

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions



渡辺 哲陽 (Tetsuyou WATANABE, Dr. Eng.)

金沢大学理工研究域機械工学系准教授

(School of Mechanical Engineering College of Science and Engineering, Associate Professor, Kanazawa University)

IEEE 日本機械学会 日本ロボット学会 日本生体医工学会 会員

受賞：2010年4月 日本機械学会奨励賞(研究) 2008年9月日本

ロボット学会研究奨励賞 2005年3月 MAGDA 優秀講演論文賞

研究専門分野：ロボットハンド 歩行解析の医療応用 医療ロボット
マイクロマニピュレーション等

あらまし 本研究では、「物体把持・操作は物体とロボットの間の相互作用の結果である」という観点のもとで、物体把持・操作を生成する手法の開発に取り組んだ。ロボットの各指と物体を別々のシステムととらえることで、対象物が期待通りの物性や形状でなくても、また、目的通りに動作できず失敗したとしても、ロボット自身は暴走しない安全なシステムを構築する。また、相互作用を考慮に入れることで、対象物の物性や形状が未知であっても、動作中に物性や形状が変化したとしても、それに対応する手法を確立する。この方式を適用する一例として物体を望みの形状に変形させる整形動作を採り上げ、その実現に取り組んだ。初めは失敗を繰り返しながら、対象物との相互作用の結果得られる情報をもとに、徐々に動作を改善し、次第に失敗の少ない、目的に合致した動作を生成できるようになる手法を確立する。

1. 研究目的

近年、産業用ではなく、一般家庭や医療現場など、人間活動に近い様々な現場や分野において、ロボット活用が求められている。例えば、高齢者の介護や、QOL向上のための家事手伝い、手術などである。これらの場面で求められるタスクのほとんどに、手によって物を掴み動かすという動作が含まれる。このため、ロボットハンド性能向上が、ロボット活用実現のためには必須と考えることができる。

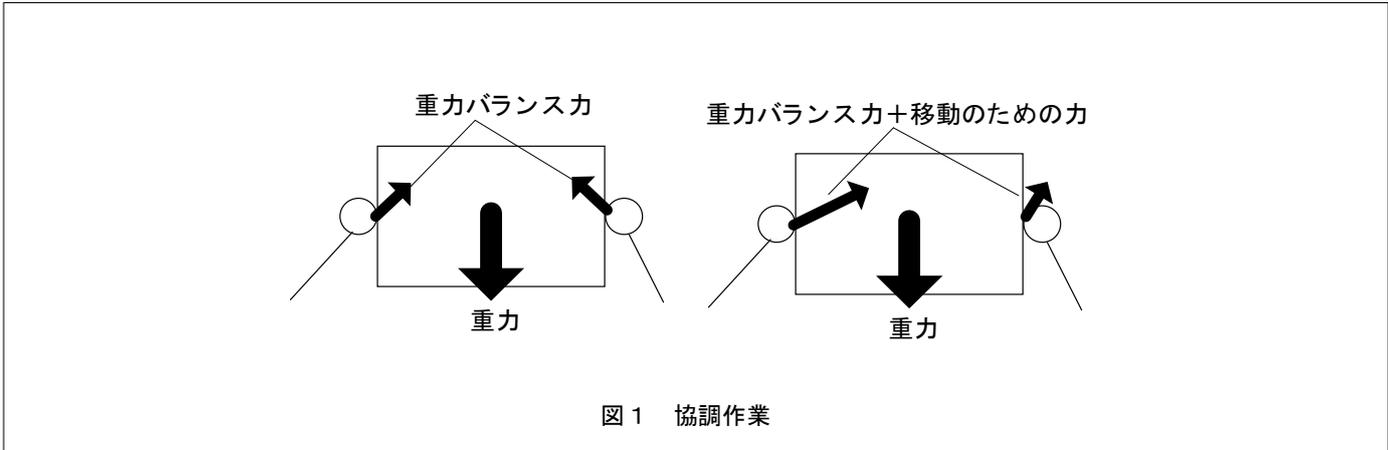
ロボットハンドにより物体を操作する場合、二通りの捉え方がある。一つはロボットハンドと対象物全てを一つのシステムと考える捉え方で、もう一つは、ロボットハンドの指一つ一つならびに対象物を別個のシステムとして扱う捉え方である。一般には、前者の捉え方で捉えられる。指の協調動作が必要であるからである。例えば、協調することで、物体の重量を支えたり、物体を移動したりする(図1)。このため、一つ一つの指、対象物に着目するのではなく、全体としてシステムを考えることで、物体把持・操りを実現してきた。

この手法は、一つ一つの指、対象物に関する正確な情報が分かっていることを前提としている。このため、対象物の形状や重さが、期待通りのものでないと、対象物を掴めないことがある。極端な場合では、ロボットが暴走することもある。言い換えれば、このような方策は、人間生活の場ではたらくロボットには相応しくないとと言える。では、どのような方策がよいのであろうか？システムのもう一つの捉え方に着目する。各指、対象物を別々のシステムと考える捉え方である。この場合、各指は別々に動作するため、対象物に変形したり、物性が急に変わったりしても、暴走することなく動作させることが可能である。仮に物体操作に失敗したとしても、ロボットが暴走することはない。しかし、協調を行わないなら、どのような方策で、物体把持・操作を実現したらよいのか？という疑問が生じる。本研究では、各指と物体との間の相互作用の結果として物体把持や操作を実現できると考える。この考えに基づいた物体把持・操作のための動作生成実現を目的とする。

より具体的には、特性と形状が未知の柔軟物体を望みの形状に加工(以降整形と呼ぶ)する技能に着目し、

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions



これをロボットハンドにて実現することを目的とする。整形動作では、物体操作に伴い、形状変形、物性（弾性や粘性などの）変形が起こる。このため、動的に変化する対象を扱う必要がある。ロボットは、一般に言って、既知環境下において同じ動作を精密に繰り返すことは得意であるが、環境や対象がダイナミックに変化することに対処するのは不得意である。このため現状では、既知環境下の既知対象物を扱う研究^{(1),(2)}が大半を占めている。既知対象物を完璧に扱うことも必要であるが、動的に変化する対象を扱うことができるようにすることも、性能向上には必須である。動的に変化する対象の場合、“予定通り”にいかないケースが数多く存在する。この想定外に対処するためには、前述のとおり、相互作用の結果として物体操作を生成する手法が有効である。このことを鑑みて、本研究では、整形動作の実現を目標とする。この後の構成を以下に示す。まず、研究背景において現在までのロボットハンド研究についてその概要について述べる。その後、ロボットの各指と対象物を別々に扱うための行動生成モジュールについて述べる。この行動生成モジュールは今回対象とする整形動作以外にも適用可能であることを追記しておく。その後、対象とするシステムと目標行動、実現のための方法論、結果について述べる。

2. 研究背景

ロボットハンドによる物体把持・操りの研究の理論的枠組みは、吉川の把持と操りの基礎論⁽³⁾に詳しい。また、2000年以前の研究に関しては、Bicchiの解説

記事⁽¹⁾がある。近年、人間生活の近くでのロボット活用が求められるようになってきており、ヒューマノイド型ロボットの手先効果器として、ロボットハンドの重要性が高まっている⁽²⁾。最近では把持のプランニングを行うシミュレータも数多く編み出されており、graspit⁽⁴⁾やopenrave⁽⁵⁾がその代表例である。2010年のInternational Conference on Intelligent Robots and Systemsでは、Grasp Planning and Task Learning by Imitationというワークショップが開かれている。生活の場で、ロボットハンドにより物体把持を行う方策として主にとられている方法は以下の通りである。

1. カメラ（及びレーザレンジファインダなど）でロボット周辺の情報ならびに把持対象物の情報を得る。
2. 得た情報をもとに、把持対象物の形状モデルを作成する。
3. 把持対象物の形状モデルをもとに、どこで物体を持てばよいかの計画を行う。
4. 計画に基づき、把持実現のためのロボットアームの軌道を生成する。

1では、カメラ他により、把持対象物の3次元情報を得るが、通常、点の集まりのようなデータとなるため、これを線や面などで表現した対象物モデルを獲得する必要がある。このため、2において形状モデル作成の手順が必要となる。ただし、複雑な形状の対象物は取扱いが難しいため、バウンディングボックスで近似する、取り扱いやすい形状の集合体として対象物を表現するなどの工夫がなされている。得られた対象物

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

形状をもとに、物体把持計画問題を3にて解く。得られるのは実際に把持をするための把持姿勢や把持位置である。その把持位置・姿勢にロボットハンドを実際に（周辺にあるテーブルの角などにぶつからないように）移動させるための計画を4にて行う。以上が概略である。現状では、ロボット以外は何も動かないことを前提としており、動的に変化する対象に対する対処はなされていない。把持・操作に必要な接触力に関する議論はほとんどなされていない。また、上記は、ロボット、対象物を含めたシステムを一つとらえて考えており、“予定通り”にいかないことが無いことが前提となっている。

3. ロボットハンドによる物体整形

3.1 行動生成モジュール

図2のような階層構造からなるアーキテクチャを作成する。上位層では、“望みの相互作用”の実現を目指し、下位層のセンサモジュールからのセンサ情報をもとに、目標値情報を下位層の各指の制御モジュールに送る。各指の制御モジュールでは、指令に基づいて“目標状態に移行しようとする動作”を生成する。センサモジュールでは実際の動作における各指や対象物の情報を得るためのセンサ群（カメラ、力センサ、エンコーダ）からの情報を得る。今、一例として、物体に対して指から力を作用させることを、目標動作として考える。このプランニングは、上位層にて行う。上位層では、この目標動作を実現するための“位置の目標値”を各指センサモジュールに対して送る。物体と接触す

れば、ロボットは静止し、目標状態に近づけない分だけ、物体に力を及ぼすこととなる。この力の分を考慮した“位置の目標値”を下位層に送る。物体と接触しない場合には、送られた通りの“位置の目標値”を実現する動作が生成される。物体に力を作用させるための力制御の場合とは違い、不安定になったり暴走したりすることは起こらない。なお、実現される動作は、上位層にとっては目標通りであるが、下位層にとっては目標通りとは限らない。以上のような階層構造に基づき、物体操り動作を生成する。

3.2 対象とするシステムと目標行動

図3に対象とするシステムを示す。ロボットは、物体を整形するための2軸ロボット2台と、整形の際、物体を押さえるためのロボット、合計3台のロボットから構成される。整形用ロボットの手先には3軸の力センサが取り付けられ、物体に加える力を計測できるようになっている。また、各軸にはエンコーダが配備され、各軸の角度を計測できるようになっている。一方で、カメラにて対象物形状やロボット手先位置を計測する。以上の力、角度、位置や形状などの計測情報を行動計画モジュールに送る。行動計画モジュールで計画されたロボットの目標位置をロボットに対して送る。ロボットはそれに基づいて、各軸に配備されたモータに指令を送ることでロボットを動作させる仕組みである。

このシステムをもとに、図4に示すように、ロボットの目の前に置かれた任意形状で、物性値が未知の対

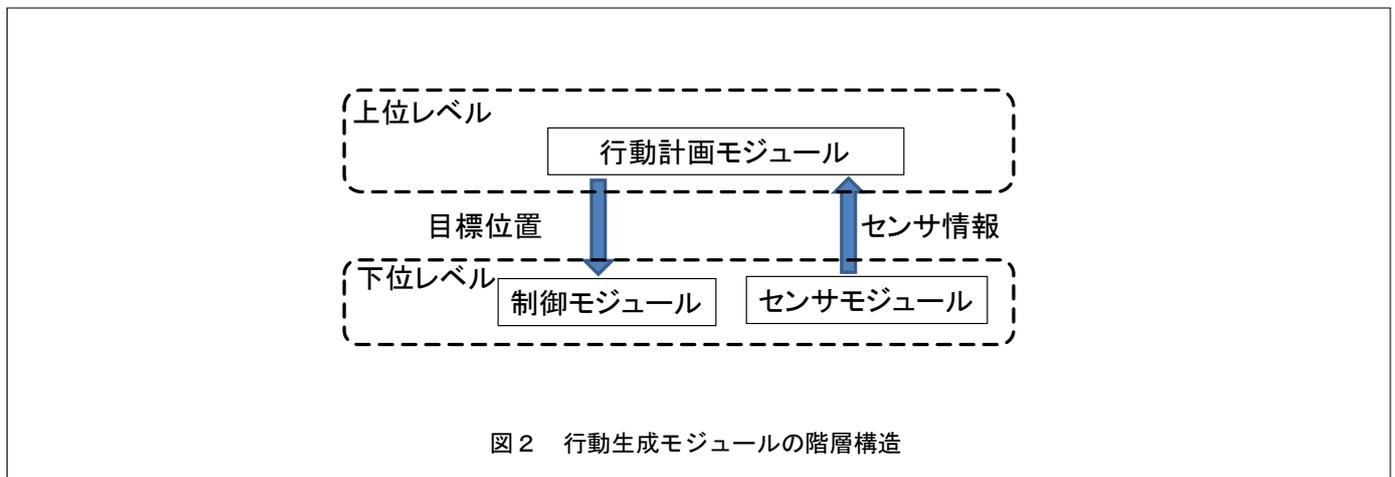
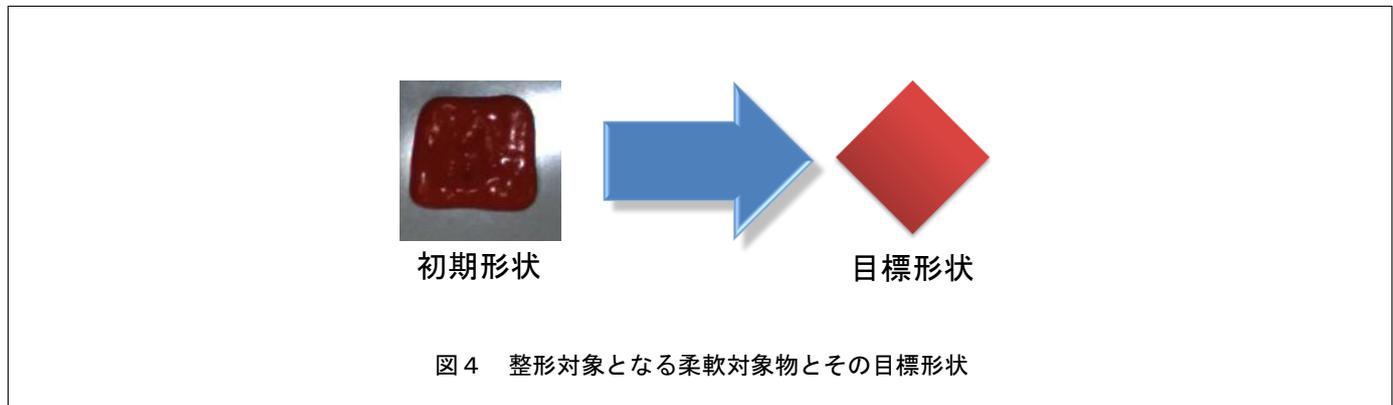
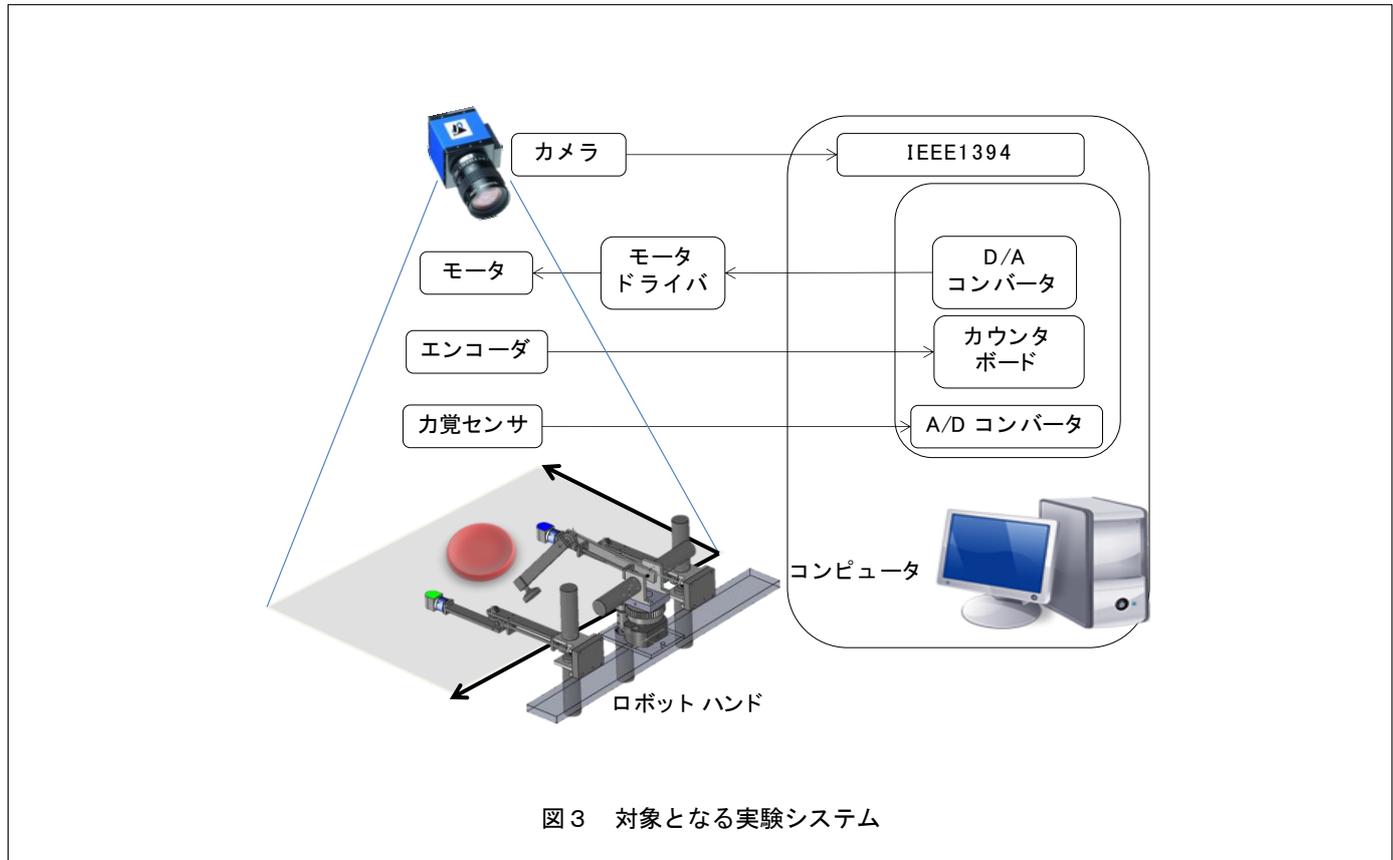


図2 行動生成モジュールの階層構造

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions



象物を望み（今回はひし形）の形状に整形する行動を実現することを目的とする。目標形状は凸多面体とし、その大きさ（面積あるいは体積）の差異は考慮しない。大きい対象物が与えられれば、それに応じた大きな面積あるいは体積を持つ形状が目標となる。

ここで言う行動とは、一つの動作ではなく複数の動作から構成される一連の動作のことを意味する。本研

究では、対象物体との相互作用を繰り返すことで、物体の様々な情報を得ながら“より良い”動作の生成を次第に生成できるようにし、これを繰り返すことで最終的に目的行動を実現することを目的とする。これにより、対象物の形状や物性値が未知であっても行動を実現することが可能となる。

この目的行動実現のため、解決しなければならない

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

事項を以下にあげる。

1. 目標形状と実際の物体形状を比較する手法
2. 整形部位を決定する方法
3. 整形動作の生成
4. 物体物性値の推定
5. 個々の失敗動作を許容できるシステム

以下では、まず行動を実現するための全体アーキテクチャについて述べ、次いで上述の解決すべき課題について述べる。

3.3 行動生成アーキテクチャ

図5に整形行動実現のための動作生成手順を示す。カメラからの情報をもとに対象物形状データを行動計画モジュールに送る。行動計画モジュールでは、この情報をもとに、目標形状と実際の形状を比較する。目標形状に十分に近ければ、行動終了の判定を下す。そうでなければ、物体を目標形状に近づけるための整形動作を生成する。整形動作は、主に二要素に分けることができる。整形開始位置にロボットを移動させる動作と、物体の形状を実際に変形する動作である。行動計画モジュールでは、センサモジュールからの情報をもとに対象物の目標形状と実際の形状を比べ、整形すべき場所を特定する。次いで、その場所に移動するための動作指令を、ロボットに対して送る。その一方で、

目標形状と実際の形状の差異から整形すべき量を決定する。この整形量に基づいた動作指令(位置の目標値)をロボットに対して送る。ロボットの方では、送られた動作指令(位置の目標値)に従って動作を生成する。以上を繰り返すことによって物体を望みの形状に変形する。以下では、各項目についてより詳細に述べる。

3.4 目標形状と実際形状の比較

動作を生成するべきかどうかを判断するための基本となる手順である。図6に示すような対象物の領域が1で、それ以外は0の画像情報を用いて判断する。本研究では、対象物の体積あるいは面積は気にしないので、輪郭に着目する。目標形状は凸多面体ゆえ、輪郭は線分の組合せで表現される。図7に示すように、各線分に関して、線分自身は1で線分の法線方向に対して線分から離れるにつれ値が小さくなるように線分(輪郭)を表現する。全ての線分を足し合わせることで、輪郭情報を作成する。線分が重なる角では、輪郭情報が大きな大きさを持つことになるが、角が形状にとって重要であるゆえ、正規化などの処理は行わない。得られた輪郭情報は図8に示すようなものとなる。なお、目標形状の大きさ(面積)は実際の対象物形状に合わせて変化させて計算を行う。

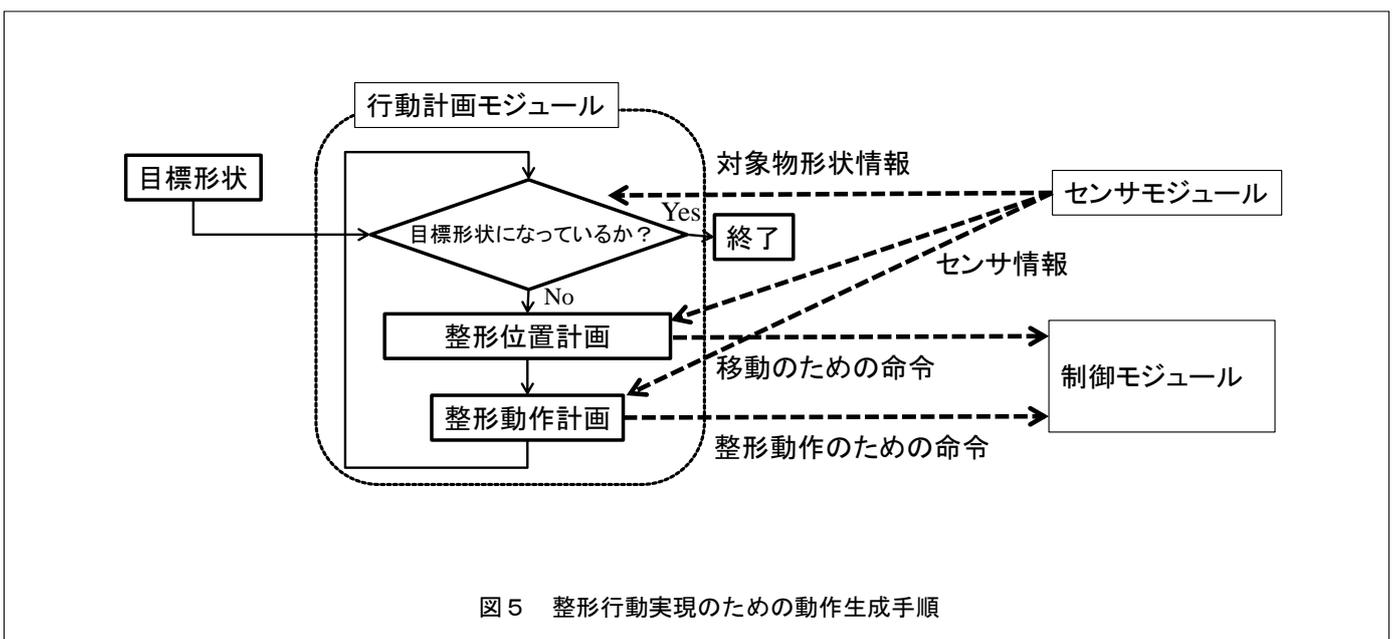


図5 整形行動実現のための動作生成手順

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

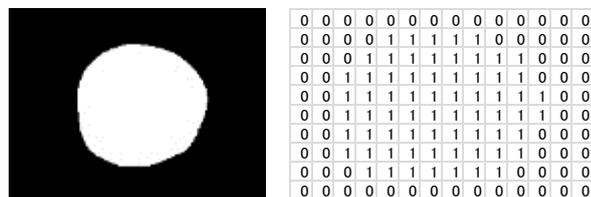


図6 2値化した対象物情報

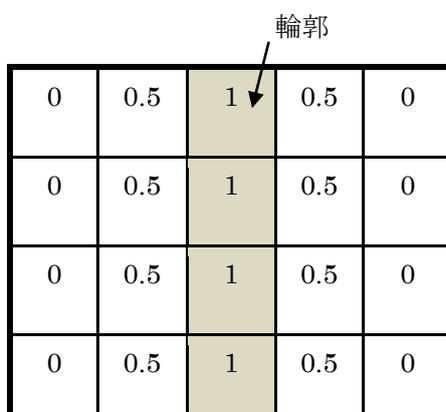


図7 線分の輪郭表現（輪郭の一部を抜粋）

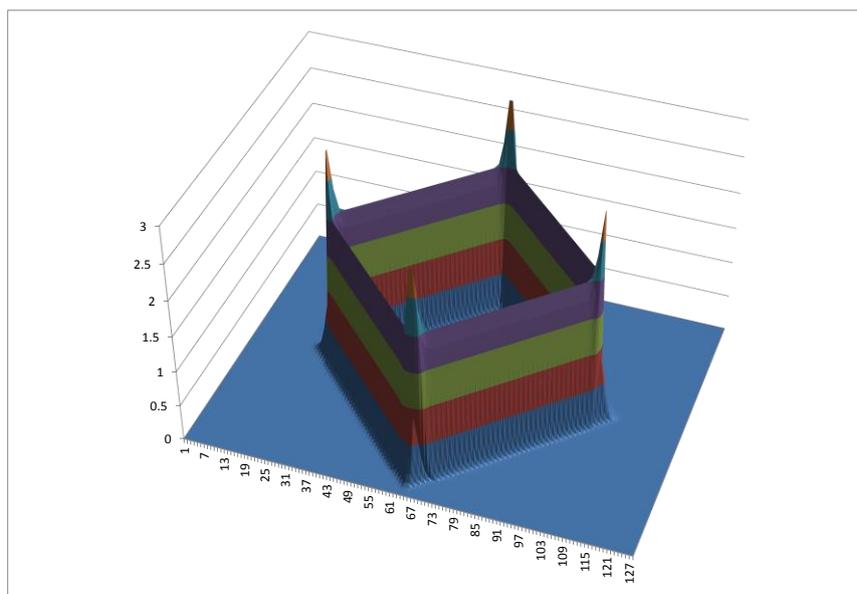


図8 目標形状の輪郭情報

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

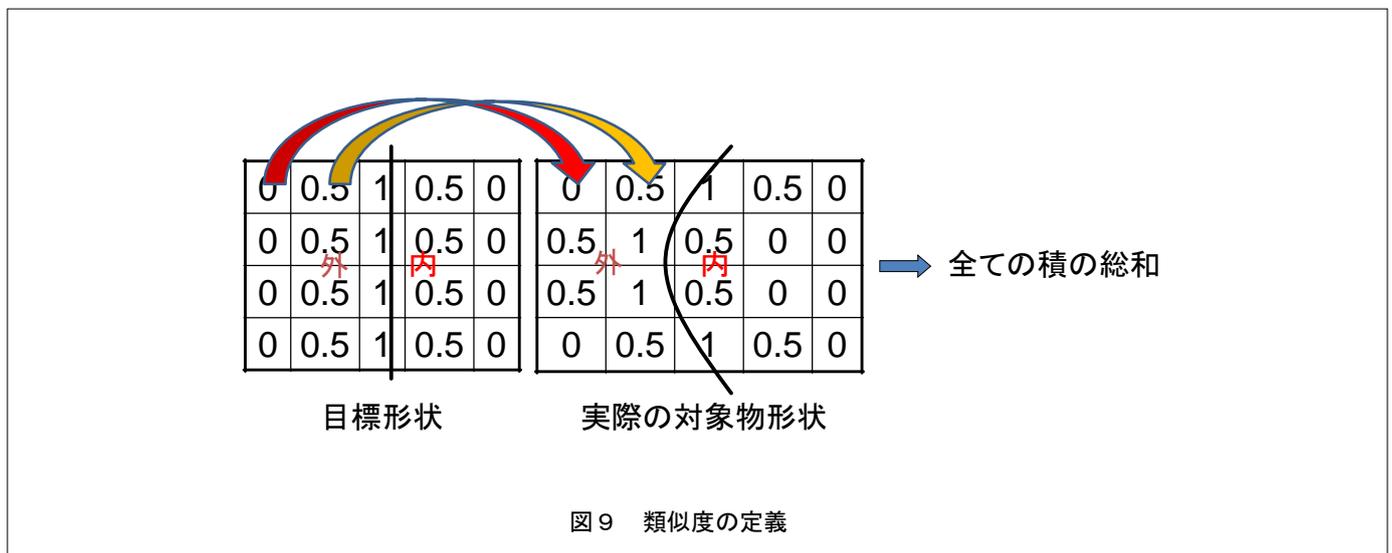
Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

目標形状と実際の対象物形状、両方の輪郭情報（画像）を構築する。その上で、両者の（画像）積をとる。得られた（各ピクセルの）積の総和を計算し、これを類似度として定義する（図9）。類似度が類似しているほど高くなり、類似していなければ低くなる。類似度に応じた対象物の形状を図10に示す。

3.5 整形部位の決定

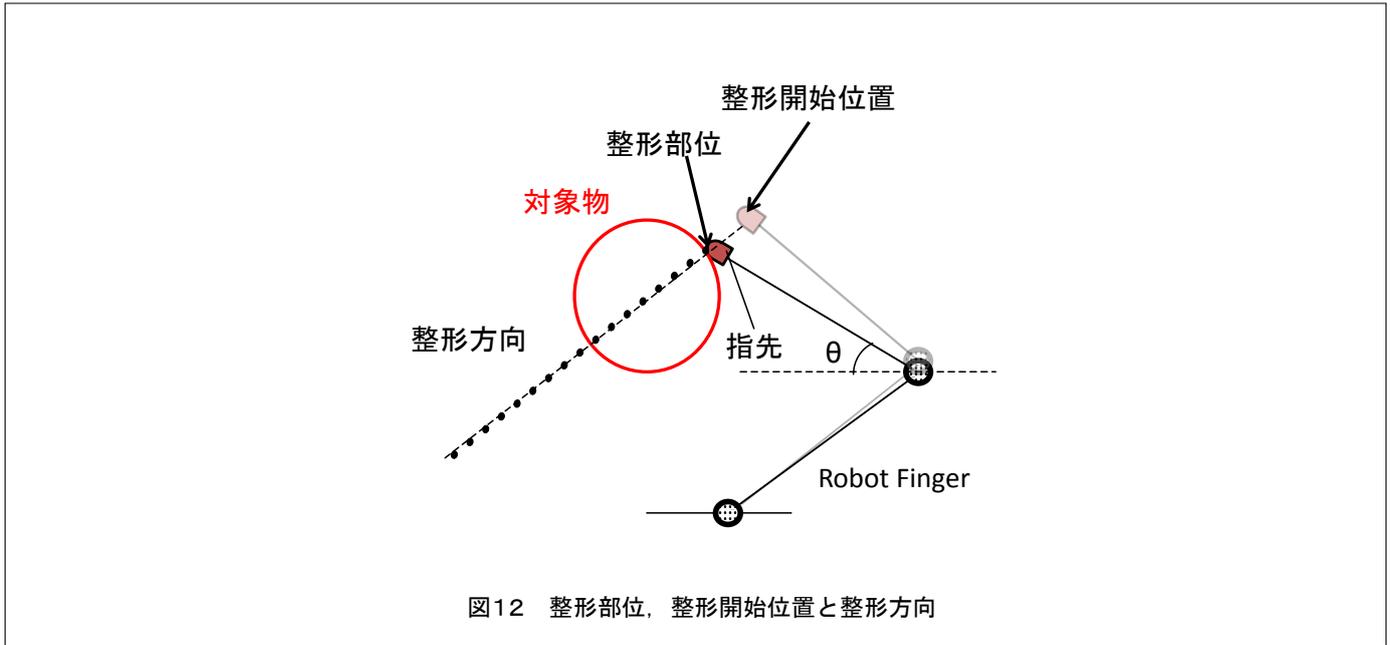
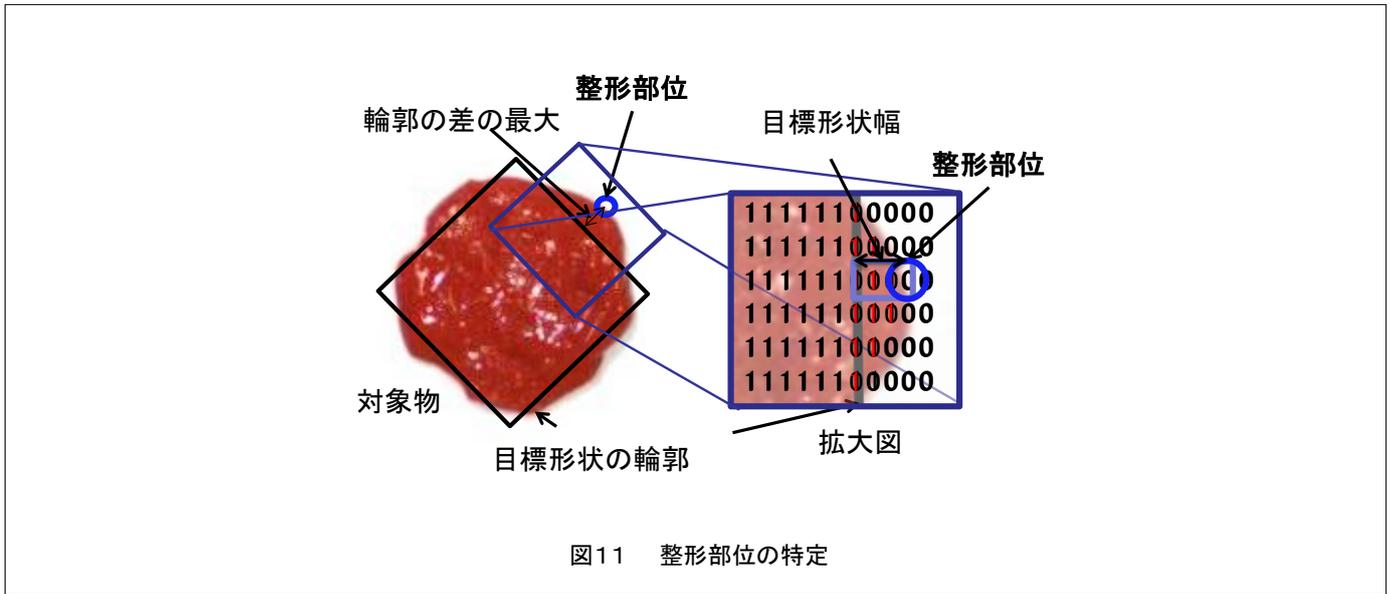
目標形状と比較後、整形が必要と判断されると、次に整形すべきエリアを決定する必要がある。ロボットの手先は、対象物に比べて小さいため、一度に対象物を整形することはできない。ここでは、目標形状

と実際の形状が最も異なる場所を特定し、そこを整形箇所とする、ヒューリスティックな方法をとる。先に述べた対象物領域が1で他が0という画像情報を用いる。図11に示すように、目標形状に関する画像情報と実際の対象物形状に関する画像情報の差を計算する。差が生じる場所のうち、目標形状の輪郭からみて、最も遠い場所（輪郭を構成する線分の法線方向に関して差 $(1-0=1)$ が生じるエリア（距離）が最も大きい（長い）場所）を特定する。これを整形部位とする。実際の作業では、この整形部位を通り、対応する輪郭（を構成する線分）の法線方向を向いた直線を考え、これを整形方向と呼ぶ（図12）。整形動作においては、



ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions



この整形方向にロボットを動かすことで、整形動作を実現する。このため、整形位置から整形方向に一定距離離れた場所（整形開始位置）にロボットの指先を移動させる。移動の際、ロボットの姿勢によっては対象物自身が障害物となってしまう場合がある。このため、ロボットの姿勢を初期値、整形開始位置を目標位置、対象物などを障害物とした上で、軌道計画を行うことで、対象物他の障害物を避けながら整形開始位置にロボット指先を移動させる。

3.6 整形動作の生成

柔軟物体は、粘弾性物体、塑性物体、レオロジー物体の3種類に大きく分類することが出来る。粘弾性物体は外力が作用すると変形するが、解放すると完全に初期形状に復元する。塑性物体は外力を解放しても外力を受けていた状態のまま形状が維持される。レオロジー物体は、図13に示すように外力を解放すると、一部は変形が復元するが、一部は変形したままになる。東森らは粘弾/塑性変形分離に着目し、レオロジー物

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

体を 4 要素モデル（弾性×2、粘性×2）にモデル化することによって、レオロジー物体の塑性変形量をアクティブに管理する手法について提案している⁽⁷⁾。本研究でもこの手法を用いる。整形対象物体を図14に示す 4 要素モデルでモデル化し、塑性変形量を推定する。図14において、 f は対象物との接触力、 k_1 、 k_2 および c_1, c_2 はそれぞれ図中の第 1、第 2 弾性要素および第 1、第 2 粘性要素の弾性係数、粘性係数である。また x_1 を粘性要素 c_1 における変位、 x_2 を弾性要素 k_1 および

粘性要素 c_2 で構成される粘弾性要素における変位、 x_3 を弾性要素 k_2 における変位とする。

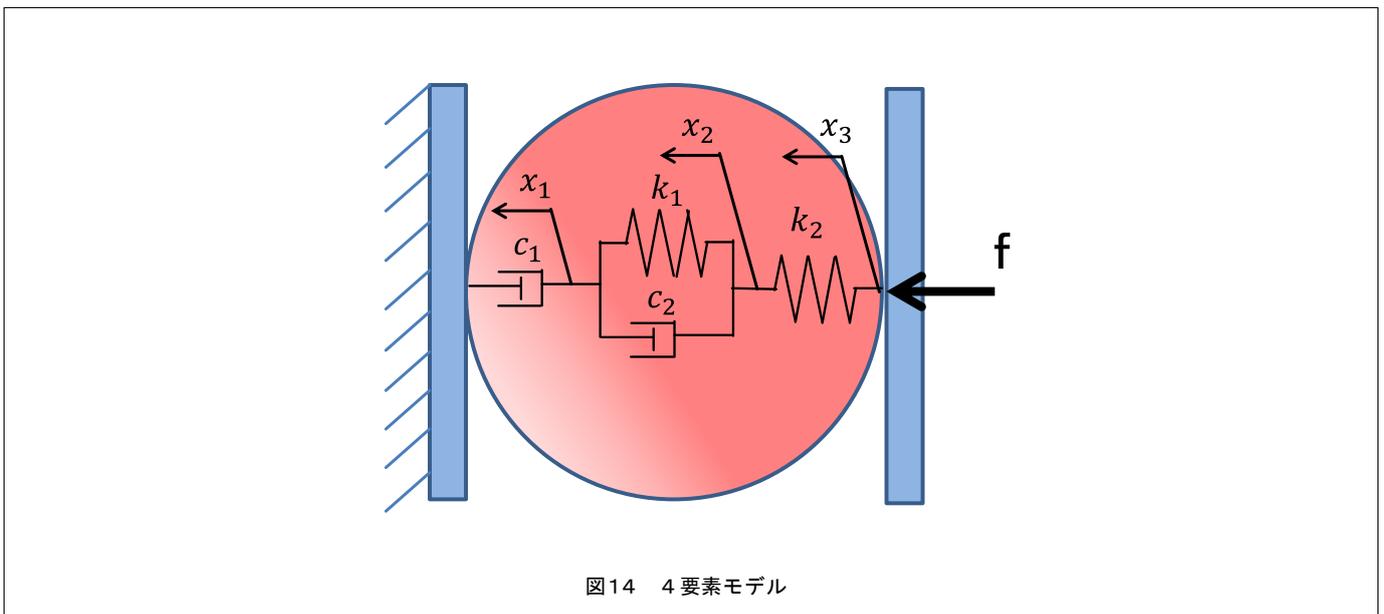
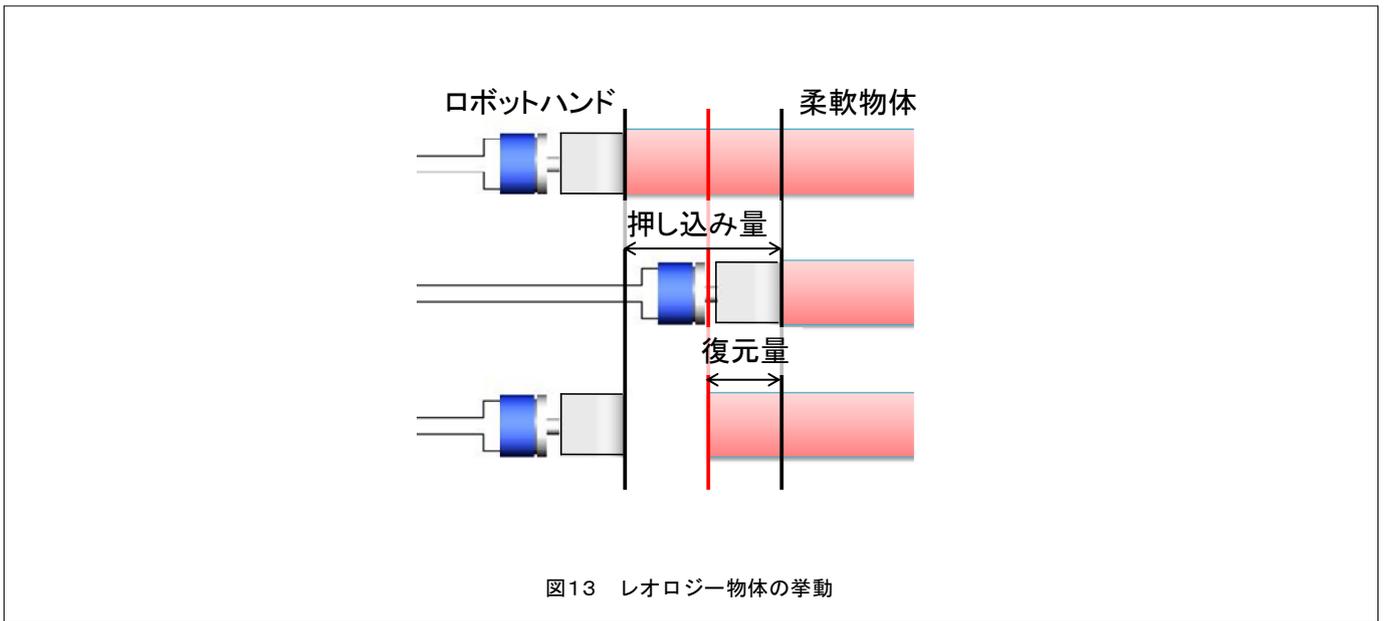
今、図 14 のモデルに接触力 f が作用したと考えると次の式が成立する

$$\dot{f}(t) = c_1 \dot{x}_1 \tag{1}$$

$$f(t) = k_1(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \tag{2}$$

$$f(t) = k_2(x_3 - x_2) \tag{3}$$

ここでそれぞれの要素の変位を分離して考えると、



ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

粘弾性要素および弾性要素は接触力が作用している間に変形を起こし、接触力を解放すると徐々に変位が復元し、時刻 $t=\infty$ で変位が完全に復元する。一方、粘性要素は接触力を解放しても解放時の変位が維持される。塑性変形量を X_p とすると、 X_p は次の式のように表せる。

$$\begin{aligned} X_p &= x_1(\infty) + x_2(\infty) + x_3(\infty) \\ &= \frac{1}{c_1} \int_0^t f(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

この式より整形時の接触力 $f(t)$ および粘性係数 c_1 より塑性変形量が分かり、目標の形状幅に整形することができる。実際の整形作業においては、粘性係数 c_1 を与えながら、接触力 f を力センサで計測することで、塑性変形量 X_p を推定する。 X_p が望みの整形量になった時点で整形動作を終了する。ここで問題となるのが、粘性係数 c_1 である。この値が正確に分かっていれば正確な整形動作が実現できる。実際にはそれは難しい。本研究では、初め、適当な数値を割り当てる。整形作業の後で、変形量を計測し、その整形作業における粘性係数 c_1 を推定する。過去の整形作業における粘性係数 c_1 の重みつき平均を計算し、その値を次の整形作業における粘性係数 c_1 として用いる。これにより、整形作業を繰り返すにつれ、より正確な整形動作を実現できる。また、対象物の物性は変化する可能性もある。古い作業におけるデータをあまり参考にせず、近い過去のデータをより大きく信用するように（平均を算出するときの）重みを設定して、整形作業に使用する粘性係数 c_1 を算出することで、この変化にも対応することができる。ロボットの動作に関しては、先に述べた整形開始位置から整形方向に向かって十分遠距離の点を目標点として、整形開始位置からその目標点に向かうような動作を生成する（図12）。この動作を実行する際、力センサの値を注視する。力センサの値をもとに、塑性変形量 X_p が望みの整形量になった時点で整形動作を停止し、もとの整形開始位置に戻る動作を生成する。

3.7 個々の失敗動作を許容できるシステム

失敗してもそれをリカバリーできるようにするため

には、1) 失敗時にシステムが破たんしない、2) 同じ目的の動作を再度行うことができる、3) 失敗によって変化した状況に対応できる、4) 失敗の原因を推測できる、ことが必要である。本研究では、これをロボットに適用することを考えた。まず、1) に関してであるが、何があってもロボットが暴走しないように、ロボットの各指を別々のシステムととらえ、それぞれに対して安定になるような制御を構築した。制御法そのものは固定し、変化させるのは目標値のみとした。この場合、ロボットが暴走する危険があるのは、目標値と実際の値の差が大きい時である。そこで、目標値と実際の値の差に上限を設けた。つまり、差が上限を超えるときは、目標値を変更して差がその上限になるようにした。これにより、各ロボットの安定性を保つことができる。なお、ロボットが何かに接触し、停止した場合、その停止状態における目標値と現在値の差の分だけ接触した物体に対して力を作用させることとなる。本研究ではこの手法を使うことで、ロボットから対象物に対して力を作用させた。これにより、接触、非接触の区別なくロボットを安定に動作させることができる。一般には、作用させたい力に対応する関節トルクをロボットで発生させることで指先の力を発生させる手法がとられることに注意されたい。「2) 同じ目的の動作を再度行うことができる」に関しては、本手法は動作を繰り返す行動を生成することで対応している。「3) 失敗によって変化した状況に対応できる」に関しては、動作を繰り返し生成する際、“その時の”対象物の状態（形状）に応じて動作を生成する。これにより、例えば、失敗などにより対象物が予測通りでない形状になっていたとしても動作を生成できる。「4) 失敗の原因を推測できる」についてであるが、本対象の場合、主な失敗は、整形の失敗とロボット移動時の対象物との接触、と考えられる。前者は、望みの整形量を得られなかったという失敗である。整形を正確に行うための粘性要素 c_1 の推定精度が問題の一因である。繰り返し動作を行い、推定精度を上げることで、整形の失敗を徐々に減らすことができる。もう一つのロボット移動時の対象物との接触であるが、この結果、物体が変形することもあり得る。この場合、後に続く整形動作も上手くいかない可能性が高い。整形動作をス

ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

キップし、動作をやり直すこと、また、障害物回避のための軌道計画を、障害物の大きさを仮想的に大きくしながら、やり直すことで、対象物に接触する可能性を下げることができる。

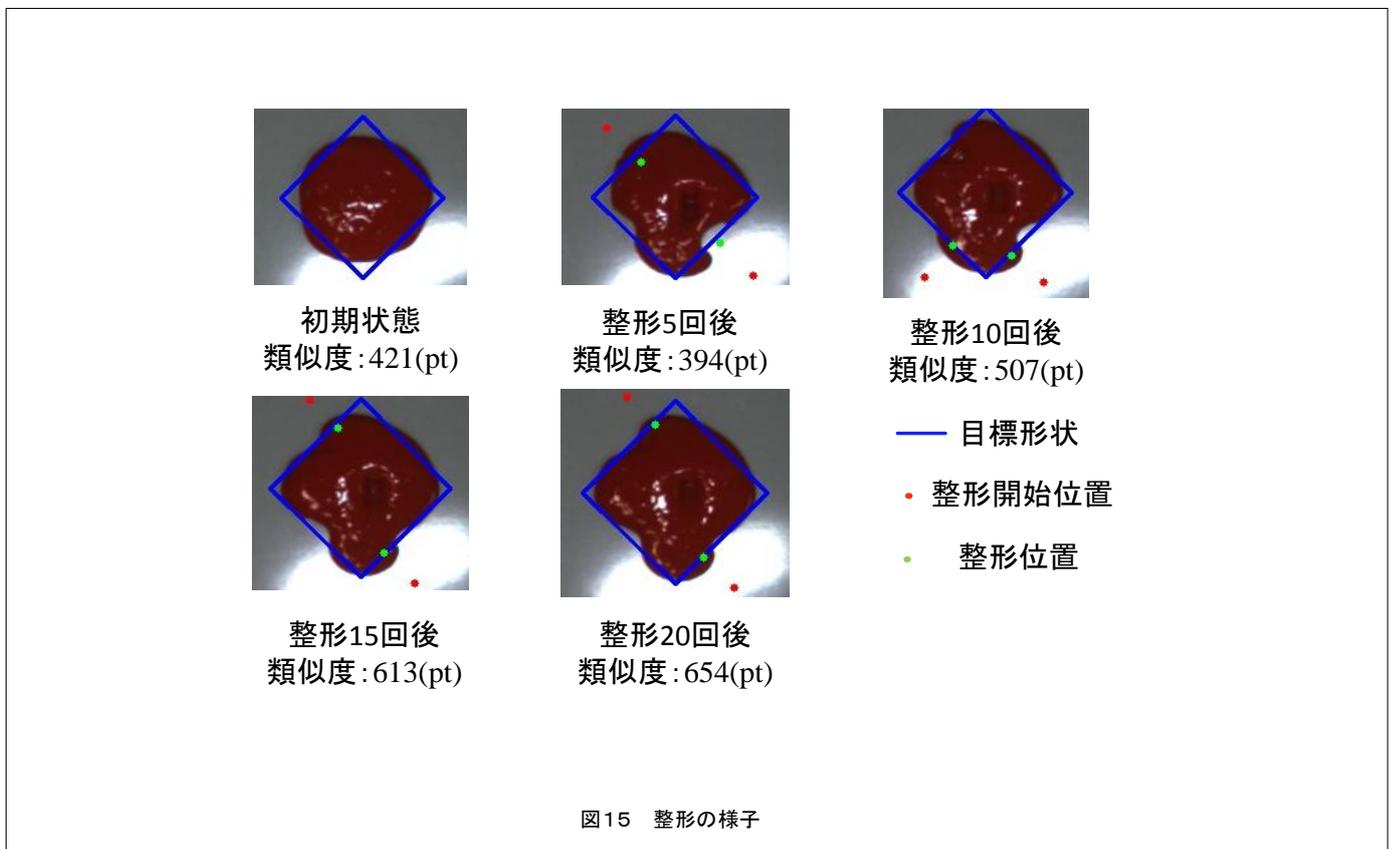
3.8 実験例

先に示した実験装置を用いて、実際に柔軟物体をロボットハンドで整形した結果について述べる。対象物はホウ砂と洗濯のりを用いて自作したものである。初期状態において、任意形状をとる対象物を合計20回整形したときの整形結果の様子を図15に示す。初めは対象物の物性値が分からないため、失敗動作を繰り返すことになる。このため、5回整形終了後の類似度は初期状態より下がっている。この後、対象物の物性値がおおよそ分かってくるため、整形が上手くいき、徐々に類似度が上がっていくことが分かる。失敗をある程度繰り返しながらも、対象物との相互作用を繰り返して一種の学習を行うことにより、目的に合致した行動が徐々に生まれていく様子が分かる。

4. まとめと将来展望

本研究では、「物体把持・操作は物体とロボットの間の相互作用の結果である」という観点のもとで、物体把持・操作を生成する手法の開発に取り組んだ。ロボットの各指と物体を別々のシステムととらえることで、対象物が期待通りの物性や形状でなくても、また、目的通りに動作できず失敗したとしても、ロボット自身は暴走しない安全なシステムを構築できる。また、相互作用を考慮に入れることで、対象物の物性や形状が未知であっても、動作中に物性や形状が変化したとしても、それに対応することができる。この方式を適用する一例として物体を望みの形状に変形させる整形動作を採り上げ、その実現に取り組んだ。初めは失敗を繰り返しながら、対象物との相互作用の結果得られる情報をもとに、徐々に動作を改善し、次第に失敗の少ない、目的に合致した動作を生成できるようになる手法を確立することが出来た。

本手法は、整形動作だけでなく、通常の物体把持にも適用できる⁶⁾。ここでは割愛させていただいたが、



ロボットと物体との相互作用に基づく物体整形のための動作生成

Motion generation for object shaping based on robot-object interactions

望み通りの把持位置で把持できなくても、そのずれが一定の範囲内であれば安定把持が可能な手法も開発している。この問題においても、ロボットハンドの各指を別々のシステムととらえることで、万が一把持が出来なくても暴走はしないシステムを構築している。

今回は整形動作という具体例を通して、本手法の実現を求めた。下位層（ロボット制御ならびにセンサ情報獲得）に関しては、上位層からの命令をもとに安全・安心に動作し、得られたセンサ情報を上位層に渡すという役割を担うものとして、基本的な枠組みを定めることが出来た。しかしながら、上位層に関しては、統一的な枠組みを定めることはできなかった。多くの具体例を実際来实现することを通じて、今後、統一論的な枠組みを定めることができると考えている。

参考文献

- (1) A. Bicchi, Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: a Difficult Road Towards Simplicity *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **Vol.16, No. 6**, pp.652-662, (2000).
- (2) C.C. Kemp, A. Edsinger, and E. Torres-Jara, Challenges for Robot Manipulation in Human Environments, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, **Vol.14, No. 1**, pp.20-29, (2007).
- (3) 吉川恒夫、把持と操りの基礎論、*日本ロボット学会誌*、1. 受動拘束と能動拘束、**Vol.13, No.7**、pp.950-957、1995、2. 指先力、**Vol.14, No.1**、pp.48-54、1996、3. 制御、**Vol.14, No.4**、pp.505-511、(1996).
- (4) A. Miller and P. Allen, Graspit!: A versatile simulator for grasp analysis, *ASME Int. Mechanical Engineeri*, (2000).
- (5) R. Diankov, Automated Construction of Robotic Manipulation Programs, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, Available from http://www.programmingvision.com/rosen_diankov_thesis.pdf, 2010 (openrave: available from <http://openrave.programmingvision.com/en/main/index.html> #)
- (6) J. Dias, A. Sahbani, L. D. Seneviratne, S.

Zeghloul, and J. Zhang, Grasp Planning and Task Learning by Imitation, *Workshops of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2010).

- (7) 東森 充、吉本佳世、金子 真、粘弾/塑性変形分離に着目したレオロジー物体のアクティブシェイピング、*計測自動制御学会論文集*、**Vol.43, No.3**, pp.1-8, (2009).
- (8) P. Fungtammasan, and T. Watanabe, Grasp input optimization taking contact position uncertainty into consideration, Submitted to *RoBio*, (2011).

この研究は、平成18年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成19年度～21年度に実施されたものです。