

非圧縮性流体指からなるロボットハンドによる 壊れやすい対象物の把持

内田 真裕* 渡辺 哲陽* 丸山 量志*

Delicate Object Grasping by Robotic Hands with Incompressible Fluid Fingers

Masahiro Uchida*, Tetsuyou Watanabe* and Ryoji Maruyama*

This paper presents novel schema for grasping very brittle objects. For the purpose, we develop robotic hand equipped with fingers filled with incompressible fluid; gel. The features of the fingers are uniform contact pressure distribution and controllability of the pressure. It is useful for controlling contact pressure such that it does not over fracture stress. The two fingers are attached on every contact area of the robotic hand, which realizes stable grasp from the viewpoint of passive form closure. We also present grasping strategies for grasping brittle and ductile objects, respectively, and their validities are shown by experiments.

Key Words: Incompressible Fluid Fingers, Contact Pressure Control, Uniform Contact Pressure Distribution, Passive Form Closure, Brittle and Ductile Objects, Grasping

1. はじめに

近年、日常生活の様々な作業をこなすロボットが求められるようになってきている [1]。作業を直接担うロボットハンドの役割はなかでも重要と言えらる。日常生活には様々な作業があるが、本研究では、壊れやすい物体を把持することに注目する。

日常生活において扱われる壊れやすく脆い物体の代表として食品が挙げられる。例えば、豆腐や塩の塊である。これらを壊さずに持つ、あるいはあえて必要な量だけ壊すなどの動作が求められる。このような壊れやすい物体の把持では、破壊を制御することが極めて重要と言えらる。本研究では破壊を制御しながら物体を把持することを目指す。

人間の手に類似したロボットハンドは、人間に適合した物体が多い生活空間での作業に有用であると考えらる。このため、様々な種類の多指ロボットハンドが開発されている [2]~[7]。コンプライアンス制御や力制御を用いることで、多指ロボットハンドでの複雑そして多様な物体把持・操りの実現が期待される。例えば、Twenty-one は指表面に設置された触覚・圧力センサ情報に基づき、プラスチックカップにストローを挿すなどの器用な操作を実現している [7]。汎用性はあるものの、破壊制御や形状の複雑さに対応などの特殊機能を付加することは、その構造の複雑さゆえ難しい。そこで機能は限定的であるが、実用

性があり、特殊機能も配備しやすい利点を活かし、グリップ型のロボットハンドも数多く開発されている [8]~[12]。広瀬と梅谷 [8] はへびを模した動きをする指を組み合わせ、柔軟な把持を行うロボットハンドを提案している。Kim ら [9] は接触領域の硬さを変えることのできるグリップを開発し、卵の把持を実現している。しかし、複雑な形状をもつ物体には対応できない。Brown ら [10] は粒子を含む袋によってロボットハンドを構成し、ジャミング効果を利用して、様々な形状の対象物の把持を実現している。Choi ら [11] は把持領域に伸縮性のあるゴムを備えたグリップを開発している。ゴム内空気の圧力を制御することで、卵などの様々な形状の物体を傷つけずに把持することを実現している。Pettersson ら [12] は把持領域が MR 流体で満たされているグリップを開発している。対象物形状に沿って把持領域をくぼませた後、MR 流体を硬化することで、果物などの物体を形態的に把持することを実現している。しかしながら、文献 [11] や文献 [12] で扱われている対象物は、局所的には脆いものの、全体破壊が生じるほど脆い対象物ではなかった。

本論文では、より壊れやすく脆い対象物の把持を目指す。壊れやすい物体を把持するための鍵は、把持戦略に加えて破壊応力以下の圧力で把持することにある。これをもとに、本論文では、壊れやすい物体把持のためのロボットハンド構成法ならびに把持戦略について提案する。具体内容は以下のとおりである。

1.1 壊れやすい物体把持のためのロボットハンド構成法の提案

非圧縮性流体で満たされた指から構成されるグリップ型ロボットハンドを開発する。非圧縮性流体の性質のため、接触圧力分

原稿受付 2012 年 12 月 14 日

* 金沢大学

* Kanazawa University

■ 本論文は提案性で評価されました。

布を一様化できる。さらに流体圧力制御システムを配備することで、接触圧力を破壊応力以下に制御できるようにする。非圧縮性流体で充填された指は、各接触部につき二つ、合計4カ所配備することで、把持形態の観点から安定把持が実現できるような構成をとる。

1.2 壊れやすい物体把持戦略の提案

各指にて、指が包み込まれるもしくは指が対象物の一部を包み込むような形態で接触させる。4カ所の指で包み込む形態で物体と接触させることで、形態受動拘束 [13] の条件を満たす安定把持を実現する。接触の際、破壊応力以下の接触圧力に制御することで、対象物の破壊を防ぐ。この際、安全率を踏まえた目標接触圧力を設定することで、重力などの外力が加わったとしても接触圧力が破壊応力以下になるようにする。脆性破壊を起こす物体の場合は、座屈による破壊が生じやすい。そこで、この座屈が起こる圧力以下で把持を行うことで破壊を防ぐ。延性破壊を起こす物体の場合は、初期破壊と呼べる破壊の兆候を検出することができることから、この検出に基づく目標接触圧力の導出を行い、事前知識なしに安定把持を実現する手法を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章にて、非圧縮性流体を充填した指ならびにそれを配備したロボットハンドについて述べる。3章では、非圧縮性流体を充填した指の特性について評価する。4章にて、脆性物体ならびに延性物体を把持するための戦略について述べ、実験により検証する。最後に第5章で結論と展望を述べる。

2. 非圧縮性流体指をもつロボットハンドシステムの開発

2.1 非圧縮性流体指の開発

壊れやすい物体を把持するためには、対象物の形状に応じた変形と一様な接触圧力が有効である。そこで、非圧縮性流体から構成される指を開発した。Fig. 1 にその全体構造を示す。指の小型・軽量化を図るため、制御部 (Control part) と指先部 (Fingertip part) に分割し、流体用チューブによって接続する。作動流体はジェルを用いた。パスカルの原理に基づくピストン構造により圧力制御を実現している。DC モータ (Maxon 1.2W) に接続した滑りねじを回転させることでシリコン製のピストンを駆動する。ピストン駆動による指先部の容積変化に応じて流体の内圧が変化する。Fig. 2 に指先部の断面図を示す。物体との接触が行われる部分は2層構造のゴムにより構成されている。流体の圧力を受け止める必要のある内側には伸縮性に富んだ薄手のニトリルゴム (Inner rubber) を、物体に直接接触する外側には破れにくい厚手のニトリルゴム (Outer rubber) をそれぞれ1枚ずつ重ねて使用している。指先部の内側には、圧力センサを設置して、流体の内圧を計測できるようにしている。なお、パスカルの原理から、物体との接触時には、この流体の内圧が接触圧力そのものに対応することになる。また、物体形状に応じて指は変形する。この変形に応じて流体内圧は変化する。このため、接触圧力は、物体に指を押し付ける、制御部のモータによりシリンダを駆動する、の2と通りの方法にて制御することができる。実際に製作した指先部および制御部の外観図をそれぞれ Fig. 3 に示す。

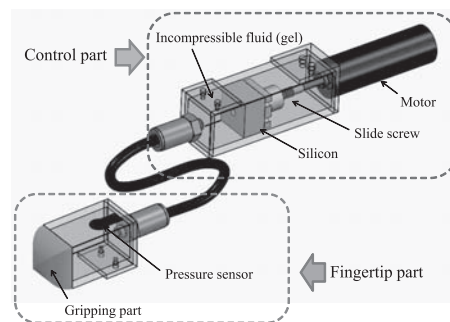


Fig. 1 Finger structure

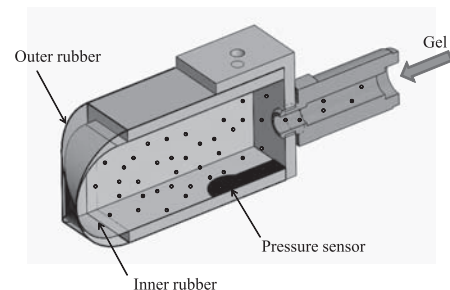


Fig. 2 Cross section of the fingertip part

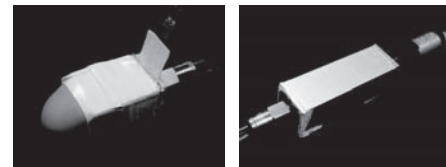


Fig. 3 Fingertip part (left) and Control part (right)

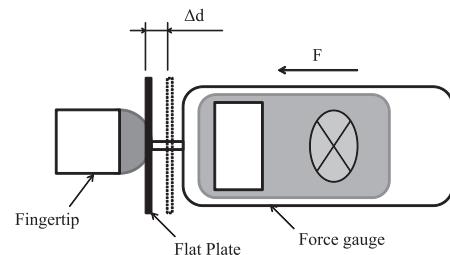


Fig. 4 Experimental set up for compression test

2.2 指先部の特性評価

指先部の特性を評価した。内部の流体圧力は実験的に求めた結果およそ 0 [kPa] から 40 [kPa] まで変化させることができた。内部の流体圧に応じて接触力ならびに指の押し付け量がどのように変化するかを調べるため、Fig. 4 に示すような実験を行った。位置決めステージに設置したフォースゲージ (IMADA DS2-50N) を固定した指先部に押し付ける。非接触時 (初期) 指内流体圧力を 3 [kPa], 10 [kPa], 20 [kPa], 30 [kPa] と設定した場合について計測した。結果を Fig. 5 に示す。このグラフにおける曲線は、指が半球状であると仮定し、Kao や Xydars [14] のモデル

$$f = C\Delta d^{\zeta} \quad (1)$$

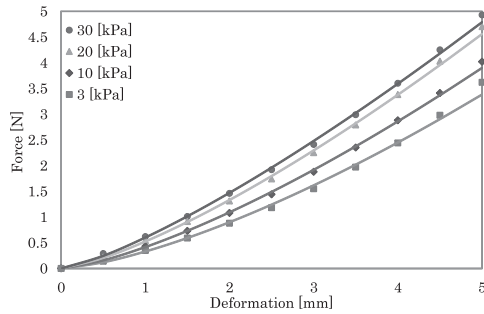


Fig. 5 Force-Deformation diagram

Table 1 The values of C and ζ

| Fluid pressure when there is no contact [kPa] | C | ζ |
|---|-------|---------|
| 3 | 0.331 | 1.45 |
| 10 | 0.417 | 1.39 |
| 20 | 0.525 | 1.34 |
| 30 | 0.603 | 1.29 |

により近似したものである。ただし、 f は加えた力、 Δd は変形量、 C および ζ はパラメータ値を表す。非接触時の指内流体圧力ごとの C および ζ の値を Table 1 に示す。Fig. 5 より、実験結果はほぼ式 (1) による近似値と一致していることが分かる。また、内圧を変化させることで指の剛性が変化することが分かる。以上から、低剛性で物体と接触することで衝撃力を減少させつつ、物体との接触量などを調整することで物体把持に必要な剛性で物体把持を行うことができ、壊れやすい物体の把持に有効と言える。

2.3 ロボットハンド概要

多指ロボットハンドは高い自由度により、複雑な動作が期待できるが、多数のアクチュエータの配備は制御の複雑さや重量増加を引き起こす。本研究の目的は複雑な動作の実現ではなく、壊れやすい物体の把持のためグリッパ型を採用する。グリッパの各接触部に一つの指を設置した場合 (Fig. 6 (a) 参照)、接触量によっては指同士を結んだ直線周りの回転を抑えることができない場合がある。そこで、Fig. 6 (b) に示すように各接触部に二つの指を配置する。各指では、物体を包み込むか、指が包み込まれる形態で接触が行われるため、摩擦あり点接触で表すと少なくとも3点以上の摩擦あり点接触が行われることになる。4本の指すべてに対象物を接触させながら把持すれば、12点以上の点で摩擦あり点接触を行うことになり、形態受動拘束 [13] の条件を満足することができ、安定把持が実現される。以上では点接触として議論したが、実際には面接触となる。面接触における摩擦条件は点接触時の摩擦条件を包含しているため、点接触仮定において安定把持が保証されるなら、面接触においても保証されることに注意されたい。

実際に設計したロボットハンドの外観を Fig. 7 に、主な仕様を Table 2 に示す。Table 2 に示すように最大把持領域の幅が 90 [mm] であるため、対象物の大きさ (幅) がこれを超えてしまうと把持はできない。開閉のみの動作でも様々な物体を安定して把持できる必要があるため、開閉部分のリンクに平行クラック機構を採用することで、どのような物体を把持する際でも常に対向する指が平行を保って動作するよう設計した。アクチュ

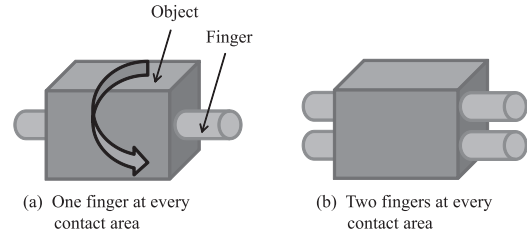


Fig. 6 Difference of the number of the fingers at contact area

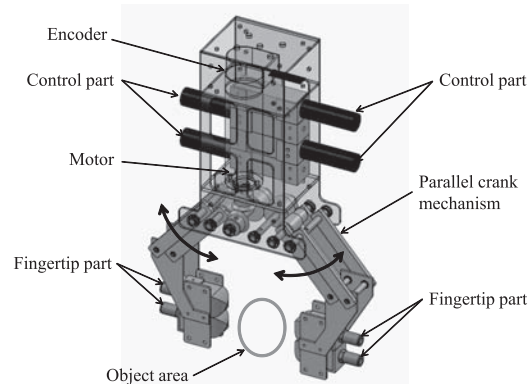


Fig. 7 Overview of the robotic hand

Table 2 Specification of the hand

| | |
|--------------------------------|------------|
| Maximum height | 300 [mm] |
| Maximum width | 200 [mm] |
| Maximum gripping area (length) | 90 [mm] |
| Weight | 1.0 [kg] |
| Maximum joint velocity | 75.3 [rpm] |
| Maximum joint torque | 1.43 [Nm] |
| Maximum joint grasping force | 11.4 [N] |

エータは maxon 社の DC モータ (出力 15 [W]) を使用し、付属のエンコーダによる回転角の検出によって開閉量の制御を行う。ロボットハンドの開閉制御の際、物体の把持による反作用により指内圧は上昇する。その際の圧力変化を指内部に設置した圧力センサで検出し、開閉量を制御することで、指と対象物との間の接触圧力の制御を行うことが可能である。

3. 接触圧力の一様化

理論上は、パスカルの原理に基づき、接触圧力分布は一様になる。本章ではこれを実験により検証する。一般にロボットハンドの指はシリコンなどのゴム材料で構成されることが多い。

この場合、指と物体との圧力分布は外側から中心に近づくに従って増加していく [14]。しかし、ジェルのような流体を指に充填した場合、理論上、圧力分布はその位置によらずほぼ一定になると考えられる。これらの特性を検証するために、半球状のシリコンの指 (以下シリコン指 (Fig. 8)) と本研究で開発した指先部 (以下ジェル指 (Fig. 3 (左))) を用いて圧力分布を比較する実験を行った。

Fig. 9 に示すように、それぞれの指をフォースゲージによって一定の力で感圧紙に加圧し、感圧紙に記された圧力分布を読み取る実験を行った。実験の条件を Table 3 に示す。感圧紙は

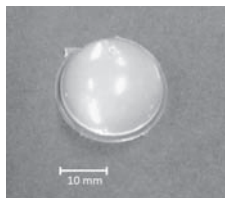


Fig. 8 Silicon fingertip

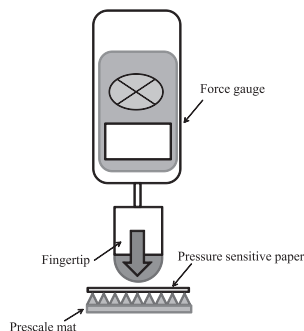


Fig. 9 Investigation of contact pressure profile

Table 3 Experimental conditions for investigation of contact pressure profile

| Load weight | Loading time | Temperature | Humidity |
|-------------|--------------|-------------|----------|
| 10 [N] | 2 [min] | 24°C | 64% |

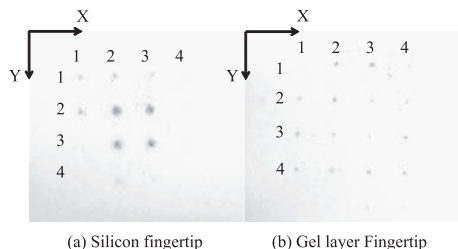
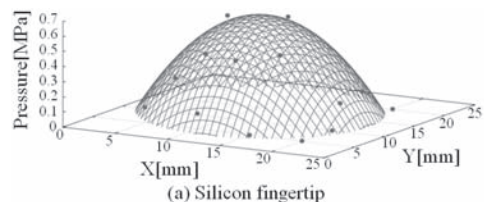


Fig. 10 Contact pressure profile for silicon and gel layer fingertips

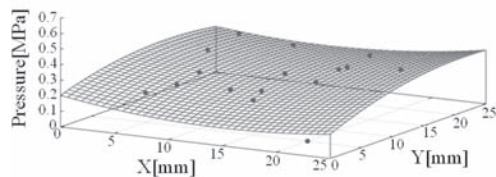
FUJIFILM社のプレスケールを使用した。感圧紙に圧力をかけると赤く発色し、圧力に応じて赤色濃度が変化する。赤色が濃い部分は圧力が高く、赤色が薄い部分は圧力が低いことを意味する。この感圧紙を用いて、それぞれの指で加圧実験を行い比較する。感圧紙の下にはプレスケールマット（FUJIFILM社）を敷いた。プレスケールマットは複数の突起が等間隔（5 [mm]）に付いたゴム製のマットであり、その突起の部分で圧力を集中させ、圧力分布を見やすくする効果がある。

実際に感圧紙に記録された圧力分布の写真を Fig. 10 に示す。写真から分かるようにプレスケールマットの効果から感圧紙上に圧力分布が等間隔な 4 × 4 の計 16 個の点で示されている。この結果を用いておのおのの点の赤色濃度から圧力を求め、圧力分布を三次元グラフに表した (Fig. 11 参照)。また、それぞれの結果に対して曲面近似を行い、その曲面もグラフに表した。曲面近似の式は以下のとおりである。

$$p = M - \alpha(x - A)^2 - \beta(y - B)^2 + \gamma(x - A)(y - B) \quad (2)$$



(a) Silicon fingertip



(b) Gel layer fingertip

Fig. 11 Contact pressure profile for silicon and gel layer fingertips

Table 4 Parameters for regression curved surface

| | Silicon fingertip | Gel layer fingertip |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|
| α [kPa/mm ²] | 5.56 | -0.400 |
| β [kPa/mm ²] | 6.04 | -0.400 |
| γ [kPa/mm ²] | -0.684 | -0.156 |
| A [mm] | 11.2 | 11.2 |
| B [mm] | 13.5 | 18.9 |
| M [MPa] | 0.646 | 0.271 |

この式の各パラメータを Table 4 に示す。圧力分布の三次元グラフを比較すると、シリコン指は指の中心部になるほど圧力が高くなっている。一方で、ジェル指の圧力分布は若干の誤差はあるが、一様となっている。ジェル指は圧力分布が一様となるため、局所的に大きな圧力が対象物に加わることを防ぎ、壊れやすく脆いものを把持する場合などにおいて有効であるといえる。

4. 物体把持戦略

開発したロボットハンドで、様々な性質を持つ対象物を把持する戦略を示すとともにその有効性を実験により示す。

4.1 壊れやすい脆性物体の把持

壊れやすい脆性物体の代表として市販のポテトチップス（2 [g]）を把持することで、開発したロボットハンドの有効性を示す。なお、把持対象物の幾何学的中心と 4 本の指を結んで構成できる把持平面の中心を一致させたとき、対象物とロボットハンドが干渉しない姿勢をロボットハンドがとれるような対象物を対象とする。

壊れやすい脆性物体は、負荷した応力がある一定値を超えた時点で急激に破壊する。対象物に加わる応力がこの応力以下になるように把持すれば、破壊を生じさせることなく物体を把持できる。具体的には以下のような戦略を用いる。

ステップ 1 破壊を生じさせる破壊応力を知るため、対象物の破壊が終了するまで把持動作を継続させる実験を行う。指の初期内圧はそれぞれ 3 [kPa] とした。本実験によってポテトチップスが破壊した瞬間の様子を Fig. 12 に示す。Fig. 12 より、本実験では、破壊がポテトチップスのほぼ中央部で生じていることが分かる。これはポテトチップスが湾曲していることから起

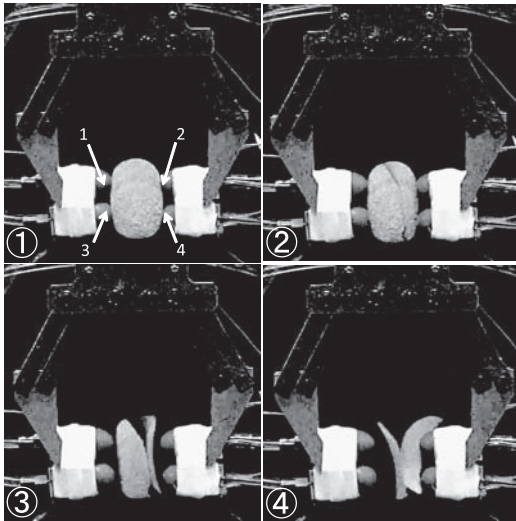


Fig. 12 Breaking potato chip

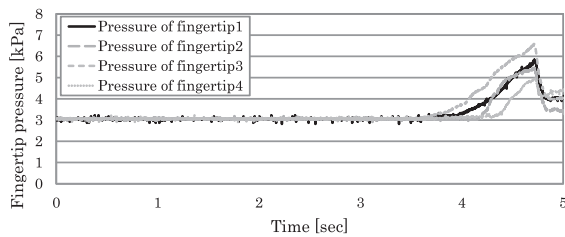


Fig. 13 Pressure profiles for every fingertip when breaking potato chip

こる座屈現象と考えられる。また、接触部付近での局所的な破壊がみられない。大きな接触力が発生している場合でも接触圧力分布が一樣なため、接触圧力が大きくならず、局所破壊が生じるに至らなかったと考えられる。そこで座屈を引き起こす接触圧力以下で物体を把持することを戦略とする。物体中央部に座屈を引き起こす力はグリップの各側における接触力の合力である。今、接触面積が接触部によらず同じと仮定する。各側からの接触力の合力は等しいことから、4箇所接触部の指内圧の平均値（各側の接触圧力の合圧力の平均値でもよい）が座屈を引き起こす（圧）力を超えないように制御することで、破壊を防ぐ。指ごとの接触圧力の微小な違いを考慮し、四つの指内圧の平均値を制御対象とした。各指内圧の変化を Fig. 13 に指内圧の平均値の変化を Fig. 14 に示す。また Fig. 13 における指の番号は Fig. 12 に示すとおりである。物体と接触すると、めり込み量に応じて圧力が上昇し、極大値に到達すると破壊が生じる。破壊の際の平均指内圧と初期内圧の差（Fig. 14 の場合 2.71 [kPa]）を許容圧力差と呼び、平均指内圧がこれを超えないように制御することで、座屈による破壊を防ぐ。

ステップ 2 ステップ 1 にて導出した許容圧力差 Δp をもとに、把持を実現するための、目標把持圧力差 Δp_d を下記のように設定する。

$$\Delta p_d = \frac{\Delta p}{s} \quad (3)$$

ここで s は安全率を示す。目標把持圧力差で把持した場合、

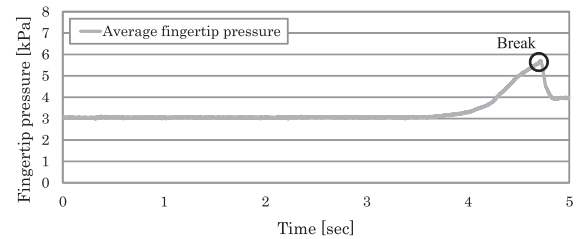


Fig. 14 Pressure profile when breaking potato chip

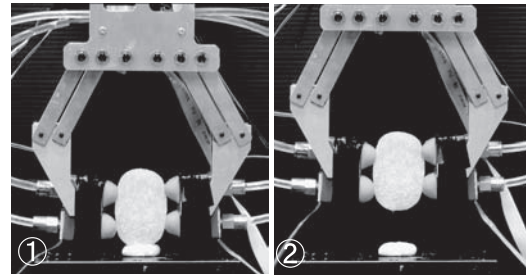


Fig. 15 Grasping potato chip

物体重量を支えることを必ずしも保証できないが、この圧力を超えた接触圧力で物体を把持すれば、破壊が生じる可能性が高い。したがって、この圧力で把持ができないことは、物体把持の実現が困難であることを意味する。そこで、この目標把持圧力で物体を把持する戦略をとる。すべての指内圧の平均値が目標把持圧力差を上回ってしまうと、対象物を破壊してしまう可能性がある。そのため、すべての指内圧の平均値が初期内圧からみて目標把持圧力差の分だけ上昇した時点でロボットハンドを閉じるのを止め、その状態を維持することで把持を行う。把持姿勢は、対象物の幾何学的中心が、4本の指の中心に位置するように採る。対象物の幾何学的中心が重心に近いと仮定すれば、これは Ponce ら [15] の Concurrent grasp 用の把持評価指標に基づいて定めることに対応する。また、この戦略は4本の指すべてと対象物が接触しやすいようにするための配置であり、これにより、形態受動拘束に基づく安定把持を実現する。この拘束下において対応可能な外力の大きさを対象物重量が超えない限り、対象物を把持することができる。

以上の戦略を実際に行ってポテトチップスを把持した様子を Fig. 15 に示す。本実験では安全率を $s=1.25$ と設定した。この安全率は、ポテトチップスの個体差、各指での把持圧力の違い、ポテトチップス重量などの外力付加による対象物破壊の防止を考慮したものである。実際に把持を行った際の各指の内圧の変化を Fig. 16 に指内圧の平均値およびロボットハンドの開閉用モータの角度の遷移のグラフを Fig. 17 に示す。また Fig. 16 における指の番号は Fig. 12 に示すとおりである。Fig. 15, Fig. 17 から、目標把持圧力に指内圧力が至ったとき、ロボットハンドの開閉を停止させることで、対象物を破壊することなく把持を実現していることが分かる。

この方法を用いて、同様の実験を3回繰り返したが、ポテトチップスに個体差があるにもかかわらず、すべてにおいて対象物を壊さずに把持を行うことに成功した。これより、壊れやすい脆性物体の把持戦略および、開発したロボットハンドの

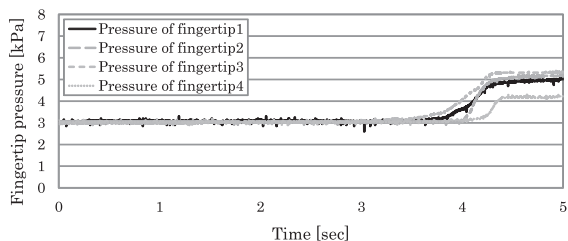
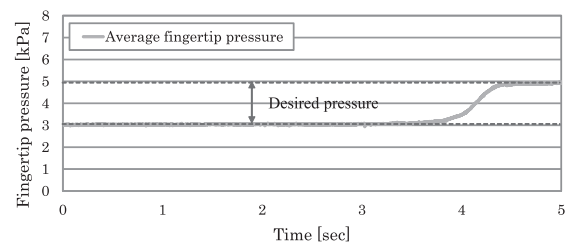
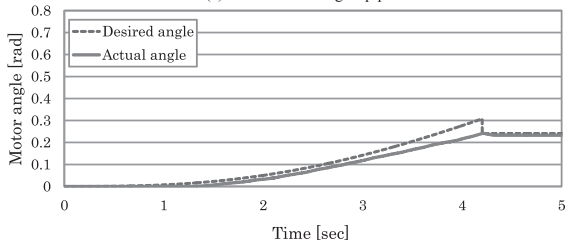


Fig. 16 Pressure profiles for every fingertip when grasping potato chip



(a) Transition of fingertip pressure



(b) Transition of motor angle

Fig. 17 Pressure and motor angle profiles when grasping potato chip

有効性を確認することができた。

4.2 壊れやすい延性物体の把持

脆性物体の場合、破壊応力に達すると急激に破壊することから、破壊しないように把持するためには、破壊応力の事前知識が必要であった。延性物体の場合、破壊前に塑性変形が起こることから、破壊の兆候を見ることで、事前知識なしで物体を把持できる可能性がある。そこで本研究では、事前知識なしで延性物体を把持する戦略を確立する。把持対象物の大きさに対する条件は壊れやすい脆性物体の場合と同じである。

本実験では、壊れやすい延性物体として、絹ごし豆腐を用いる。まず予備実験として、破壊が起こっても把持動作を継続する実験を行った。この実験の際のある指一つの内圧を例として Fig. 18 に示す。指の初期内圧はそれぞれ 3 [kPa]、豆腐は 50 [g] にカットして実験を行った。Fig. 18 から分かるように、豆腐の破壊の場合、比較的滑らかに破壊し、そのまま指同士が接触するため、壊れやすい脆性物体のように急激に圧力が減少する部分が現れない。代わりに、豆腐が破壊する直前に圧力の変化率が一時的に減少する部分が見られ、その直後に豆腐が破壊していることが分かる。本研究では、この圧力の変化率が一時的に減少する部分を初期破壊と呼び、以下の把持戦略をとる。

壊れやすい延性物体の把持戦略 対象物に対する相対的なロボットハンドの位置姿勢は、壊れやすい脆性物体の把持戦略と同じように設定する。指を対象物にゆっくり接触させ、初期破壊を

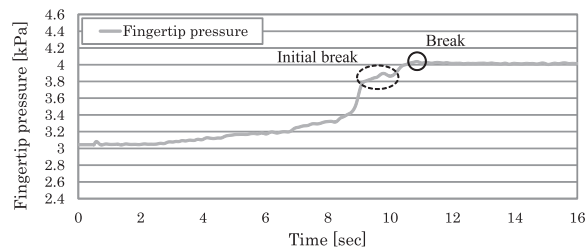


Fig. 18 Pressure profile when breaking soft tofu

検出する。ロボットハンドを閉じる速度を遅くすることで、初期破壊が時間的に長くなり、明確に検出することができる。また、豆腐のような壊れやすい延性物体では指と対象物との接触部において局所的な破壊が起こる。そのため、おのおの指の内圧を計測し、どれか一つの指が初期破壊を検出したら、初期内圧からの圧力変化量が下記に示す目標把持圧力差となるように開閉量を制御する。初期破壊が生じる際の圧力と初期内圧の差 Δp_i で物体を把持すると、重量などの外力が加わった際、接触圧力がこの圧力を超え、破壊が生じる可能性がある。そこで、安全率 s を設定し、下記のように目標把持圧力差 Δp_d を設定する。

$$\Delta p_d = \frac{\Delta p_i}{s} \quad (4)$$

この圧力差を維持するようにロボットハンドを制御することで、外力が加わっても破壊を生じさせることなく把持できる。

初期破壊を検出するための条件式を式 (5)、(6) に示す。

$$|p(t) - p(t - t_b)| \leq \alpha \quad (t_b = 0 \dots \xi) \quad (5)$$

$$p(t) \geq p_0 + \beta \quad (6)$$

式 (5) において、 t は現在時刻、 $p(t)$ は時刻 t における指の圧力、 p_0 は指の初期内圧、 ξ は比較対象圧力の時刻にかかわるパラメータ、 α は圧力変化の有無にかかわるパラメータを表す。 ξ の分だけ過去までの時刻における圧力値と差が α 以内の場合、初期破壊と判定した。また、式 (6) を条件に入れることで、接触前の圧力が変化しない部分を初期破壊と誤認識することを防いだ。

この戦略を用いて実際に絹ごし豆腐を把持した様子を Fig. 19 に、初期破壊を検出した指の圧力およびロボットハンド開閉モータ角度の遷移を Fig. 20 に示す。安全率は $s = 1.25$ とした。また、 $\xi = 0.1$ [s]、 $\alpha = 0.05$ [kPa]、 $\beta = 0.3$ [kPa] とした。Fig. 20 に示すように初期破壊を検出し、式 (4) により目標把持圧力差を算出する。その後、ロボットハンドの開閉量を制御することで接触圧力を目標把持圧力差まで落とし、その状態を維持している。これにより、豆腐を破壊せずに把持することに成功した。同様の実験を 5 回繰り返したところ 3 回成功した。失敗した主な原因は、初期破壊の検出条件を一定として豆腐の個体差を考慮しなかったため、初期破壊検出が上手くいかなかったことにある。豆腐に応じて自動調整する手法の開発などは今後の課題である。以上より、壊れやすい延性物体の把持戦略および、開発したロボットハンドの有効性を確認することができた。

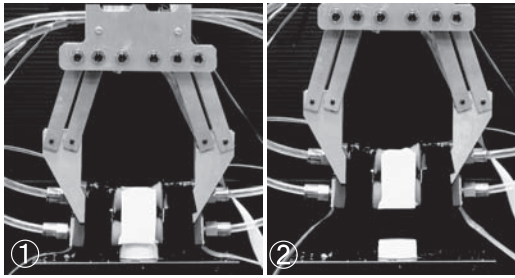


Fig. 19 Grasping soft tofu

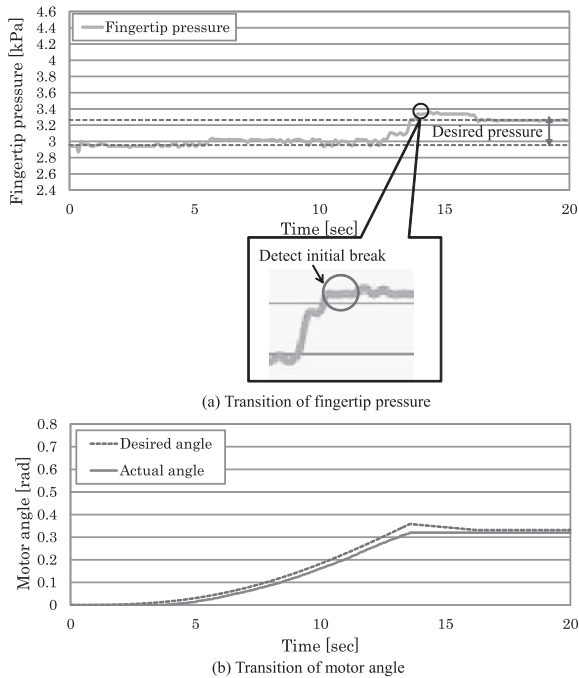


Fig. 20 Pressure and motor angle profiles when grasping soft tofu

4.3 形状が複雑な物体の把持

物体表面が指より硬い場合、物体の一部が指にめり込む。この結果、各指で物体を包み込むような形態で物体を把持することができる。これは先に示したポテトチップスを把持する際にもみられる現象である (Fig. 15 参照)。一方で、物体把持動作を継続することで、物体が指にめり込む量が増えるため、自然に把持のための剛性が上昇する。以上は、物体の安定把持に非常に有益である。特に形状、重量、位置などの情報のあいまいさを吸収することができる。本節では、同じ設定の把持戦略で様々な剛体対象物を把持することで、この有益性を検証する。把持戦略としては、破壊実験を行わずに目標把持圧力を設定する点を除き、壊れやすい脆性物体の把持戦略と同じである。各指の初期内圧を 3 [kPa] とし、目標把持圧力差は実験的に求めた最適な値の 2 [kPa] に設定した。把持実験の様子を Fig. 21 に示す。電球 (30 [g])、ハブラシ (11 [g])、2 種類のフィギュア (14 [g], 21 [g]) と、様々な複雑形状の物体を安定把持できていることが分かる。

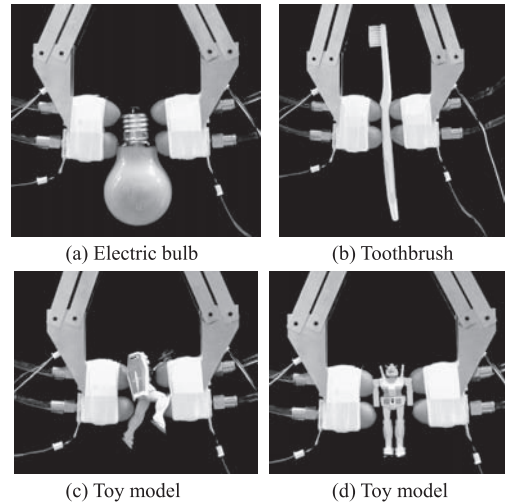


Fig. 21 Object grasping (complicated-shaped object)

5. おわりに

本論文では、壊れやすい物体の把持実現を目指し、非圧縮性流体を充填した指からなるロボットハンドを開発するとともに、壊れやすい物体の把持戦略を提案した。

壊れやすい物体の把持のためには、通常の把持条件に加え、物体に加わる応力が破壊応力以下という破壊防止の条件が必要である。接触圧力分布が一樣で、その接触圧力を制御できる指として、非圧縮性流体を充填した指を開発した。この指を各接触部に二つ配備したグリッパ型ロボットハンドを開発した。この配備により、形態受動拘束に基づく安定把持が実現可能となる。

破壊には脆性と延性の二種類の破壊が存在する。そこで、壊れやすい脆性物体、延性物体を把持するための戦略をたて、ポテトチップと絹ごし豆腐を把持することで、その有効性を実験的に示した。本開発ロボットハンドの副次的な効果として、剛体対象物把持の際の形状や位置などの対象物情報の不確かさを吸収できることが挙げられる。この効果を実験により検証した。

開発したロボットハンドならびにその把持戦略は壊れやすい物体把持に有効であることを確認できたが、本ロボットハンドは日用品のすべてに対応できるものではない。特に比較的重い物体の把持は困難と考えられる。また、壊れやすい物体の把持は実現できたが、操作はまだ実現できていない。これらの点は今後の課題である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] C. Lovchik and M. Diftler: "The robonaut hand: A dexterous robot hand for space," Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Robotics, vol.2, pp.907–912, 1999.
- [3] N. Fukuya, S. Toyama, T. Asfour and R. Dillmann: "Design of the tuat/karlsruhe humanoid hand," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp.1754–1759, 2000.
- [4] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger: "Dlr-hand ii: next generation of a dexterous robot hand," Proc. of

- the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.109–114, 2001.
- [5] Shadow Robot Company: “Developments in dexterous hands for advanced robotic applications,” Proc. of Automation Congress, vol.15, pp.123–128, 2004.
- [6] J. Ueda, Y. Ishida, M. Kondo and T. Ogasawara: “Development of the naist-hand with vision-based tactile fingertip sensor,” Proc. of Int. Conf. on Robo. and Auto., pp.2332–2337, 2005.
- [7] WASEDA University Sugano Laboratory: Twendy-one, <http://twendyone.com>
- [8] S. Hirose and Y. Umetani: “Development of soft gripper for the versatile robot hand,” Mechanism and Machine Theory, vol.13, pp.351–359, 1978.
- [9] B.-S. Kim and J.-B. Song: “Object grasping using a 1 dof variable stiffness gripper actuated by a hybrid variable stiffness actuator,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4620–4625, 2011.
- [10] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M.R. Zakin, H. Lipson and H.M. Jaeger: “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,” Proc. of the National Academy of Sciences, vol.107, no.44, pp.18809–18814, 2010.
- [11] H. Choi and M. Koc: “Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol.46, no.12–13, pp.1350–1361, 2006.
- [12] A. Pettersson, S. Davis, J. Gray, T. Dodd and T. Ohlsson: “Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes,” Journal of Food Engineering, vol.98, no.3, pp.332–338, 2010.
- [13] T. Yoshikawa: “Passive and Active Closures by Constraining Mechanisms,” Transaction of the ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control, vol.121, pp.418–424, 1999.
- [14] N. Xydias and I. Kao: “Modeling of contact mechanics and friction limit surface for soft fingers in robotics, with experimental results,” The International Journal of Robotics Research, vol.18, no.8, pp.941–950, 1999.
- [15] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat and J. Merlet: “On computing four-finger equilibrium and force-closure grasps of polyhedral objects,” Int. J. Robot. Res., vol.16, no.1, pp.11–35, 1997.



内田真裕 (Masahiro Uchida)

2012年金沢大学理工学域機械工学類卒業。2013年金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程入学、現在に至る。ロボットハンドに関する研究に従事。
(日本ロボット学会学生会員)



丸山量志 (Ryoji Maruyama)

2012年金沢大学理工学域機械工学類卒業。2013年金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程入学、現在に至る。ロボットハンドに関する研究に従事。
日本機械学会学生会員。



渡辺哲陽 (Tetsuyou Watanabe)

2003年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年山口大学工学部助手、2006年講師、2007年金沢大学大学院自然科学研究科講師、2008年金沢大学理工学域講師、2011年金沢大学理工学域准教授となり、現在に至る。ロボットハンド、ロボット技術の医療応用、微細操作システム開発などの研究に従事。日本生体医工学会、IEEE、日本機械学会、計測自動制御学会の会員。
(日本ロボット学会正会員)