

成形制御のためのレオロジー物体の変形推移グラフ

○徳本真一 藤田欣晃 平井慎一
(立命館大学 ロボティクス学科)

Deformation Transition Graphs of Rheological Objects for their Forming Control

*Shinichi Tokumoto, Yoshiaki Fujita, and Shinichi Hirai :Ritsumeikan University

Abstract—Manipulative operations of rheological objects can be found in many industrial fields such as food industry and medical product industry. Automatic operations of rheological objects are eagerly required in these fields. In this paper, modeling and deformation transition graphs are proposed for the forming operations of rheological objects. First, we will develop a novel forming machine with multi degrees of freedom for the automatic forming of rheological objects such as dough and paste. Second, we will introduce a lattice structure based modeling and will compare with the behavior of an actual rheological object. Third, we will introduce a deformation transition graph so that the forming process can be controlled. We will then develop a method to generate the deformation transition graph through experiments. Finally, we will explain a forming control method of a rheological object based on the deformation transition graph.

Key Words: rheology, deformation, simulation, control, forming

1. はじめに

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の成形、食肉業における食肉の成形など、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、物体の力学的性質を考慮した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。

柔軟物体のモデリングは、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分野で研究されている¹⁾²⁾³⁾。これらの研究は、物体の変形をシミュレートすることが目的であり、変形をどのように制御するかは考慮されていない。一方、ロボティクスの分野では、柔軟物体のハンドリング操作について、研究が進められている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。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。

本研究では、レオロジー物体の成形のための制御システムについての提案を行う。まず、レオロジー物体を成形するための機械メカニズムを提案する。次に、成形のための制御則を導く上で必要な、レオロジー物体のモデリング法を提案する。また、実際のレオロジー物体に対する変形実験を行い、モデルと比較する。次

に、成形作業の制御のために、変形推移グラフを導入する。変形推移グラフの概念を述べるとともに、グラフの作成法を議論する。最後に、変形推移グラフを用いた制御則を提案する。

2. レオロジー物体成形システム

2.1 基本構成

本報告では、レオロジー物体としてピザ生地を対象とする。ピザ生地の特徴として粘性・弾性があるため時々刻々と形状が変化すること、主原料が小麦粉と水のため個々の特性にばらつきがあることが挙げられる。また温度・湿度によっても、特性が変化する。したがって専用機械では、ローラとテーブルの位置関係が固定されており、成形作業の自動化は難しい。これは、成形工程がその時々により変わり、一様でないためである。つまり、成形作業での自動化には、ローラとテーブルの位置関係を変化させることのできるメカニズムが必要である。

そこで、成形工程においてローラとテーブルとの位置関係にどのような自由度を持たせればよいかを Fig. 1に示す。ローラとテーブルの位置関係を変化させる自由度は、並進自由度 T_1 , T_2 と回転自由度 R_2 , R_3 の4個である。これらの自由度をローラ部分とテーブル部分に割り当てる。自由度 R_2 , T_1 は同じ平面内を動くので、構造上テーブル部分に振り分ける。同じ理由で R_3 , T_2 はローラ部分に割り当てる。

2.2 メカニズム

前節に示した基本構成を基にして、Fig. 2に示すメカニズムを提案する。このメカニズムは、ローラとテーブルの間隔、ローラの傾きを変えることができ、テーブルの回転運動と往復運動を実行できる。

ローラ部は、回転ジョイント a_1 , a_2 , a_3 と伸縮ジョ

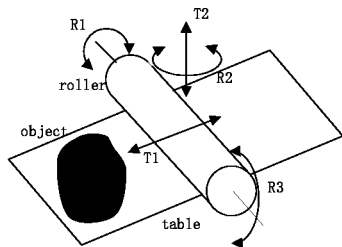


Fig.1 Motion freedoms of forming machine

イント b1, b2 からなる。これらにより、ローラの傾き、ローラとテーブルの間隔を調整する。またテーブル部は、テーブルを回転させる部分とテーブルを前後させる部分からなる。この基本メカニズムを持つ機械の試作機を製作する。

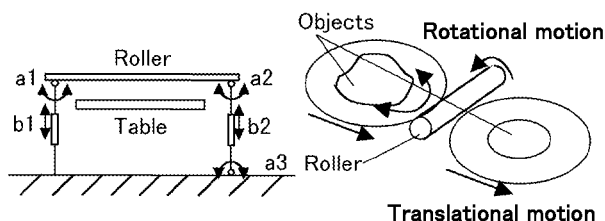


Fig.2 Mechanism of proposed deforming machine

2.3 コントローラー

前節で示した試作機において、4自由度とローラの回転は、DC サーボモータで駆動され、D/A 変換を介して PC で制御される。Fig. 2 に示すローラの並進部分 b1, b2 とテーブルの回転は位置制御を行う。ローラの回転とテーブルの並進部分は速度制御を行う。また、物体の変形形状を計測するために、CCD カメラとビジョンシステムを用いる。ただし、現時点ではビジョンシステムは実装されていない。

3. レオロジー物体のモデリング

レオロジー物体の成形制御を行うためには、あらかじめコンピュータ上で、物体の変形挙動を評価することが有効である。そのためには、レオロジー物体のモデリングと、変形シミュレーションの実現が必要である。そこで本節では、レオロジー物体のモデリングについて説明する。以前、著者らはレオロジー物体のモデリング法を提案し、2次元モデルでのシミュレーション結果を示した⁷⁾。今回は、実際のレオロジー物体を用いて変形実験を行い、3次元モデルのシミュレーション結果と比較する。

まず、モデルを構成する粘弾性要素は、Fig. 3-(a) に示す非線形 3 要素モデルを用いる。Fig. 3-(a) の C_2 には、力に依存する指数型ダンパーを用いる。レオロジー物体の物体モデルは、Fig. 3-(b) に示すように、非線形 3 要素モデルを空間に格子状に配置した格子構造モデルを用いる。

今回、実際のレオロジー物体の材料として、小麦粉と水を 3:1 の重量比で混ぜ合わせ、練ったものを用いる。レオロジー物体の各パラメータの値を、クリープ

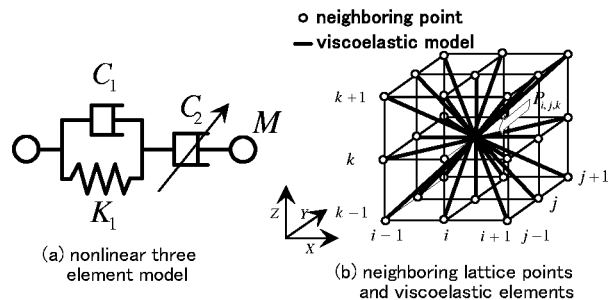


Fig.3 Lattice structure model of rheological object using nonlinear three element model

テストにより同定する。クリープテストの結果を Fig. 4 に示す。このテストは t_1 から t_2 まで約 60 秒間、50gf の一定荷重を加えた後、60 秒間除重する。この結果から、非線形 3 要素モデルの同定を行った。

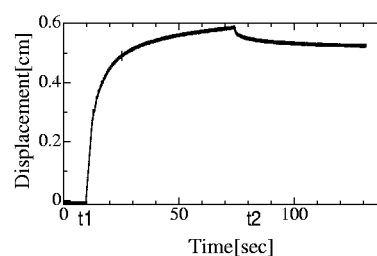


Fig.4 Displacement of dough in creep test

Fig. 5 にレオロジー物体の変形実験の結果を示す。5cm × 5cm × 3cm のレオロジー物体に、幅 1cm の平板を速度 1cm/s で移動させ、レオロジー物体の中央部に接触させる。さらに 1cm 垂直下方向に押し付けて、その状態で 30 秒保った後、平板を引き離す。Fig. 5-(a) ~ (d) は初期形状であり、Fig. 5-(e) ~ (h) は変形後の形状である。Fig. 5-(a), (e) は斜め上方から見た図である。Fig. 5-(b), (f) は側面図、Fig. 5-(c), (g) は上面図、Fig. 5-(d), (h) は正面図である。また、Fig. 6 に断面形状の計測結果を示す。破線が初期形状であり、実線が変形形状である。図から、レオロジー物体の中央上部が下に押し付けられることによって、物体が前後左右に引き伸ばされると同時に、上部側面は、押し下げられた中央上部に引っ張られるように変形していることがわかる。また、エンドエフェクターを引き離れた後、1cm 下に押え付けられていた中央上部に、若干戻り変位が生じていることが、Fig. 6 よりわかる。

Fig. 7 に 3 次元モデルのシミュレーション結果を示す。格子間隔を 1cm とすると、6 × 6 × 4 の質点からなる格子モデルが構築される。変形実験と同条件にするために、モデルの中央上部の 12 点を速度 1cm/s で 1cm 下に押し下げ、30 秒間保った後 12 点を解放する。Fig. 7-(a) ~ (d) は初期形状、Fig. 7-(e) ~ (h) は変形後の形状である。Fig. 7-(a), (e) は斜め上方から見た図である。Fig. 7-(b), (f) は側面図、Fig. 7-(c), (g) は上面図、Fig. 7-(d), (h) は正面図である。また、Fig. 8 に、初期形状と定常状態でのモデルの断面形状を示す。実線が定常状態での変形形状で、破線が初期形状である。Fig. 7 に示すように、中央上部が下に押されることによって、モデルの前後左右が若干広がっている。さら

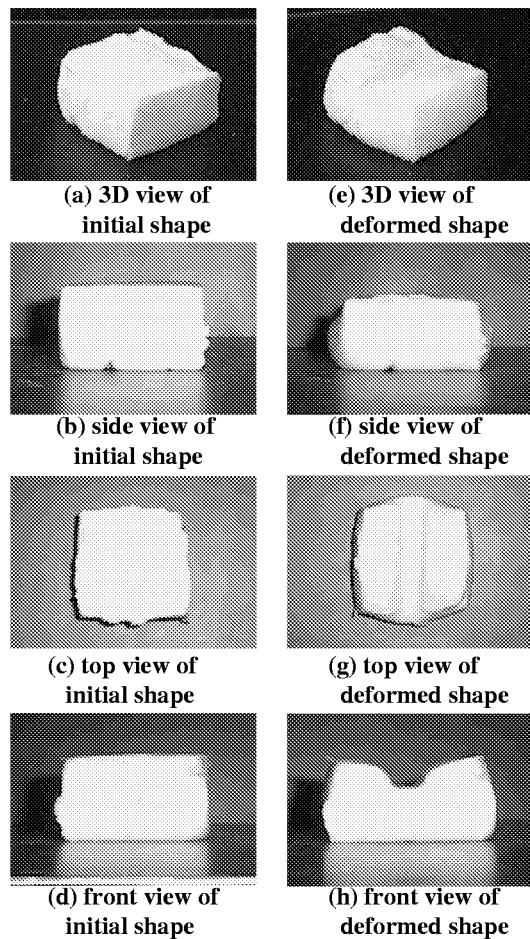


Fig.5 Deformation of actual reological object

に Fig. 8 から，上部側面が中央上部に引っ張られるように変形していることがわかる．中央上部の12点を解放した後は，それらの点において，戻り変位が生じていることが，Fig. 8，ならびに Fig. 7-(h) からわかる．

実際の変形とシミュレーション結果を比較すると，変形量に対して若干の違いが見られる．一方，変形形状は，相似している．以上のことから，レオロジー物体がどのように変形するかを推定する上で，このモデルは有効であると考えられる．

本シミュレーションでは，シミュレーションソフトウェアに MATLAB を使用した．サンプリング周波数を $1ms$ に設定しシミュレーションを行った．使用した PC は，CPU が Pentium2，クロック周波数が $450MHz$ である．シミュレーションには $0.6[sec/loop]$ の時間を要した．

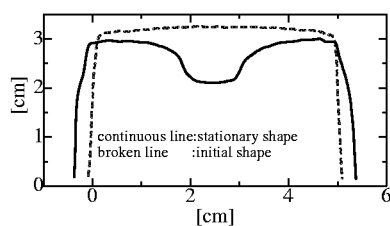


Fig.6 Cross section of deformed reological object

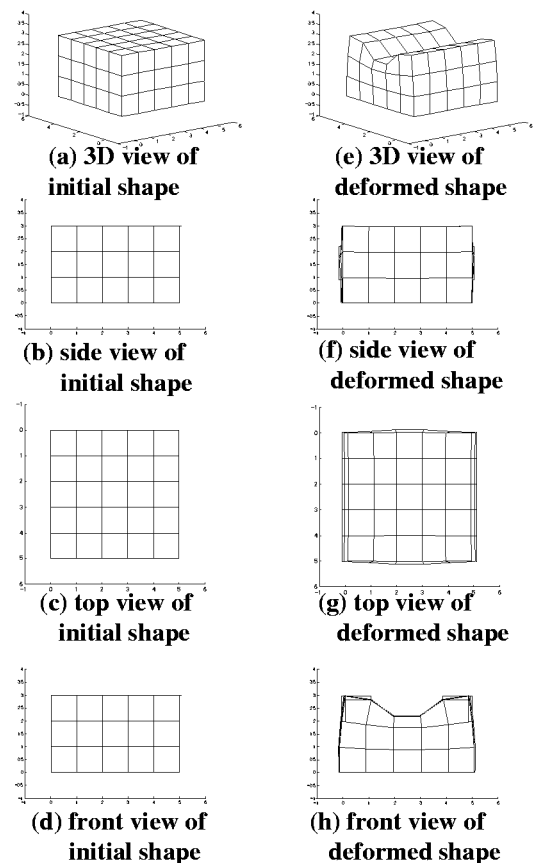


Fig.7 Deformation of three-dimensional model for displacement input

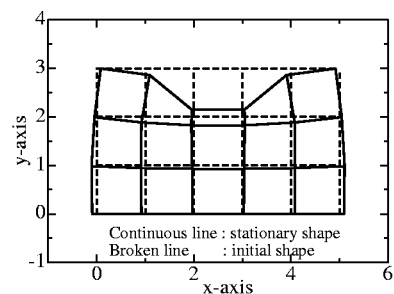


Fig.8 Cross section of deformed two-dimensional model for displacement input

4. 変形推移グラフの概念

前節では，力入力あるいは変位入力に対する変形をシミュレーションするという順問題を取り扱った．しかし変形の制御は，変形形状から力入力や変位入力決定するという逆問題である．よってシミュレーションのみでは，変形を制御することはできない．生地などのレオロジー物体の特徴としては，材料の非均一性や，特性の変化が著しいことが挙げられる．微妙な環境の変化により，変形を定量的に扱うことは困難である．しかし，変形を定性的に記述することは可能である．力・変位入力と変形形状の関係を定性的に記述することが出来れば，変形制御においては有効な手段となる．

そこで本節では，レオロジー物体の成形過程を定性

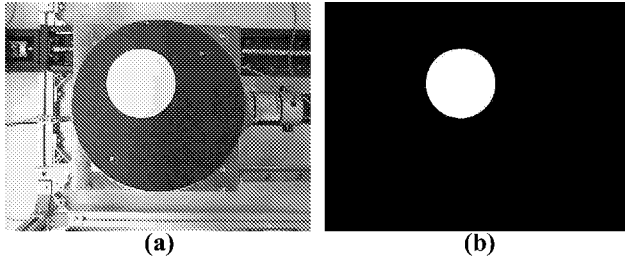


Fig.9 Picture of rheological object :(a) Before picture processing, (b) After picture processing

的に記述するために、レオロジー物体の変形形状をグラフのノードで表し、成形機械の動作をグラフのアーキで表す。このようなグラフを変形推移グラフと呼ぶ。変形推移グラフを作成する時は、変形形状と機械の動作の関係を調べる必要がある。本論文では、実験から得た変形形状から、レオロジー物体の変形推移グラフを作成する。

5. 変形推移グラフの生成

本節では、変形推移グラフの作成方法について述べる。変形推移グラフを作成するためには、レオロジー物体の形状を定量的な値として取得する必要がある。さらに取得した形状データを用い、あらかじめ設定した評価基準にしたがって、グラフのノードを作成する必要がある。本節では、まずレオロジー物体の計測方法について述べる。つぎに、計測されたデータから変形推移グラフを生成する方法について述べる。

5.1 レオロジー物体の形状表現

今回レオロジー物体の形状を計測する手段として、ディジタルカメラを用いる。Fig. 9-(a)に示すように、上方からレオロジー物体の形状を撮影する。レオロジー物体の形状を計測するためには、画像処理によって物体とそれ以外の部分を分離しなければならない。そこで、Fig. 9-(b)に示すように、レオロジー物体とそれ以外の部分との2値化処理を行い、分離する。

次に物体の形状を計算する。物体の形状を計測するために、まず物体の重心位置 (X_g, Y_g) を計算する。重心位置は、以下の式で導出される。

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \end{bmatrix} = \frac{1}{255N} \sum_{i=0}^{x_{max}} \sum_{j=0}^{y_{max}} xy_{pix}(i,j) \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix}$$

ここで、 x_{max} は画像ファイルの x 座標の最大値、 y_{max} は y 座標の最大値である。また $xy_{pix}(i,j)$ は、座標 (i,j) の明度の値、 N はレオロジー物体のピクセル個数である。次に、Fig. 10に示すように、 x 軸から角度 θ の方向において重心から物体の輪郭までの距離を $f(\theta)$ で表す。物体の輪郭は、関数 $f(\theta)$ ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$) で与えられる。これを変形形状の輪郭グラフと呼ぶ。Fig. 9-(a)の形状に対して計算した輪郭グラフ $f(\theta)$ を、Fig. 11に示す。

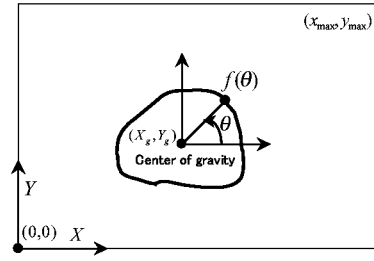


Fig.10 Outline graph of rheological object

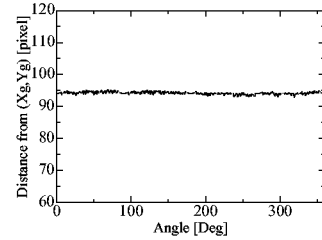


Fig.11 Computed outline graph

5.2 類似度の計算

変形推移グラフを作成するためには、形状の評価が必要である。よって、5.1節で求めた輪郭グラフを用いて2つの物体の形状の類似性を評価するために、類似度を定義する。2つの形状が合同である場合、また相似の場合類似度は0であると定める。本研究では、上方から見たレオロジー物体の形状を任意の形状に成形することを目的とする。成形作業の場合、形状が問題であり、大きさは問題ではない。2つの形状を比較する場合、位置・姿勢の違い、大きさの違いが存在する。したがって、類似度の計算においては、位置、姿勢、大きさの違いを除去する必要がある。物体の拡大率を求めるために、輪郭グラフ $f(\theta)$ の平均値 $\bar{f}$ を求める。すなわち、

$$\bar{f} = \frac{1}{360} \sum_{\theta=1^\circ}^{360^\circ} f(\theta)$$

形状の大きさの基準を $BASE$ で表す。形状の拡大率を一定にするためには、輪郭グラフに $BASE/\bar{f}$ を乗じ、その平均値を $BASE$ に一致させればよい。さらに、 $BASE$ を減じ、平均値を0に一致させる。すなわち、次式を計算する。

$$F(\theta) = f(\theta) \frac{BASE}{\bar{f}} - BASE$$

関数 $F(\theta)$ を正規化輪郭グラフと呼ぶ。姿勢が等しい相似形状の正規化輪郭グラフは、たがいに一致する。次に、変形形状の姿勢を求める。2つの形状の正規化輪郭グラフを $F(\theta)$ 、 $G(\theta)$ とする。ここで、次式で与えられる関数 $\sigma(\tau)$ を計算する。

$$\sigma(\tau) = \sum_{\theta=1^\circ}^{360^\circ} \{F(\theta + \tau) - G(\theta)\}^2$$

2つの変形形状が相似である場合、 $\sigma(\tau) = 0$ となる τ が存在する。この τ の値が姿勢角に等しい。関数 $\sigma(\tau)$ は $\tau = \tau_{min}$ で最小値 $\sigma_{min} = \sigma(\tau_{min})$ をとるとする。こ

の σ_{min} を2つの形状の類似度と定義する．2つの形状が相似であるときは，類似度は0である．2つの形状が似ているほど，類似度は小さい．

以上のような方法により，レオロジー物体の類似度を計算した例を，Fig. 12に示す．Fig. 12-(a)はカメラで撮影した直径10cmの円状の物体を示す．Fig. 12-(b)は直径5cmの円状の物体を示す．Fig. 12-(c)は(a)の輪郭グラフを，Fig. 12-(d)は(b)の輪郭グラフを示す．さらにFig. 12-(e)に，2つの正規化輪郭グラフを示す．角度は46°であり，類似度は231である．

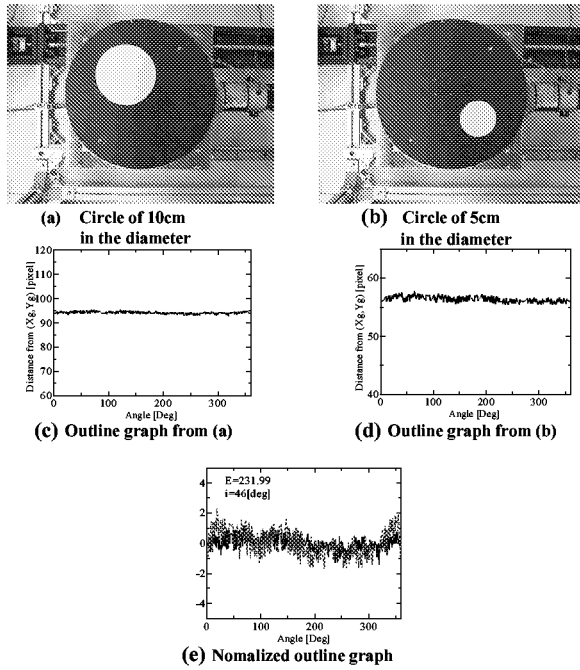


Fig.12 Comparison of two circles

別の例をFig. 13に示す．Fig. 13-(a)はカメラで撮影した一辺3cmの正方形の物体を示す．Fig. 13-(b)は一辺5cmの正方形の物体を示す．Fig. 13-(b)の正方形は傾いている．Fig. 13-(c)は(a)の輪郭グラフを，Fig. 13-(d)は(b)の輪郭グラフを示す．さらにFig. 13-(g)に，2つの正規化輪郭グラフを示す．角度は10°であり，類似度は931である．

Fig. 12では2つの円状のレオロジー物体の大きさが異なる場合での類似度を計算した．この場合，類似度 E は231という値を示した．またFig. 13では，大きさと傾きが異なる2つの正方形のレオロジー物体の類似度を計算した．この時の類似度 E は931となった．その他いくつかの例で検討したところ，同一形状のものは，類似度 E が2000以内となることが確認できた．それに対して，Fig. 14に，Fig. 12-(a)の物体とFig. 13-(a)の物体の類似度を計測した結果を示す．この場合，2つの形状が異なっているので，類似度は $E=40397$ と非常に大きくなることが確認できた．

以上に示した方法で2つの物体間の類似度を計算することができる．

5.3 変形推移グラフの生成法

本節では，変形推移グラフの生成方法について提案する．変形推移グラフの生成は，以下の手順で行う．

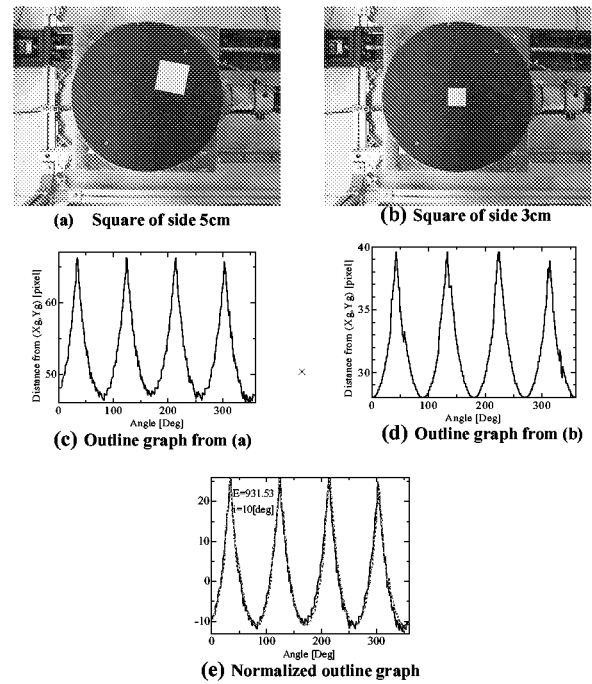


Fig.13 Comparison of two squares

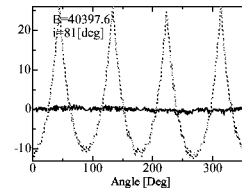


Fig.14 Comparison of normalized outline graphs of circle and square

- (1) 類似度の閾値の大きさを決定する．
- (2) 成形を行なう毎にその変形形状を撮影する．次に，他のノードの形状との類似度を計算する．
- (3) 類似度が現存するどのノードに対しても閾値以上の値ならば，新たなノードとして変形推移グラフに加え，同時に新しいノードへのアークを生成する．もし類似度が1つ，あるいは複数のノードに対して閾値以内となった場合，最も類似度の近いノードを選択し，そのノードに成形されたとみなす．よってこの時は新しいノードは生成せず，選択したノードまでのアークのみを生成する．
- (4) (2)～(3)を繰り返しながら成形を行い，変形推移グラフを作成する．

6. 変形推移グラフを用いた成形制御則

本節では，5節で述べた変形推移グラフを用いた，成形制御則について提案する．成形は以下の手順で行う．

- (1) 目標の形状から正規化輪郭グラフを計算する．そして各ノードとの類似度を算出し，最も類似度の小さいノードを目標ノードとする．Fig. 15においては，目標ノードは N_{16} である．

- (2) 次に各ノードにおける準目標ノードを設定する。準目標ノードとは、変形推移グラフ中の其々のノードにおける成形可能な目標となるノードである。ここで、目標とされるノード N_{16} に到達することのできるパスを持っている全てのノードは、Fig. 16に示すように準目標ノードを N_{16} とする。このとき、 N_4 や N_7 などはまだ準目標ノードが設定されていない。そこで準目標ノードが設定されていないノードのなかで、目標形状との類似度が最も低いノードを調べる。そのノードは N_{24} である。そのノードに到達することのできるパスを持っている全てのノードは、準目標ノードを N_{24} とする。以上のように全てのノードにおいて準目標ノードが設定されるまで以上の作業を繰り返し行なう。最終的に、Fig. 17が得られる。
- (3) 現在のレオロジー物体の形状を計測する。変形推移グラフ上の全てのノードとの類似度を計算し、現在の形状が変形推移グラフのどのノードであるかを決定する。
- (4) 現在のノードと準目標ノードが一致するかどうかを確認する。一致するならば、目標の形状に到達したか、または可能な限り目標の形状に成形されたとみなし、成形作業を終了する。
- (5) 現在のノードから準目標ノードまでの最短のパスを変形推移グラフから求める。
- (6) (5) で求めた最短のパス上の先頭のアークを実行する。
- (7) (3) に戻る。

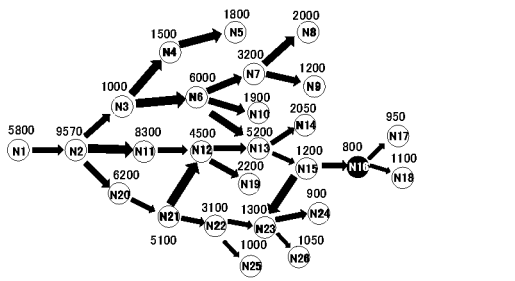


Fig.15 Calculations of similarity between target shape and each node on deformation Transition graphs

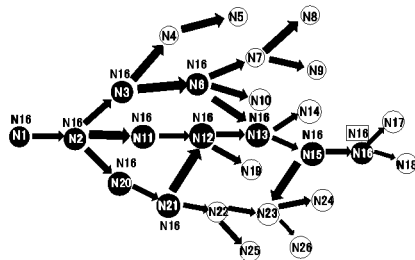


Fig.16 Establishment of semi-target node on deformation Transition graphs

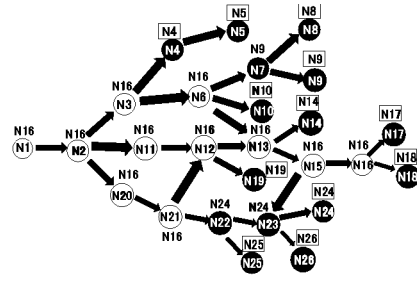


Fig.17 Establishment of semi-target node on deformation Transition graphs (completed)

7. おわりに

本研究では、レオロジー物体の成形を対象として多自由度成形メカニズムを試作した。次にレオロジー物体のモデリング法を示し、シミュレーションと実際の物体での変形形状を比較し、その有効性を示した。さらに、レオロジー物体の変形推移グラフを導入し、変形推移グラフの作成方法を述べた。また、変形推移グラフを用いた成形制御則について提案した。今後は多くの成形過程での変形実験から、変形推移グラフの作成を行い、先に提案した制御則で成形制御を試みる。

参考文献

- 1) D. Terzopoulos and K. Fleisher: "Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture", Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.269-278, 1988
- 2) A. Joukhaider, A. Deguet and C. Laugier: "A Collision Model for Rigid and Deformable Bodies", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.982-988, 1998
- 3) Y. Chai and G. R. Luecke: "Virtual Clay Modeling Using the ISU Exoskeleton", Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp.76-80, 1998
- 4) P. M. Taylor, et al: "Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials", Springer-Verlag, 1990
- 5) Y. F. Zheng, R. Pei and C. Chen: "Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2598-2603, 1991
- 6) T. Wada, S. Hirai and S. Kawamura: "Indirect Simultaneous Positioning Operations of Extensionally Deformable Objects", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, October, 1998
- 7) 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4回ロボティクスシンポジア, pp.224-229, 1999