力覚と分布触覚を用いた ロボットハンドによる不定形物体の整形制御

非会員 佐々木 道男（東海大学）

正 員 増田 良介（東海大学）

Shaping Control of Plastic Object by Robot Hand with Force and Matrix Tactile Sensor
Michio sasaki, Non-meber Ryosuke Masuda, Member (Tokai University)

The purpose of this paper is to realize the dexterous manipulation by a robot hand with multi-sensor processings and control. Here, the shaping of a plastic object to the objective shape is treated as an example of dextrous manipulation task. The four-fingered hand mechanism and the sensing system of the robot hand for the shaping task are discussed. A force sensor and a matrix tactile sensor are used to detect the characteristics of the object and the shape of the object in the robot hand. For the processings of multi-sensor information, the concept of sensor fusion is adopted.

By the experiments of clay shaping to the shape of sphere or cube, the effectiveness of the proposed multi-sensor control method is confirmed.

キーワード：整形制御、ロボットハンド制御、デキストラスマニピュレーション、センサ融合、不定形物体

1. 概要

最近ロボットが多様な方面で用いられ、その作業機能として人間に近い能力を要求されるようになった。人間が未知の物体や壊れ易い物体を扱うことができるのは、器用さを備えているからであり、人間に代わって手作業を実行するロボットには器用なハンドが不可欠である。ロボットハンドに器用さを付与するためには、機構的な自由度柔軟性とセンサ制御による状況適応性が必要である。⁽¹⁾

本研究は、センサ制御による器用さをもつロボットハンドの制御システムをマルチセンサ融合の考え方を用いて構成することを目的としている。そのために、柔軟でかつ変形し易い「不定形物体」を特定形状へ整形することを器用な動作の例として取り上げ、その実現を試みている。

本論文では、まず不定形物体をロボットハンドにより特定の形に整形する作業に必要なメカニズムとセンサ情報処理の問題について検討する。次に具体的な整形方法と、そこでの力覚・分布触覚・内界センサの融合処理および制御手法を提案する。さらに、それらの実験結果を示し本手法の有効性を確認する。

2. 不定形物体のハンドリング

〈2. 1〉 不定形物体 「不定形物体」とは、一般に植物や土石などの自然物あるいは食品や化学物質など、同一種でも形が一定でなく、また時間的に変形するものをいう。本論文では、特に外力により容易に変形できる可塑性

の物質をさすことにし、具体的には粘土を取り扱う。

従来、ロボットの取り扱う対象物体は、剛体や粘弾性物体がほとんどであった。しかし、ロボットがいろいろな分野で利用されるようになると、食品や生体を取り扱う場合のように、一部に塑性あるいは脆性をもつ物体をハンドリングすることが必要になってくる。^{(2) (3)} このような場合、その目的としては、壊さないハンドリングか、特定の形に整えるハンドリングが考えられる。前者に関しては、すべり覚による紙コップの把持や、把握力覚によって卵を壊さずに掴むなどの動作として実現されている。一方、後者に関しては、做い制御などの軌道制御系を用いて、削ったり押し付けたりすることで形を造るという方法が実用的に用いられている。

しかしながら、この方法ではフィードフォワードの制御となり、ハンド中の把持物体の形状を検出しながら力と位置を制御して任意の3次元形状に整える作業については、一般的な形では行われていなかった。また、このような作業は対象物体の力学的特性が正確にわかっていないことと、形状が時々刻々変化することから、視覚、触覚や力覚などの複数の外界センサおよび内界センサ情報による状況判断が必要であり、それらセンサ情報を有機的に結び付けたセンサ融合の結果に基づく制御が有効である。^{(4) (5)}

〈2. 2〉 不定形物体の整形方法 粘土などの可塑性の不定形物体の整形については、2種類の動作形態が考えられる。その一つは、「掌による整形」であり、図1(a)

のように2つの手のひらを対向させ挟み動作と2次元揺動動作による整形をおこなうものである。もう一つの方法は、「対向する4本の指による整形」であり、同図(b)のように、左右の手の人差指と親指を直交させて物体を把持し、物体を操りながら整形する動作である。

図1 人間の整形動作の状況

Fig.1. State of shaping task by human hand.

〈2. 3〉 粘土の特性とモデリング 粘土とは、次のような特性・性質を持つものである。⁽⁶⁾

- (1) 微細な土粒子から構成される。
- (2) 粘着性を示し、可塑性を示す。
- (3) 粒子のあいだの水分により柔らかさが決まる。

このように粘土は、元々含まれている土の粒子に起因する特性と、そのときの水分の含有率によって変化する特性とを合わせ持っている。従って、ある粘土をハンドリング対象として取り扱おうとしたとき、その力学的特性の具体的な数値は初期状態では全く未知であるといつてよい。また、いったん整形などの動作を通してその特性が明らかになったとしても、動作中に特性が変化していることも多い。

可塑性をもつ物体の力学的性質は、一般に図2のように示される。図の(a)は応力と歪速度の関係、(b)はそのモデルである。塑性とは、固体に外力を与えて変形させた後、外力を取り除いてもその変形が永久ひずみとして残るような特性をさす。この永久ひずみは、外力(応力) F がある値 F_0 を越えたときに発生する。

図2 粘土の特性とそのモデル

Fig.2. Characteristics and model of a lump of clay.

〈2. 4〉 粘土情報に関する基礎実験 以上のような特性を持つ粘土の各パラメータの取得について考えてみる。

- ① 降伏点までの粘弾性特性
- ② 流動を発生したことの判定
- ③ 塑性モデルの塑粘性の推定

①については、粘土の姿勢を変えるための把持では弾性領域内で実行する必要がある。この弾性係数 k については、押し付け力を段階的に増加させていくときに、力 F の増分 Δf に対する変位 z の増分 Δz の比で求められる。

$$k = \Delta f / \Delta z \quad \dots\dots(1)$$

②については、流動の発生を判定しそのときの力の絶対値 F_0 を求める。流動の発生は、力の増分に対する変位の増分が一定でなく増加し続けようとしたときである。このとき、接触面積 A の増加分を判断条件として加える。すなわち、 k_s および k_a をある定数として、次式で求める。

$$F_0 = (\min F : \Delta z / \Delta f > k_s \text{ and } \Delta A > k_a) \quad \dots\dots(2)$$

③のパラメータは塑粘性 η であり、②の時点以降の物体表面の変形の微分値を用いて求める。

$$\eta = F \cdot T / \Delta z \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 T はサンプリングタイムである。

実際の粘土について平行板による押し付け力と変位の関係を実験的に求めた結果を図3に示す。この図で示されるように、弾性と塑性の境界は明確ではなく、押し付け力を増加したときと減らしていくときでヒステリシス特性になっている。従って、塑粘性パラメータは測定不能であり、以後の制御では未知として実行しなければならない。

図3 粘土の特性測定結果

Fig.3. Measurement of clay characteristics.

3. ロボットハンドによる粘土の整形

〈3. 1〉 整形問題 立方体を初期状態として、ロボットハンドで角を押しつぶしていくことによって球にする場合が「球整形」であり、その反対に球体を指の平面で押しながら立方体にする場合が「立方体整形」である。先に示した2つの方法のどちらでも両方の整形が可能であり、掌の機構での整形が実現されている。⁽⁷⁾ 本論文では、両方の整形を4本指ハンドに対応させて考えることにする。⁽⁸⁾

図4 4本指による整形動作

Fig.4. Shaping motion by four-fingered hand.

指を用いた立方体整形においては、片方の姿勢制御用ハンドで対象物体の姿勢を次々と回転しながらもう片方の整形用ハンドの指で押し付けることにより整形する。この整形を実現する機構と動作の概要を図4に示す。

（3. 2） ロボットハンドとセンサ系の構成

図4の方法による整形ハンドとして、図5のような構造の4本指ハンドを設計製作した。このハンドシステムは、対象物体の把持と姿勢の制御を行わせる左右方向のハンド（姿勢ハンドと呼ぶ）と、実際に物体に力を加えて変形させるための上下方向のハンド（整形ハンドと呼ぶ）をもっている。姿勢ハンドは指表面の回転ポストで把持物体をX軸回りに回転させることができ、さらにはハンド自体がY軸回りに回転する機能を有している。

この4本指ハンドのシステムでは、整形ハンドには歪ゲージによる把握力センサと感圧導電性ゴムを用いた分布圧覚センサが取り付けられており、把持位置センサとともに用いて整形状況の情報を得ることができる。分布型センサは、32×32の検出点をもち8ビットで加圧力値を独立に検出する。検出走査時のまわりこみ電流は防止されており、正確な一点の値が検出される。

姿勢ハンドには対象物体を適切な把持力で把持するための歪ゲージによる把握力センサが取り付けられており、その他に把握方向の変位センサおよびX軸・Y軸回りの回転角センサが取り付けられている。

図5 4本指ハンドのシステム
Fig.5. Four-fingered hand system.

（3. 3） 整形のための知識ベース 人間の指先による粘土整形動作を観測することによって、整形の基本的知識を抽出し、知識ベースとして蓄積してロボットハンド制御アルゴリズムの構築に利用する。この整形についての知識とは、例えば次のような事項である。

- （1） 一定力押し付けでは角を効果的に取ることができない。また、鋭いエッジを作ることができない。
- （2） 一定位置押し付けでは、過大な力がかかることがある。また、変形が不足することがある。
- （3） 対象の姿勢を適切に制御して、加圧する面を正しく決めないと整形を効率よくすすめられない。
- （4） 右手と左手の協調による順序動作で実行される。

これらの条件から次節以降に述べるように、まず基本的な整形手順を決定し、さらに、2で検討した粘土特性と幾何学的条件から制御パラメータの基準値の設定を行う。

（3. 4） 整形のためのセンサ情報処理 取り扱っている粘土の力学モデルの不明確さが前節で明らかになったので、次に整形制御のための状況判断と、押し付け力と指変位の制御手法をセンサ情報処理から考える。

このシステムにおいてはハンド各部の変位、角度の値が検出され、さらに分布触覚からの接触形状と接触面積および把握力覚からの押し付け力が検出される。それらの情報と粘土の基本モデルから、ある時点での粘土の整形状況の判定をおこない、その結果を基に姿勢制御のための各自由度の変位・軌道と押し付け力操作量の生成をおこなう。本研究では、複数のセンサからの計測値または特徴値 $p_1, p_2, p_3, \dots$ を用いて、ある関数 $f(p_1, p_2, p_3, \dots)$ の形で整形状況と操作量を数値化して求めている。この関数をここでは融合関数と呼び、単純なセンサ融合処理と考えている。具体的な関数形は、4. と5. で示す。

図6は、複数のセンサとセンサ信号の流れ、および融合処理によって抽出される情報の関係を示した図である。

図6 マルチセンサ情報処理
Fig.6. Multi-sensor system of shaping hand.

4. ロボットハンドによる球整形

（4. 1） 球整形アルゴリズム 立方体から球への整形においてはまず、把持物体の整形形状を計測判断する形状認識フェーズと、その結果により整形動作を行うための整形制御フェーズを繰り返しながら、ハンドを制御することにより、球を形作ることができる。その手順を図7のフローチャートで示す。

（4. 2） 球整形認識フェーズ 立方体から球への整形状況を表す整形度 Ssl を、ハンドの間隔 z （片側の指位置をゼロとすれば、他方の指位置が間隔を表す）と粘土の体積 V を用いて次式で定義する。

$$Ssl = (\pi / 6) z^3 / V \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 V の値が未知の場合、最初の数回の押し付けにおける接触面積 Aj と z 軸変位 zj との積の平均値から求められる近似体積 Vp を用いる。

$$Vp = (1 / n) \sum (Aj \cdot zj) ; j=1 \text{ to } n \quad (5)$$

ところで、この整形度は整形の初期段階では1の上下の値を繰り返し、最終的に1に収束する。従って、 Ssl が1

図7 球整形手順のフローチャート
Fig.7. Flow chart of sphere shaping algorithm.

になっていることだけでは、必ずしも球になっていると判定できない。そこで、ある一定期間の整形におけるハンドの間隔の最大値 z_{max} と最小値 z_{min} を用いて、補助的な整形関数 $Ss2$ を定義する。

$$Ss2 = (z_{max} - z_{min})^2 + Am \quad \dots\dots(6)$$

ただし、 Am は接触面積の平均値である。 $Ss2$ の値は初期状態で最大値を取り球に近づくときゼロに近い値となる。整形終了判断は $Ss1$ と $Ss2$ の両方の条件によって行う。

〈4. 3〉 球整形制御フェーズ 4本指ハンドによる整形では、はじめの過程において一定の力で把持しつつ物体を回転させ、一周したときの z 軸変位の最大値 z_{max} 、最小値 z_{min} 、すなわち、物体の最大幅と最小幅を取得する。そして整形のための押し付け力操作量 Fs を、接触面積 A 、押し付け位置 z の情報から次の関数を用いて定める。

$$Fs = A \cdot a \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \exp[(z - zq) / b]} \right\} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 a 、 b は定数であり、それぞれ取り扱う粘土の流動限界力と、弾性係数から実験的に値を与える。

上式において、 zq は押し付け位置の基準値であり、同一体積の立方体の対角線と球の直径との比率をもとに、次式で与える。

$$zq = [2 \cdot z_{max} + z_{min}] / 3 \quad \dots\dots(8)$$

最終的には、 $Ss1 \approx 1$ 、 $z_{max} \approx z_{min} = (\text{球の直径})$ 、 A は小さい値で収束する。

〈4. 4〉 球整形の実験結果 4本指ハンドを用いて球整形の制御実験を行った。その結果の押し付け力 F 、接触面積 A 、ハンド位置 z の時間変化を図8に示す。数回の押し付けで力と面積値が急激に変化し、その後は一定範囲で小さく変化する状態となった。提案した整形度を計算した結果の変化を示すと図9のようになった。この結果、整形度 $Ss1$ が1に近く、かつ $Ss2$ がゼロに近い球を整形することが可能であった。ただし、球に近くなるほど整形面が

多くなっていくので、整形の時間が長くなる。

なお、図8は、図7の各段階についての離散的なデータとなっている。すなわち、粘土の整形動作の後姿勢ハンドによる回転運動が入るため、その間の各データは意味をもたず図では押し付け時点の各データのみ接続して表示している。従って、時間の絶対値は結果には示していない。なお、整形完了までの時間はおよそ45分であった。

図8 球整形の実験結果
Fig.8. Experimental graph of shaping to a sphere.

図9 球整形における整形度の変化
Fig.9 Change of shaping factor at sphere shaping.

図9において整形度 $Ss1$ は整形動作時に、整形度 $Ss2$ は整形動作4回毎に計算して求めた結果である。

5. ロボットハンドによる立方体整形

< 5. 1 > 立方体整形アルゴリズム つぎに、球から立方体への整形手順のフローチャートを図 10 に示す。ここでは、姿勢制御フェーズを独立させており、形状認識フェーズと整形制御フェーズとを組み合わせた形となっている。

Fig. 10. Flow chart of cube shaping algorithm.

< 5. 2 > 特性測定と整形認識フェーズ 立方体形状への整形の場合も粘土の整形状況に関しては球整形と同様にして測定する。また、このときの整形度 Sq を、接触面積 A と z 軸変位から次式で与える。

$$Sq = z \cdot A / z^3 = A / z^2 \quad \dots\dots(9)$$

この場合の体積の値 Vq が既知であれば、 z^3 の代わりに Vq を用いることもできる。この整形度は正確な立方体の時に 1 になるが、物体がつぶれて接触面積が小さくかつ指幅が小さいと近くなったとき 1 になってしまうことがある。従って、形状判定では 90 度ずつ異なる 3 つの方向での整形度が全て 1 に近ければ立方体と判定する。

最後に分布触覚により整形形状が正方形に近いかを確認し、 z 軸変位と力が収束していれば整形完成と判定する。

< 5. 3 > 整形制御フェーズ この制御は球整形制御とは異なり、形状認識フェーズと整形制御の両モードがシーケンシャルに行われる。まず、左右ハンドで把持し、上下ハンドによる押し付けを行う。次に姿勢ハンドの表面にある回転ポストを用いて物体の 90 度回転を行った後整形ハンドで押し付け制御する。これが一周すると今度はハンドの回転により、90 度ずつ別の方向に回転させてその面を整形する。

この押し付け力 F_s は整形度の値をもとに次式によって決定する。ここで、 a および b は特性測定結果から実験的に定めておく定数である。

$$Fs = A \left\{ \frac{a}{1 + \exp [(Sq - 0.5) / b]} \right\} \quad \dots\dots(10)$$

< 5. 4 > 立方体整形の実験結果 立方体整形制御の結果を図 11 に示す。立方体の整形においても姿勢制御が入るので各段階についての離散的なデータとなる。図 11 において、押し付け力および接触面積値の波形は、右上がりの部分が整形制御を行っている状態であり、高さ変位（ハンド幅）はハンドを閉じているため右下がりとなっている。各データの先端の部分の値が整形制御の繰り返しのデータとなる。この場合も時間の絶対値は示していない。

Fig. 11. Experimental data of shaping to a cube.

立方体整形は 90 度回転づつの整形のため比較的効率はよく 27 回の整形動作で、10 分程度で完了している

全ての姿勢で整形度 $Sq = 1$ 、および押し付け力と z 変位の値が一定の変化幅に入れば整形完了状態である。表 1 に整形度 Sq の変化を示す。ここでは、9 クール（繰り返し回数、整形回数は 3 回 × 9 クールとなる）目に全ての面で立方体となったことを示している。

図 11 と表 1 における各データの周期的なアンバランスは初期形状の非対称性によるものである。なお、ラグビーボール状の初期状態の場合でも、同じアルゴリズムで数回の押し付けの後、表 1 の 2 クール目以降と同じ経過をたどり、立方体に整形することができる。しかし極端な初期形状では非対称性が拡大されてしまい、立方体に収束しないことがある。このような場合に対しては、物体の非対称性をもう一枚の分布型触覚センサなどの付加センサで計測し、物体の姿勢を修正しながら形状を対称化する前整形の過程が必要となる。

表 1 立方体整形における整形度の変化
Table 1. Change of shaping factor at cube shaping.

クール数	押し付け回数	整形度 Sq			
1	1	0.80	5	13	1.00
	2	0.83		14	0.91
	3	0.89		15	1.00
2	4	0.92	6	16	1.00
	5	0.93		17	0.97
	6	0.90		18	0.99
3	7	0.96	7	19	1.00
	8	0.96		20	0.96
	9	0.96		21	1.00
4	10	0.98	8	22	1.00
	11	0.94		23	0.99
	12	0.97		24	1.00
			9	25	1.00
				26	1.00
				27	1.00

6 センサ融合処理の効果の検討

ここでは、実験結果からセンサ融合の効果を示す。

(1) 内界情報に接触面積情報を融合し整形度を求めることにより、整形形状の認識が明確にできた。

(2) 力情報のフィードバック制御の制御プロセスを融合関数を用いることにより効率的に行うことができた。

(3) 粘土の状態および初期形状の違いにより、最終形状の精度や繰り返し回数が違ったが、おおむね成功した。

球整形と立方体整形の実験結果の写真を図 1 2 に示す。

(a) 球整形前

(b) 球整形後

(c) 立方体整形前

(d) 立方体整形後

図 1 2 粘土整形の結果

Fig.12. Result of shaping of clay.

なお、整形立方体は角に丸みのついたものとなるが、これは、整形ハンドの平面のみで押し付けを行うため、整形ハンドと姿勢ハンドが直角な面を作りつつ押し付けるような後処理整形の行えるシステムであれば、90度に近い角をもつ立方体を作ることも可能である。

7. 結び

ロボットハンドに器用な動作を行わせるため、4自由度対向指ハンドを構成し、ハンドに設置した分布触覚センサと力センサ、変位センサの各情報の融合処理を行い整形の状況認識、整形のための操作量の生成の方法を確立し、コントロールシステムを構成した。不定形物体としての粘土の整形実験の結果により、システムの有効性を確認した。

今後は、整形成功率や整形度の定量的検討、非対称初期形状への対応、複雑な一般形状の整形への拡張などのより高度な整形制御を実現する研究を進める。

本研究にご協力いただいた、ビー・エル・オートテック株式会社阪東浩二氏に感謝する次第である。また、システム製作および実験に協力された本学、長濱克臣氏（現オムロン（株））、古川淳氏（現（株）東芝）に謝意を表す。

（平成7年4月3日受付）

文 献

- 1)P.M.Taylor; Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials, Springer-Verlag(1990)
- 2)Cutkoosky M.R.; On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks, IEEE TrR&A, Vol.5 No.3, pp269/279(1989)
- 3)Mason M.T.,Salisbury J.K.;Robot hands and mechanics of manipulation, MIT Press Cambridge MA(1985)
- 4))R.C.Luo and M.G.Kay; Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems, IEEE trans. SMC Vol.19 No.5 pp901/931(1989)
- 5)ロボットのセンサ統合・融合システム研究専門委員会 報告書、日本ロボット学会(1991)
- 6)小野木重治；レオロジー要論、槇書房(1957)
- 7)長濱、増田；第9回R S J 学術講演会、3611(1991)
- 8)佐々木、長濱、増田；S I C E 学術講演会 (1993)

佐々木道男 （非会員） 1968年11月3日生まれ。1995年東海大学大学院修士課程電気工学専攻修了。ロボットのセンサ制御に関する研究に従事。現在、バブcock日立（株）勤務。

増田 良介 （正員） 1946年5月26日生まれ。1971年東京工業大学大学院修士課程制御工学専攻修了。1974年東京工業大学助手。1982年東海大学工学部電気工学科講師、助教授を経て現在教授。工学博士。この間ロボットセンサとロボットの応用システムに関する研究に従事。