Bodies*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.982–988, Albuquerque, May, 1998
- [3] Chai, Y., and Luecke, G. R., *Virtual Clay Modeling Using the ISU Exoskeleton*, Proc. IEEE Virtual Reality Annual Int. Symp., pp.76–80, 1998
- [4] Barnes, H. A., Hutton, J. F., and Walters, K., *An Introduction to Rheology*, Elsevier Science Publishers, 1989
- [5] Taylor, P. M., eds., *Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials*, Springer-Verlag, 1990

- [6] Henrich, D., and Wörn, H. eds., *Robot Manipulation of Deformable Objects*, Springer-Verlag, Advanced Manufacturing Series, 2000
- [7] Zheng, Y. F., Pei, R., and Chen, C., *Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2598–2603, 1991
- [8] Hirai, S., Wada, T., *Indirect Simultaneous Positioning of Deformable Objects with Multi Pinching Fingers Based on Uncertain Model*, Robotica, Millennium Issue on Grasping and Manipulation, Vol.18, pp.3-11, 2000
- [9] 徳本, 藤田, 平井, 形状制御のための粘弾性物体の変形モデリング, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1545–1546, 1998
- [10] 徳本, 藤田, 平井, 形状制御のための粘弾性物体の変形モデリング, ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.224–229, 1999
- [11] Tokumoto, S., Fujita, Y., and Hirai, S., *Deformation Modeling of Viscoelastic Objects for Their Shape Control*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, pp.767–772, Detroit, May, 1999
- [12] 藤田, 徳本, 平井, レオロジー物体の変形形状推移グラフ, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.77–78, 1999
- [13] Hirai, S., Tokumoto, S., and Fujita, Y., *Deformation Transition Graphs in Forming Operations of Rheologic Objects*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.4, pp.3071–3076, San Francisco, April, 2000
- [14] 徳本, 藤田, 平井, 成形制御のためのレオロジー物体の変形推移グラフ, ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.176–181, 2000
- [15] 徳本, 齋藤, 平井, 変形推移グラフを用いたレオロジー物体の成形, ロボティクス・メカトロニクス'00 講演会予稿集 CD-ROM, 2000
- [16] 徳本, 齋藤, 平井, 変形推移グラフを用いたレオロジー物体の成形に関する研究, 2000 国際食品工業展アカデミックプラザ, pp.122–127, 2000
- [17] 齋藤, 徳本, 平井, レオロジー物体伸長成形のための成形機械システム, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.133–134, 2000
- [18] 徳本, 齋藤, 平井, レオロジー物体の変形実験による変形推移グラフの生成, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.135–136, 2000