

Development of robotic hand with low driving DOF by utilizing flexibility and passive mechanism

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-01-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00056486

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博士論文

柔軟・受動機構を活用した 低駆動自由度ロボットハンドの開発

金沢大学自然科学研究科機械科学専攻
人間・機械創造研究室 博士後期課程
西村 斉寛

主任指導 渡辺 哲陽 教授

提出年月 2019年6月28日

目次

第1章 緒言.....	4
第1.1節 研究背景.....	4
第1.2節 ソフトロボットハンド.....	6
第1.2.1項 ソフトロボットハンドの課題.....	6
第1.3節 研究目的.....	8
第2章 流体指を用いた物体把持手法の提案.....	9
第2.1節 はじめに.....	9
第2.1.1項 関連研究.....	9
第2.2節 流体指による圧縮試験.....	11
第2.2.1項 流体指の構造.....	11
第2.2.2項 実験装置.....	12
第2.2.3項 結果と考察.....	13
第2.3節 把持位検出手法.....	16
第2.4節 評価実験.....	19
第2.5節 おわりに.....	28
第3章 マイクログリッパ内蔵流体指の開発.....	29
第3.1節 はじめに.....	29
第3.1.1項 関連研究.....	30
第3.2節 マイクログリッパ内蔵流体指の設計.....	32
第3.2.1項 設計要件.....	32
第3.3節 マイクログリッパの基本仕様.....	32
第3.4節 マイクログリッパの設計.....	38
第3.5節 流体指内圧の決定.....	41
第3.6節 評価.....	43
第3.6.1項 仕様.....	43
第3.6.2項 評価.....	44
第3.7節 おわりに.....	50
第4章 幅広い物体把持が可能なソフトグリッパの開発.....	51
第4.1節 はじめに.....	51
第4.2節 設計・開発.....	53
第4.2.1項 マイクログリッパ内蔵流体指の構造と接触状態.....	53
第4.2.2項 グリッパの構造.....	54
第4.3節 把持モード.....	56
第4.3.1項 平行グリッパ.....	56
第4.3.2項 ピンチング.....	57
第4.3.3項 包み込み把持.....	57
第4.4節 制御則.....	58
第4.5節 評価実験.....	62
第4.6節 性能評価.....	66
第4.7節 考察.....	69

第 4.8 節 自由度の拡張	69
第 4.9 節 おわりに	71
第 5 章 結言	72
参考文献	74
付録	79
実験装置	79
整式による回帰	79

第1章 緒言

第1.1節 研究背景

深層学習をはじめとする機械学習分野の進歩や、ビジョンセンサ・力覚センサ等の性能向上により、ロボットの知能化が進んでいる。これまで、工場の生産ラインで、同じ位置にある同じ物体をハンドリングするだけであったロボットが、多様な場所でそのシチュエーションに合わせた操作を行うことが可能になってきている。世界的な少子高齢化や国内での「働き方改革」等により、働くことができる人・時間が限られてきていることもあり、今後もロボットの活躍の場が広がっていくことは間違いない。

ロボットが多様なシチュエーションで活躍するための方法として、メカ設計によるアプローチとソフトウェアによるアプローチがある。ソフトウェアによるアプローチとは、上述した機械学習等の知能化技術により状態量を取得・推定することで最適なロボット操作を行う方法である。一方、メカ設計では様々な機構を用いることで、そのシチュエーションに合わせたハンドリングの実現を目指す。本研究でも、物体把持を対象とし、様々な用途で使用できるロボットハンドの開発を行う。

物体把持はロボットが行うタスクの中で、最も基本的な作業の1つである。そして、物体把持を行う際の課題として挙げられるのが多様な物体への対応である。多様な物体がある現場でもそれらの識別精度が低い頃は、それらの物体が混合した状態でハンドリングを行う可能性は高くなかった。しかし、知能化技術の進歩により識別能力は向上し、様々な物体が混合された状態でロボットにハンドリングを行わせる要望も高まっている。多様な物体の把持を行う際に重要となるのがロボットハンドである。知能化技術により、物体の識別を高精度で行うことができるようになったとしてもそれを把持するためのロボットハンドが十分な性能が無ければ把持することはできないためである。例えば、可搬重量が100gのロボットハンドでは3kgの物体は把持できないし、吸着式のハンドでは柔らかい食品等は把持できない。そこで本研究では多様な種類の物体把持が可能なロボットハンドの開発を目指す。

本研究グループではこれまで多様な種類の物体を把持が可能なロボットハンドの要素開発として流体指と呼ばれるロボット指の開発を行ってきた[1][2][3][4]。流体指については指の持つ特性[3]や、実験結果ベースの把持手法の提案を行ってきた[1][2]。しかし、流体指による物体の把持のメカニズムの解明には至っていなかった。そこで本研究では光弾性法を用いて物体の内部状態を解析し、メカニズムの解明を図る。それにより流体指の有用性への知見を深め、汎用ロボットハンドへの適用を検討する。

流体指は弾性要素を持つため、流体指を搭載したロボットハンドはソフトロボットハンドに分類されるが、ソフトロボットハンドには可搬重量が小さいという課題がある。これは先行研究[1][2][3]でも同様であり、流体指を用いたロボットハンドも重量物の把持はできていない。そこで可搬重量の向上を目指すべく、流体指に剛体要素を取り入れたハイブリッド構造の流体指を開発するこ

とでソフトロボットハンドの課題の解決を目指す。

そして、最後に汎用ロボットハンドを開発するために、ハンド全体の構造について検討を行う。こちら、これまでのソフトハンドには無かった、剛体と弾性体のハイブリッド構造により、複数の把持モードを有する構造を提案する。

第1.2節 ソフトロボットハンド

ロボットが様々なシチュエーションに対応するために、多様な物体を把持できるロボットハンドは数多く存在する[5][6]。その多くが弾性要素を持つソフトロボットハンドである。これは弾性要素を持たせることにより、対象物の不確かさを吸収した把持が可能となるためである。本研究における不確かさとは、把持対象物ごとに異なる全体的な大きさや部分的な形状、変形のしやすさ等を指す。ロボットハンドに弾性要素を導入する場合、指関節に導入する方法と、物体との接触部(以下、皮膚)に導入する方法がある。関節部に柔らかさを用いたロボットハンドは、一般的に剛体リンクをバネなどの弾性要素を介して接続された構造を持つ。それをワイヤ駆動などで閉じることで物体の形状に合わせたなじみ動作を実現することができる[7][8][9][10][11][12][13][14][15][16]。一方、皮膚に柔らかさを利用したハンドは磁性体を用いたもの[17]、ジャミング転移現象を用いたもの[18][19]、空圧を用いたもの[20][21]など様々な形態が挙げられる。また関節にも皮膚にも柔らかさを用いたロボットハンドも存在する[22][23]。本研究でも、これに分類されるロボットハンドを提案する。

皮膚に受動要素を持つロボットハンドの場合、不確かさの中でも、指と物体の接触面での部分的な形状の違いや、変形のしやすさを吸収することができる。これは特に食品などのように柔らかく壊れやすい物体や複雑な形状を持つ物体を把持する際には効果的である。一方、関節部に弾性要素を導入する場合は、把持モードの変更による把持が可能となる。そのため、物体の全体的な大きさや形状の不確かさを吸収することができる。なじみ動作による把持が代表的であり、物体が球形であっても立方体であっても形状に合わせた把持が可能となる。

このように、柔らかさを皮膚に導入する場合と関節部に導入する場合は、吸収することができる物体の不確かさが異なるため、どちらにも柔らかさ導入することでより汎用的なハンドの開発が可能となる。

また、不確かさを受動要素により吸収できるため、多駆動軸にする必要が無いため、ソフトロボットハンドの多くが劣駆動となっている。駆動数を減らすことで制御の簡易化が可能なことから、本研究で開発するロボットハンドも複数の把持モードを実現しつつ、アクチュエータの数を減らすために環境を用いて駆動数の削減を目指す。

第1.2.1項 ソフトロボットハンドの課題

幅広い物体を把持するためには受動要素（柔らかさ）を導入することが効果的である一方で、柔らかさを導入することにより可搬重量が低下するという弱点がある。これは物体の重量により弾性要素が変形してしまうことで把持状態を保てなくなるためである。そのため、ソフトロボットハンドの研究において、重量物の把持は大きな課題である。

本研究で開発するロボットハンドも、皮膚と関節部にそれぞれ柔らかさを導入すると前述したが、それだけでは可搬重量を大きくするのは難しい。そこで、皮膚と関節部に剛体の要素も追加することで可搬重量の向上を目指す。柔

らかさと剛体のハイブリッド構造により、それぞれの長所を生かすことで、柔らかいもの、重いもの、複雑形状のもののような幅広い物体の把持が可能となる。

第1.3節 研究目的

本研究での、幅広い種類の物体把持が可能なソフトロボットハンドを開発するためのアプローチとしては

- 柔らかさを皮膚と関節に導入することで対象物の持つ不確かさを吸収する.
- 剛体要素も導入することでソフトロボットハンドの弱点を補う.

である. そのために下記の3つの事項を検討した.

1. 流体指を用いた物体把持手法の提案
2. マイクログリッパ内蔵流体指の開発
3. 受動回転関節を有するロボットハンドの開発

先行研究において、ロボットハンドの指部に弾性膜を張り、内部に流体を充填した流体指を開発した[1][2][3][4]. 先行研究では、流体指は豆腐やポテトチップス等の壊れやすい物体を把持可能であることを確認した[3]. 流体指は圧力センサを接続することができ、内部流体の圧力をモニタリングすることができる. 先行研究[1][2]では、その流体圧を用いて柔軟物体を把持する手法を提案した. 先行研究[1][2][3]により、流体指が壊れやすい物体を壊さずに把持する能力が高いことはわかったが、流体指による把持のメカニズムはわかっていない. そこで本研究では、光弾性法[24]を用いて、把持時の物体の応力状態を検証し、メカニズムの解析を図る. その上で流体指を用いた把持手法の提案を行い、流体指の有用性について検証する.

2では流体指の弱点である可搬重量が小さい点の改善について検討する. 先行研究[3]では流体指で500gの物体を把持可能であることは確認したが、それ以上の物体は把持できていない. これは先述した通り、柔軟な指が物体の重量により大きく変形し、把持をキープできないためである. そこで流体指の内部に剛体部分(本研究ではマイクログリッパと呼ぶ)を設けることで可搬重量の向上を目指す.

3においては、1,2で有用性を確認したマイクログリッパ内蔵流体指を搭載したロボットハンドの開発を行う. これにより皮膚に柔らかさを持つため、物体の表面形状に合わせた把持が可能となる. 多様な物体の把持を実現するには、物体に合わせた把持モード(ピンチングや包み込み把持等)を選択する必要がある. そのため、指関節にもラチェット構造を用いることで、複数の把持モードを切り替えることができるロボットハンドの開発を目指す. ラチェット構造は回転可能な方向への変位に対して受動的な柔らかさを持ち、回転をロックする方向については剛体的な特性となる. これにより、環境を用いて把持モードを切り替えられるロボットハンドを目指す.

これら3つにより多様な種類の物体把持が可能なロボットハンドの開発を行う.

第2章 流体指を用いた物体把持手法の提案

第2.1節 はじめに

前章にて述べた通り，本章では流体指の物体把持メカニズムの解析と，把持手法の提案を行う．図 2-1 に本章にて用いる流体指を示す．流体指を用いた物体把持では，指と物体の接触面において内部流体の圧力が均一に加わることで，物体に局所的な負荷が加わりにくく壊れやすい物体の把持に適していることがわかっている[3]．また，指部が柔らかいため，把持対象物の形状が複雑であっても，なじんで把持することが可能である．これらの特徴を生かし，先行研究[1][2]では，壊れやすい柔軟物体（絹ごし豆腐）の把持を物性値等の事前情報無しで把持する手法を提案した．提案した手法では，流体指の流体圧のデータの挙動から指の押し込み量を決定し，物体を破壊することなく把持することができた．しかし先行研究においては，その流体圧の挙動の意味が明確ではなかった．また，対象物も変形しやすい柔らかい物体しか考えられていなかった．それらを踏まえ本章で提案する把持手法は下記の特徴を待つ．

1. 流体圧の挙動の変化点(=提案する最適な指の押し込み量)では対象物の内部応力が対象物内全体に加わり，物体の変形が始まる点．
2. 対象物の把持を回避できる
3. 把持ポイント検出に用いる閾値は物体に依らない．

また，先行研究[1]では流体圧のモニタリングを指と物体が接触した位置から行う前提で行っていたため，本研究では指と物体の接触を流体圧で検出する処理も追加する．

第2.1.1項 関連研究

人との協調を考慮したロボットハンドは数多く開発されている[25][26][27][28][29][30][31]．一般的に，産業用途で用いられるロボットハンドの指の表面は硬く，人間の環境への適応には適していない．Shimoga と Goldenberg は，ゲルは接触時の衝撃とひずみエネルギーを減少させ，物体の形状に合わせた把持が可能のため，指先の表面に使用することが効果的であることを明らかにした[32]．これらの利点に加えて，本研究グループでは先行研究にて，ゲルを含んだ指先が均一な接触圧力分布を持つ点と圧縮により剛性が増加する点を持つことを明らかにした[3]．ゲルを含んだ指先の主な欠点は，可搬重量が減少する点である．したがって，[3][2][1][33]では，高剛性の要素がゲル内部に設置されている 2 層構造が示された．

対象物の形状になじんで把持することは，普遍的な操作による物体把持を実現するためのキーである．Hirose と Umetani によって提示されたヘビのようなグリッパは，その点で先駆的なアプローチである[34]．さらに，Kim と Song は，剛性を制御できるハイブリッド可変剛性アクチュエータを持つグリッパを開発した[35]．ブラウンら[18]は，ジャミング現象[36]を用いて，多種多様な形

状の物体を把持可能なグリップを開発した。Choi と Koc は多種多様な形状の物体をつかむために、ロボットハンドの把持面にラバーの風船のような構造を持つデザインを提案した[21]。Pettersso らは MR 流体を利用して、物体の形状に適応し、物体を幾何的に拘束す機能を持つグリップを提案した[17]。Kim ら [20]は、子供とロボットのための安全な作業のための柔らかい表面を提案した。結果として、柔らかい表面を持つロボットハンドがプラスチックカップや紙のロールを含むいくつかの物体を把持することができることを示した。上記の研究では、ロボットハンドは卵や果物を含む壊れやすい物体を把持することができることを示した。

しかしながら、これらの対象物をどれだけ押し込んで把持するのが適切か、という観点では検討されていない。つまり、柔軟指を用いて、壊れやすい物体を把持するための把持戦略はこれまで提案されていない。そこで本研究はこの問題を調査することを目的としている。

第2.2節 流体指による圧縮試験

第2.2.1項 流体指の構造

1章で述べたように、流体指（図 2-1）は弾性膜を張り内部に粘弾性流体を充填したロボットフィンガーである。弾性膜のゴム材料としてニトリルゴムを使用し、流体は機械油（チェーンソーオイル，ISO VG 100（国際標準粘度規格））を使用した。シール性能を向上させるためにスクリュークランプを採用している。流体圧を測定するために圧力センサー（KEYENCE, AP-12S）をチューブを介して接続した。さらに、流体圧調整用にポンプも接続してある。パスカルの法則によれば、流体が非圧縮性であれば、流体を閉じ込めた容器に外部から圧力または力が加えられても、圧力は均一になる。また、流体体積の変化は流体圧力の変化を示す。そのため、ポンプを制御することによって、流体圧力を制御することができる。本体は腐食を防ぐために真鍮製とした。

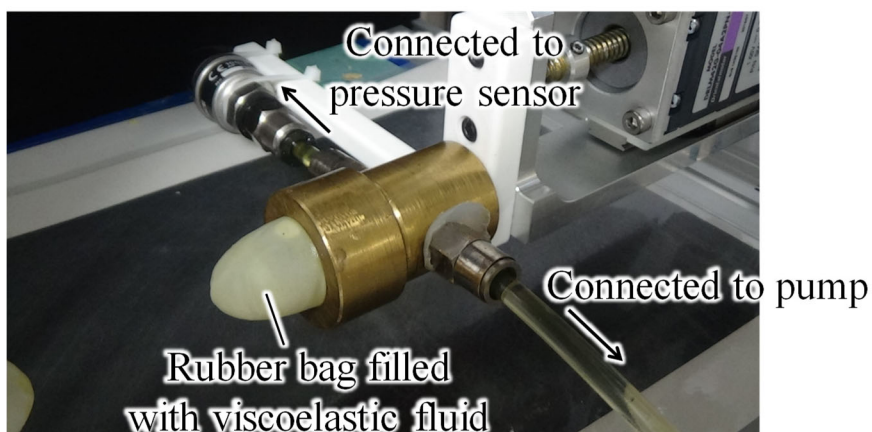


Figure 2-1. 流体指

第2.2.2項 実験装置

柔軟物体に対して流体指で圧縮したときの流体圧の挙動を調べるために圧縮試験を行った。図 2-2 は、圧縮試験の実験装置を示す。圧縮速度 v_g は 2 mm/s とした。流体圧力 p は接続した圧力センサによってモニタリングすることができる。物体および指先は、各指先と物体との間の距離が 10mm となる位置を初期位置とした。圧縮中の応力分布を調べるために、光弾性法[24]を用いた。対象物には、光弾性材料であるゼラチンを採用した。図 2-2 に示すように、平面偏光装置を使用した。装置の構成は、白色光源 (MITUTOYO Megalight 100)、1 つ目の直線偏光子 (SIGMAKOKI SPF-50C-32)、対象物、2 つ目の直線偏光子から成る。2 つの偏光子の方向は互いに直交させる。この構成では、透明または光弾性材料は、応力がないと光学的に等方性になるが、応力がかかると複屈折を起し、誘導複屈折に対応する縞模様が観察される。白色光源を利用する場合、等傾斜縞と等色縞の両方が観察される。等色縞のパターンは色により、主応力の差、つまり最大せん断応力に対応する。本研究では、等色縞のパターンに着目し、応力分布を検証する。等色パターン縞の数は、主応力の大きさと関連する。光弾性法を使用する主な目的は、一般的な現象をするためである。したがって、発生した応力を定量化された値に着目するのではなく、応力分布の変化 (すなわち、カラーパターン) に着目する。

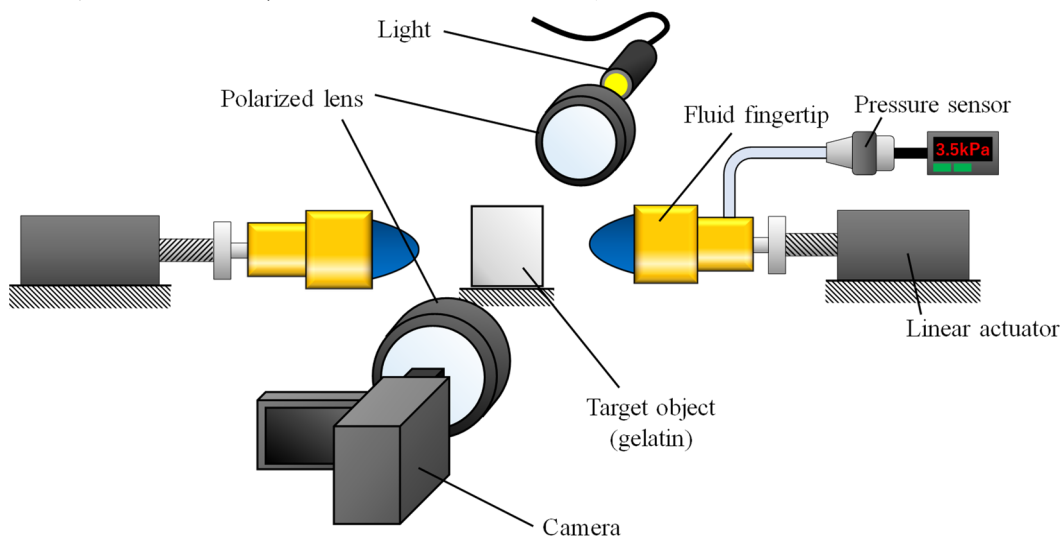


Figure 2-2. 圧縮試験装置

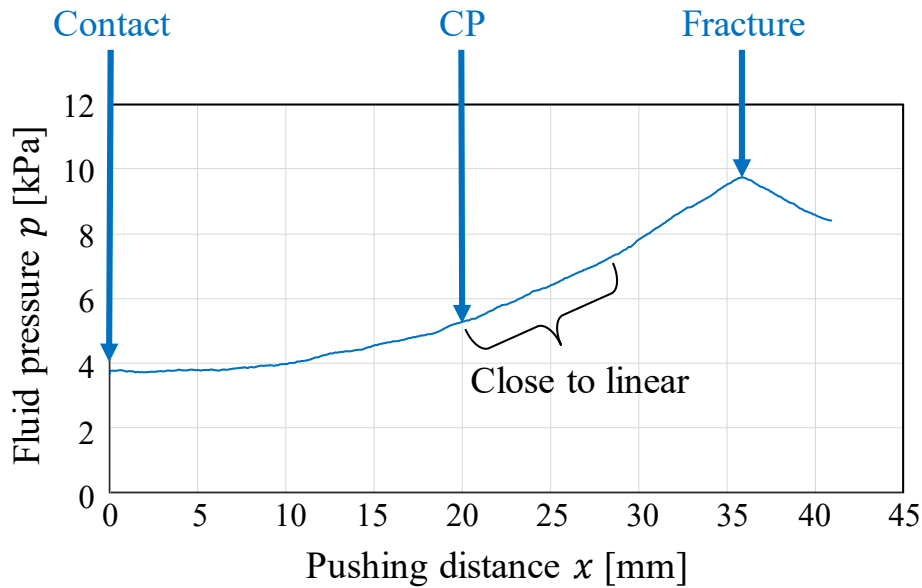


Figure 2-3. 圧縮試験での流体圧の挙動

第2.2.3項 結果と考察

圧縮試験での圧力の挙動を図 2-3 に示す．ここで， x [mm]は物体と指先が接触した点からの押し込み量を表す．接触直後は圧力は非線形に増加する．押し込み量が増加するにつれて，流体圧挙動は非線形挙動からほぼ直線的挙動へと変化した．本研究では，この点を”CP”（Changing point）と呼ぶ．図 4 は，圧縮試験中の光弾性法による画像のスナップショットを示す．各画像の左上の数字は，対応する押し込み量 x [mm]を示す．黄色い線は，初期状態における対象物の上面の位置を示してゐる．

接触直後では，流体の指先が物体（ゼラチン）に侵入し，圧力の上昇率は非常に低かった．押し込み量 x [mm]が大きくなるにつれて，図 2-4 からわかるように内部応力が広がっていく．CP 付近（ $x = 18$ [mm]）では，応力分布の状態の変化（カラーバンドの位置や太さの変化）が小さくなり，自由境界付近で変形が始まった．対応する圧力挙動は線形に近くなった（図 2-3）．

圧力変化が小さい場合，圧力変化は次のように定義されます．

$$dp = K \frac{dV}{V} \quad (1)$$

ここで， p は圧力， V は体積， K は体積弾性率を示す．体積変化率 $\frac{dV}{V}$ が一定であれば，次の関係が得られる．

$$dp = \text{const} \quad (2)$$

式(2)は，形状変形が一定の体積変化を伴って進行する場合，圧力の変化は線形

となることを示している。CP 近辺での線形圧力挙動は、式(2)によって表される状態に一致する。図 2-4 に示すように、CP 周辺で指先の侵入度合いがほぼ一定となるため、液量の減少率はほぼ一定となり、式(2)の状態に近くなる。指先の侵入を考慮しない場合の対象物の体積変化は、 $x = 18 \text{ mm}$ の前では小さかったが、CP 以降では大きく変化している。その時点で光弾性画像中の自由境界の周りのカラーパターンは一定になり、自由境界での変形は大きくなっている。これは、流体指先の侵入がほぼ止まっていることを示す。さらに、それは、流体指から加えられた圧力が自由境界に伝達された、言い換えると、加えられた圧力が実質的に物体本体に伝達されたことを示す。

線形挙動が起こった後、圧力の増加率は変化した。 $x = 28 \text{ mm}$ 付近（圧力が線形にならなくなった付近）で、左の指先の一部が物体に侵入している（図 2-4）。この侵入は亀裂の予兆であり、物体把持は線形挙動が止まる前に行われる必要がある。

CP での状況は下記となる。

- 圧縮による指部の侵入はほとんど無くなり、把持のために加えられた力は物体に伝達される。
- CP では破壊は起こらない。

これにより、壊れやすい柔軟物体を把持するには CP で把持することが適している。CP 検出、押込みを止める、物体をピックする、という手順により対象物を壊さずに把持することができる。次のセクションでは、CP を検出する方法について説明する。

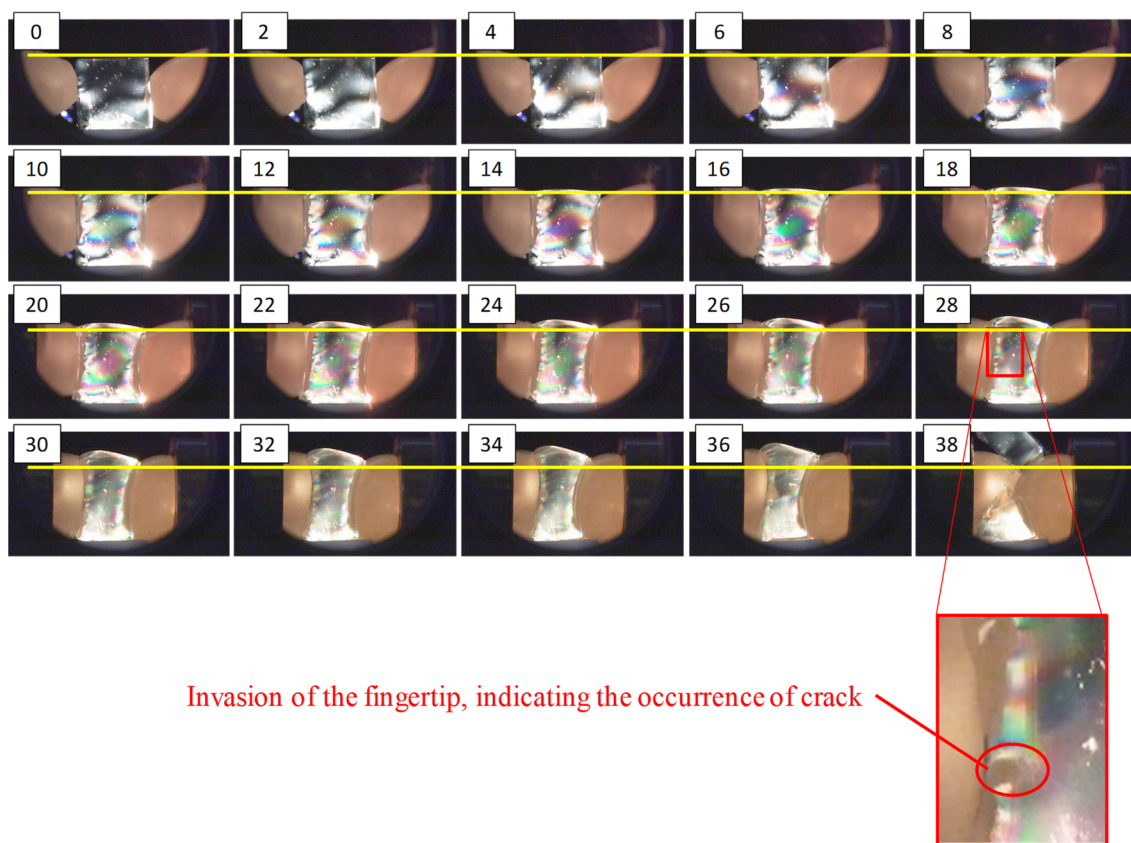


Figure 2-4. 光弾性法を用いた圧縮試験での様子. 左上の番号は押し込み量 x [mm] である. 黄色の線は圧縮前の対象物の上面の位置である.

第2.3節 把持位検出手法

ここでは、CP をオンラインで検出する方法について説明する。光弾性法は光弾性材料または透明材料にしか適用できないため、内部流体圧力を測定する圧力センサのみを使用することが適している。力センサも同様のデータを得られる可能性はあるが、設置スペースが必要となる点から、チューブを介すことで設置場所の自由度が高い圧力センサを使用する。

前節にて議論した内容を考慮し、以下の要件を満たす戦略を提案する。

- (1) オンラインで CP を検出する。
- (2) CP 検出は流体圧力のみをモニタリングすることで行う。
- (3) 設定する閾値は対象物に依らず一定とする。
- (4) 対象物の剛性や変形に関する事前情報を必要としない。

CP を検出するために、[1][2]と同様に、単純回帰モデルと複雑回帰モデルのフィッティング精度を比較することによって、挙動の変化点を検出する方法を用いる。[1]では線形近似のフィッティング精度をモニタリングすることによって、亀裂または破断の兆候を示す線形挙動を検出する方法を採用した。図 2-5 に示すように、豆腐を圧縮するときの線形挙動は明らかであり、線形近似に基づく方法論は有用であった。しかし、式(2)は理想的な場合を表しており、実際の圧力特性は図 2-3 に示すように必ずしも完全に線形ではない。このような場合、閾値の調整が事前に必要となる。したがって、本研究では単純モデルと複雑モデルのフィッティング精度を比較する手法を採用する。CP 前においては、圧力挙動は一様であり、単純モデルと複雑モデルの両方が同等の高精度を得られる。一方、CP において、それまでと異なる挙動となる場合、単純モデルにおけるフィッティング精度は低下するが、複雑なモデルにおける精度は維持される。したがって、単純モデルと複雑モデルのフィッティング精度の差は、CP において大きく増加する。この増加を検出することによって、CP を検出することができる。異なるモデルのフィッティング精度を比較する方法の主な利点は、CP を検出するための閾値が物体の種類に依らず、一定であることである。本研究では各モデルを 2 次元および 3 次元多項式関数とした。これはデータ処理がリーズナブルなためである。

流体圧が上昇し始める点を開始点 (SP) とする。戦略のステップは、SP 検出後に CP 検出となる。この戦略の手順を図 2-6 に示す。

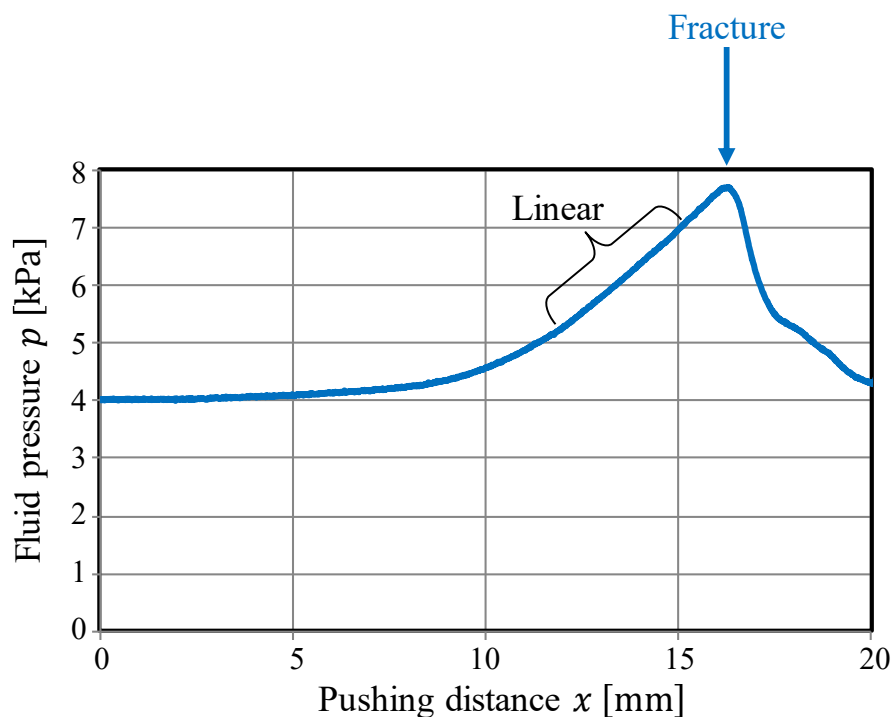


Figure 2-5. 絹ごし豆腐を流体指で圧縮した際の流体圧の挙動[1]

<i>Procedure</i>	
<i>Define</i>	$\beta = 2.5$ <i>threshold</i> = 0.007
1	Calculated \bar{p} and σ_p
2	Start closing gripper
3	Until $p_t > \bar{p} + \beta\sigma_p$
4	Read p_t
5	Loop
6	Until $\Delta RMSE > threshold$
7	Calculate $\Delta RMSE$
8	Loop
9	Stop closing & pick up

Figure 2-6. 把持戦略

時刻 t における流体圧を p_t とすると、SPは、 p_t が増加し始めるポイントである。よってSPの検出は次の条件が満たす場合とする。

$$p_t > \bar{p} + \beta\sigma_p \quad (3)$$

ここで、 \bar{p} および σ_p は、それぞれ指先に負荷が加わっていない(物体に触れていない)ときの流体圧の平均値および標準偏差を表し、 β は調整パラメータであ

る. 閾値 $(\bar{p} + \beta\sigma_p)$ は計測システムによって決定され, 対象物と押込み速度とは独立している.

その後, CPを検出するために, 上記の方法を用いる. 2次元多項式関数および3次元多項式関数は, それぞれ単純および複雑なフィッティングモデルを表す. 各モデルによるフィッティングは SP から開始し, 新しいデータが得られるたびにフィッティングを行う. t_i を i^{th} 番目の時間とすると, i^{th} 番目のタイムステップにおける2次元および3次元多項式関数は, 次のように定義される.

$$\hat{p}_t^{i2} = \sum_{j=0}^2 \alpha_j^{i2} t^j \quad (4)$$

$$\hat{p}_t^{i3} = \sum_{j=0}^3 \alpha_j^{i3} t^j$$

ここで, $\alpha^{i2} = [a_0^{i2}, a_1^{i2}, a_2^{i2}]^T$ と $\alpha^{i3} = [a_0^{i3}, a_1^{i3}, a_2^{i3}, a_3^{i3}]^T$ はそれぞれの関数の係数である. N^{th} 番目のタイムステップで, データセット $\mathcal{D}_{t_N} = \{(t_1, p_{t_1}), (t_2, p_{t_2}), \dots, (t_N, p_{t_N})\}$ が得られるものとする. ここで p_{t_i} は, i 番目のタイムステップにおける流体圧を表す. この場合, 係数 α^{i2} および α^{i3} は, 次の連立一次方程式(付録を参照)を解くことによってリーズナブルに得ることができる.

$$\alpha^{i2} = \underset{\alpha^{i2}}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^N |p_{t_j} - \hat{p}_{t_j}^{i2}|^2 \quad (5)$$

$$\alpha^{i3} = \underset{\alpha^{i3}}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^N |p_{t_j} - \hat{p}_{t_j}^{i3}|^2$$

モデルのフィッティング精度を比較するために, 平均二乗誤差 (RMSE) を計算する. $RMSE_{i2}$ と $RMSE_{i3}$ は, それぞれ i 番目のタイムステップにおける2次元多項式関数と3次元多項式関数の RMSE を表すと, 次のように定義される.

$$RMSE_{i2} = \sum_j^N \sqrt{\frac{(p_{t_j} - \hat{p}_{t_j}^{i2})^2}{N}} \quad (6)$$

$$RMSE_{i3} = \sum_j^N \sqrt{\frac{(p_{t_j} - \hat{p}_{t_j}^{i3})^2}{N}}$$

続いて、 i 番目のタイムステップでのフィッティング精度の差 $\Delta RMSE_i$ は、次のように定義される。

$$\Delta RMSE_i = RMSE_{i2} - RMSE_{i3}$$

図 2-7 に示すように、CP 前ではフィッティング精度がどちらのモデルも高くなり、 $\Delta RMSE_i$ が小さくなる。一方、CP 付近では、挙動が一様でなくなり、単純モデルでは曲線を正確に表現できなくなる。一方、複雑モデルでは表現できるため、 $\Delta RMSE$ が大きくなる。よって、 $\Delta RMSE$ の値が閾値（この場合は 0.007）を超えているかどうかをチェックすることで、CP を検出することができる。CP 検出方法は、データの挙動の変化を正確に表現できない単純モデルと、単純なモデルよりも制確認表現できる複雑モデルを必要とする。したがって、単純な 2 次元および 3 次元多項式関数ではあっても機能することができる。

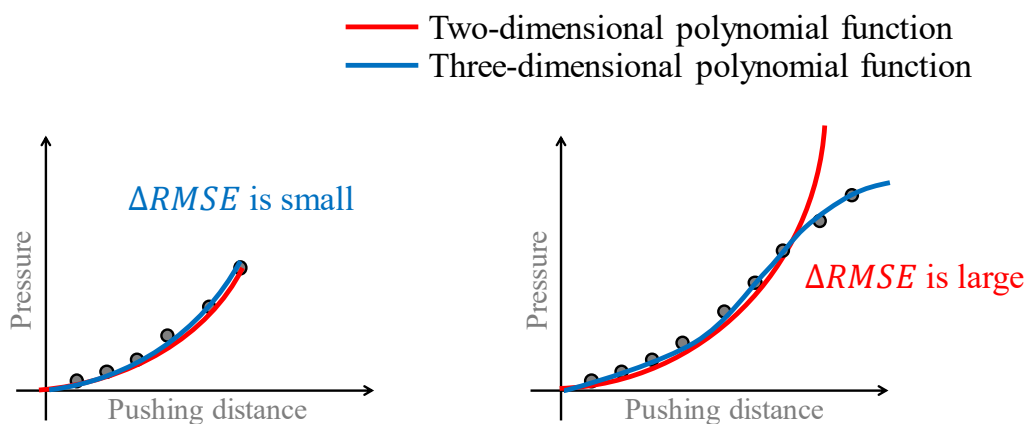


Figure 2-7. CP 検出理論

第2.4節 評価実験

提案した把持戦略の有用性を検証するために、さまざまな物体に対して把持実験を行った。図 2-8 は、実験装置を示す。2つの対向するリニアアクチュエータ（オリエンタルモーター, DRLM42G-04A2PN-K）からなるロボットグリッパを使用し、それぞれに流体指を取り付けた。提案した把持戦略に必要な、流体圧を監視するための圧力センサ（Keyence, AP-12S）は片側の流体指に設置した。グリッパを自動ステージに取り付けた。

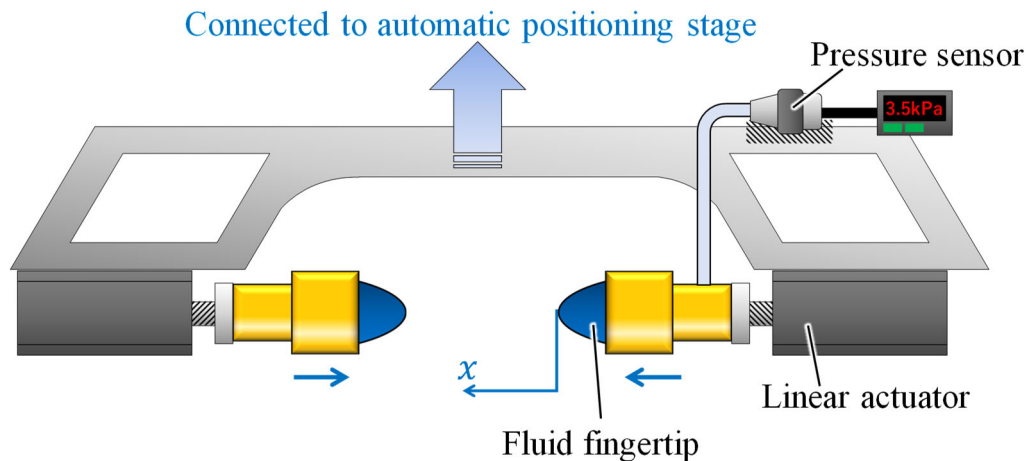


Figure 2-8. 実験装置

対象物としては、ゼラチン、絹ごし豆腐、寿司、折り紙[37]、ポテトチップスを選択した。対象物は、指先の間を中心に配置し、押し込み量 x の原点は、物体が両方の指先に接触しないランダムな位置とした。把持実験は各対象物について5回行った。すべての対象物に関して、破壊することなく把持することができた。図 2-9~13 は、把持実験結果を示す。それぞれの物体を握ったときに、自由境界の周りの小さな変形が観察された。これらの変形は、把持中に加えられた圧力または力が物体に十分に伝達されたことを示している。したがって、提案された戦略は、破壊についての事前の知識を使用することなく、壊れやすい物体を把持することが可能である。

図 2-9~13 は、CP での圧力値が対象物の種類によって異なること、および圧力値に同じ閾値を使用して CP を検出することは困難であることを示している。図 2-14 は各対象物での把持実験における SP と CP の間の $RMSE_2$ と $RMSE_3$ の挙動を示す。CP での $RMSE_2$ の値は物体の種類によって異なる（例えば、ゼラチンは 0.027、折り紙は 0.015）。つまり、 $RMSE_2$ の値のみで CP を検出しようとする場合、閾値は対象物によって調整する必要がある。これは対象物の事前知識を必要とすることになってしまう。一方、提案した把持戦略では $RMSE$ の違いを利用しているため、一定の閾値で各対象物の把握ポイントを検出することができた。よって、提案した戦略が要件を満たすことを確認した。

把持の安定性の観点から CP の状態を検証するために、様々な押し込み量での物体を把持しているときの把持耐力を調べた。実験のセットアップを図 2-15 に示します。ここでは、図 2-8 に示す装置にフォースゲージ (IMADA DST-50N) を追加した。流体指の押し込み量を 12, 14, 16, 18, 20, 22 および 24 mm とし、対向する流体指先により把持した (図 2-15 (a))。押し込み量の値は図 2-4 の値に対応し、20 mm の押し込み量は CP に相当する。各押し込み量で物体をピックアップした後、物体の側面に水平方向の荷重を加え、物体が落下するときの荷重を調べた。この荷重の最大値を把持耐力と定義する。実験は各押し込み量につき3回行った。結果を図 2-16 に示す。各押し込み量での平均値と標準偏差を示す。CP 付近 (押し込み量 20 mm) 以降では、把持耐力は収束した。また、把持耐力の標

準偏差は CP 付近で小さな値に収束した。外力が加わっても把持は維持され、安定した把持を示した。したがって、CP 以降では安定した把持耐力を得ることが可能なことを示す。把持耐力が収束するのは、物体への指部の侵入がほぼ止まり、接触面積がほぼ一定になったためであると考えられる。押し込み量 x が CP よりも小さいとき、把持耐力は小さく、把持耐力も変動しやすかった。これは、この押し込み量での把持が CP で把持する場合よりも不安定であることを示している。その結果、安定把持の観点から CP が最も適した把持ポイントであることがわかる。

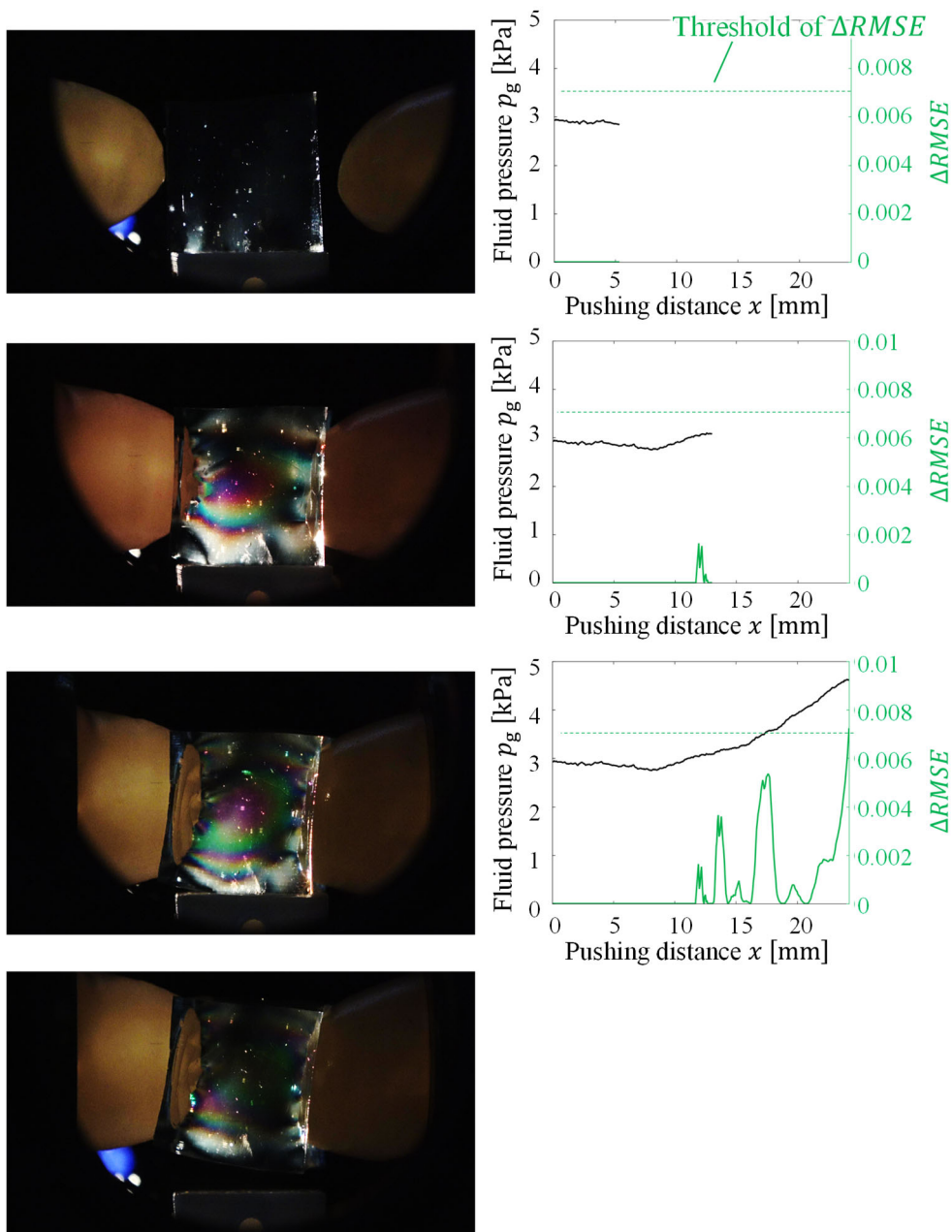


Figure 2-9. 把持実験(ゼラチン)

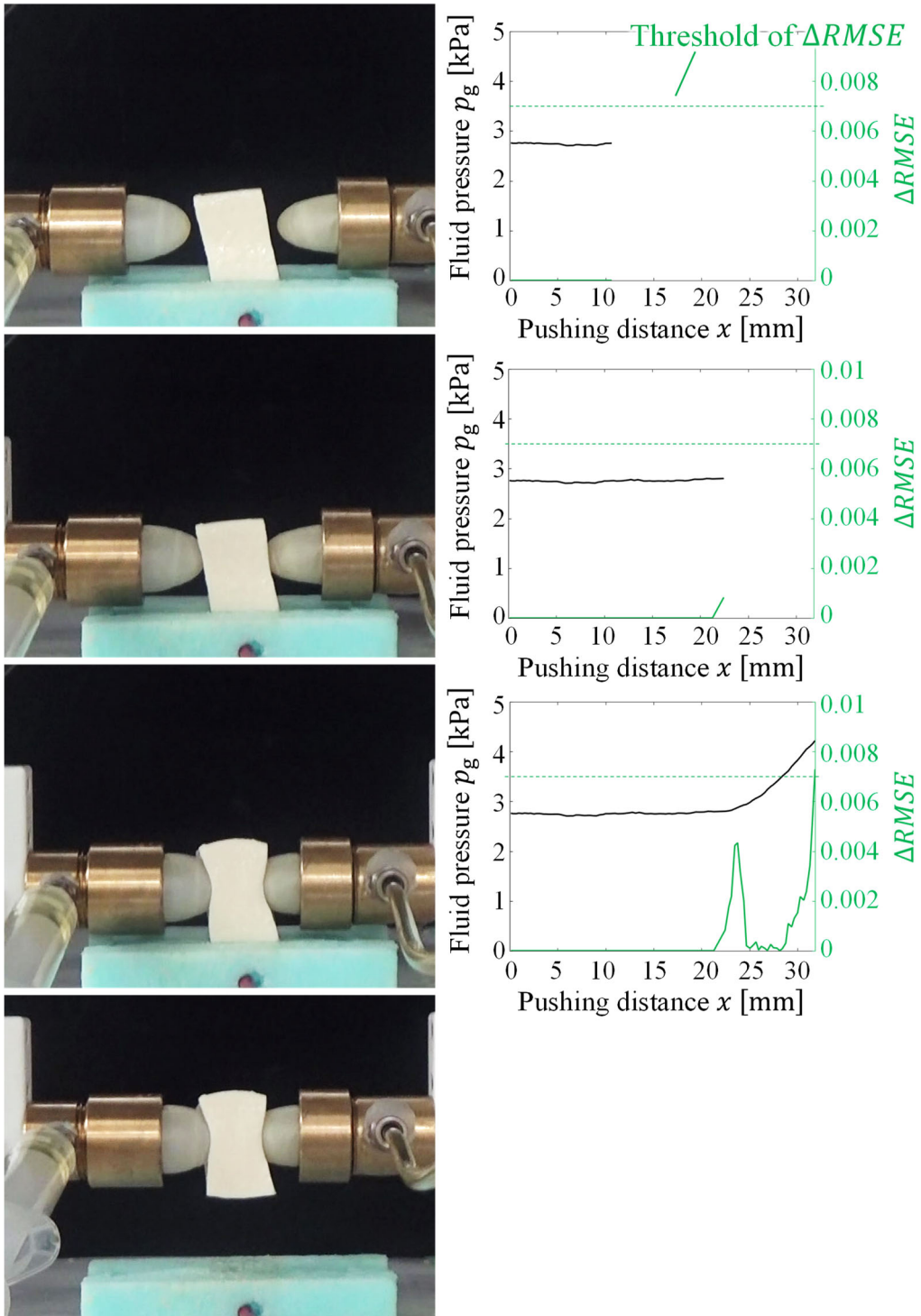


Figure 2-10. 把持実験 (絹ごし豆腐)

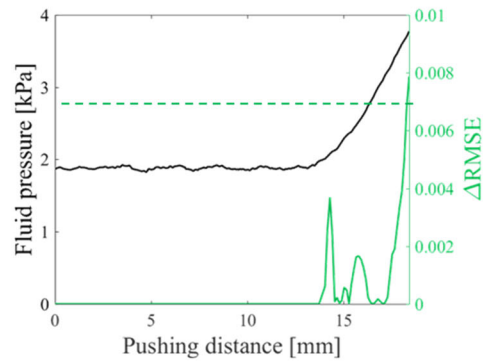
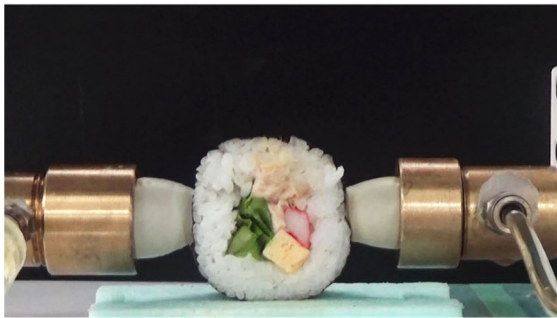
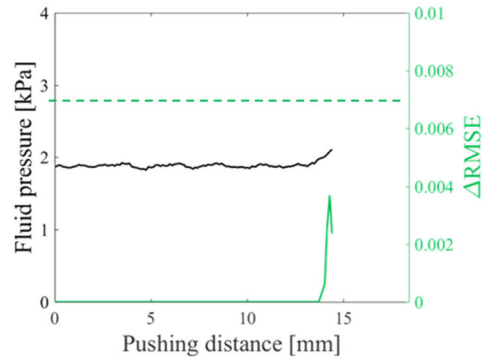
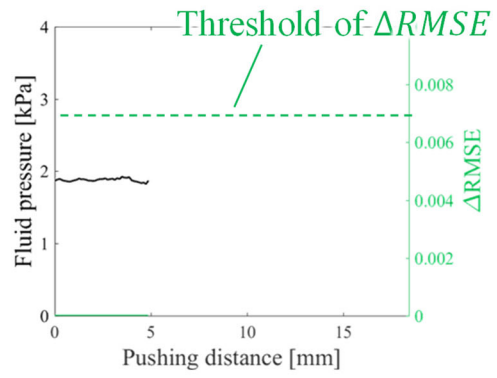


Figure 2-11. 把持実験 (寿司)

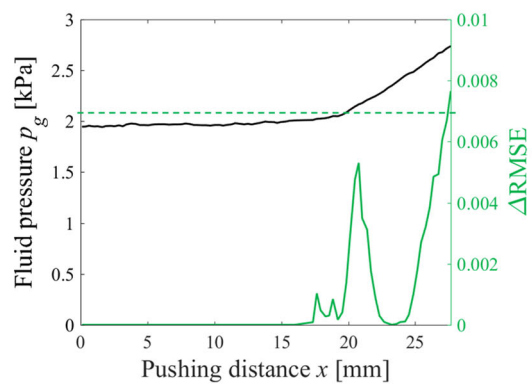
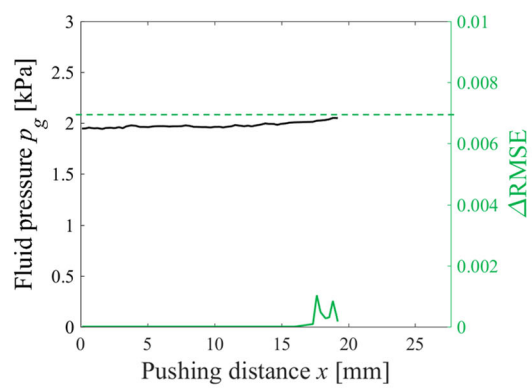
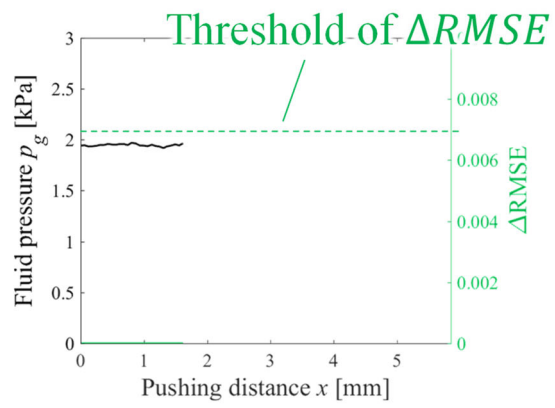
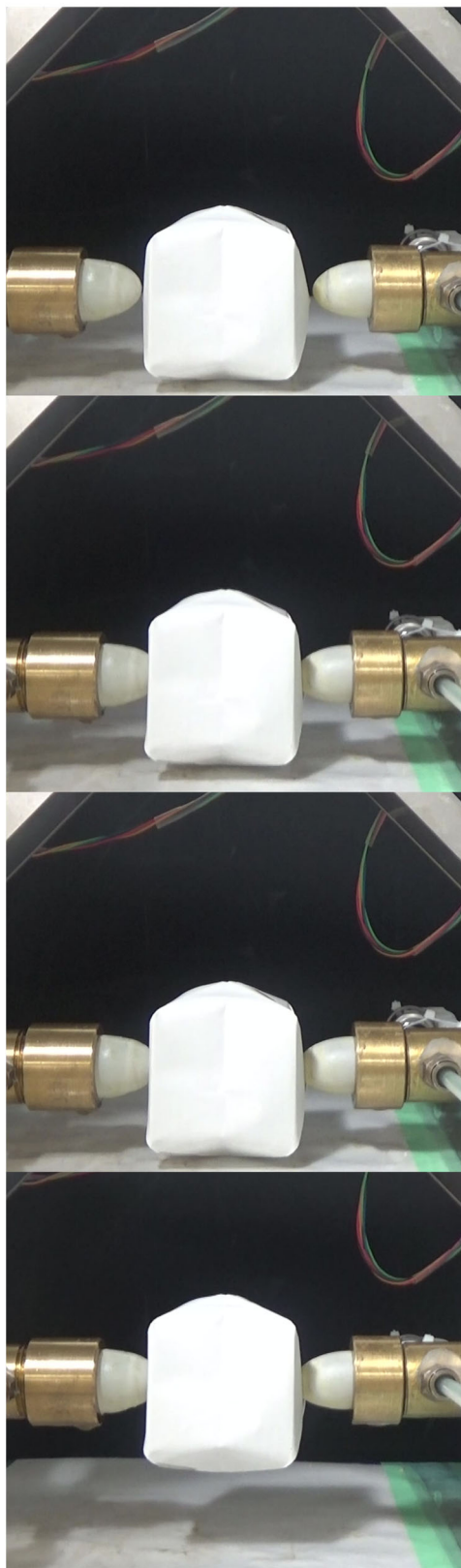


Figure 2-12. 把持実験 (折り紙)

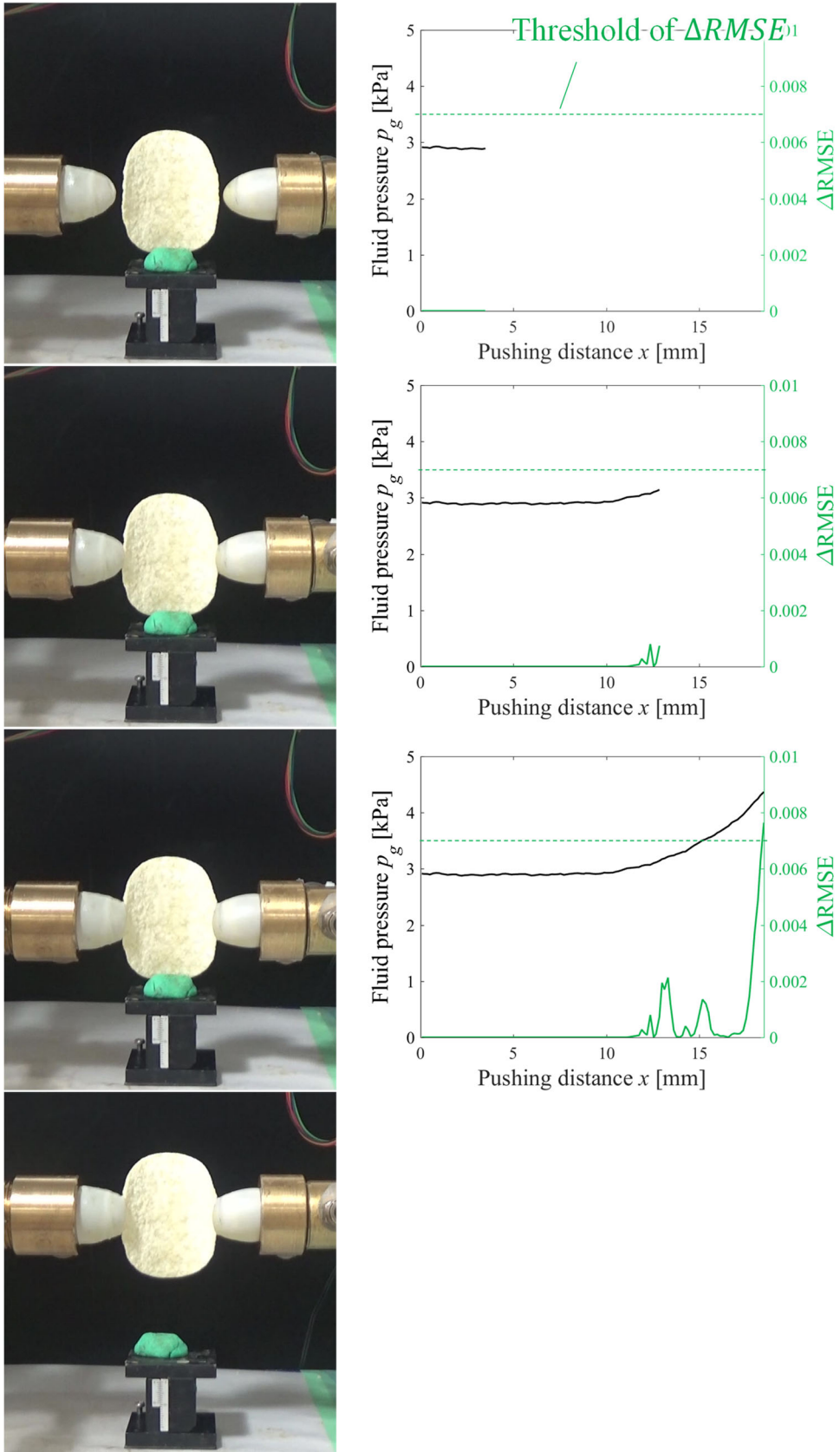
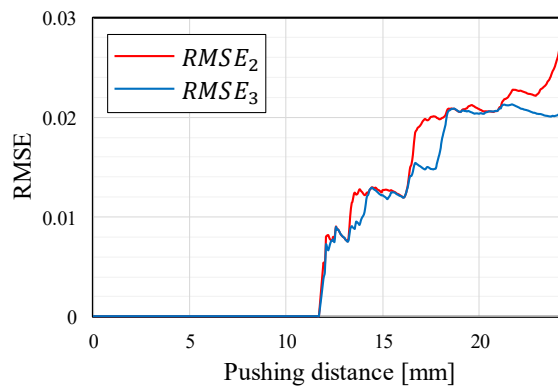
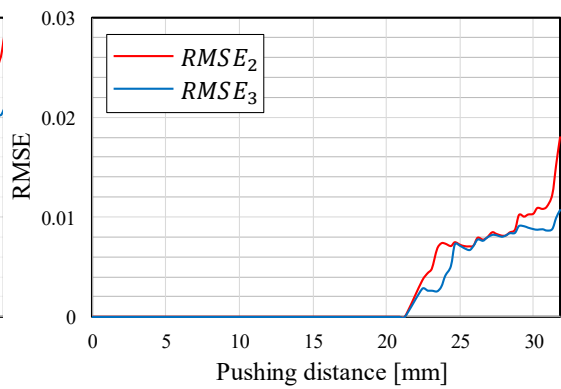


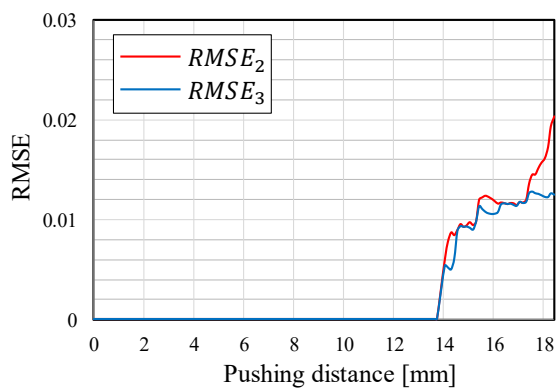
Figure 2-13. 把持実験 (ポテチ)



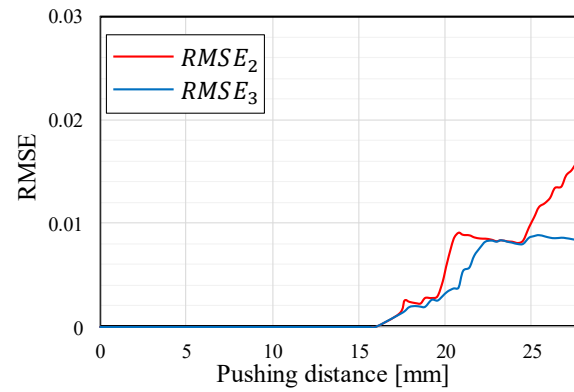
(a) ゼラチン



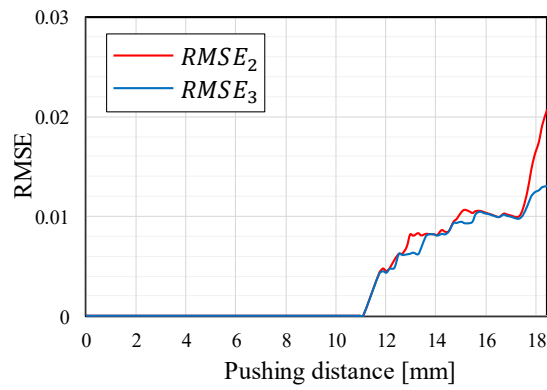
(b) 絹ごし豆腐



(c) 寿司

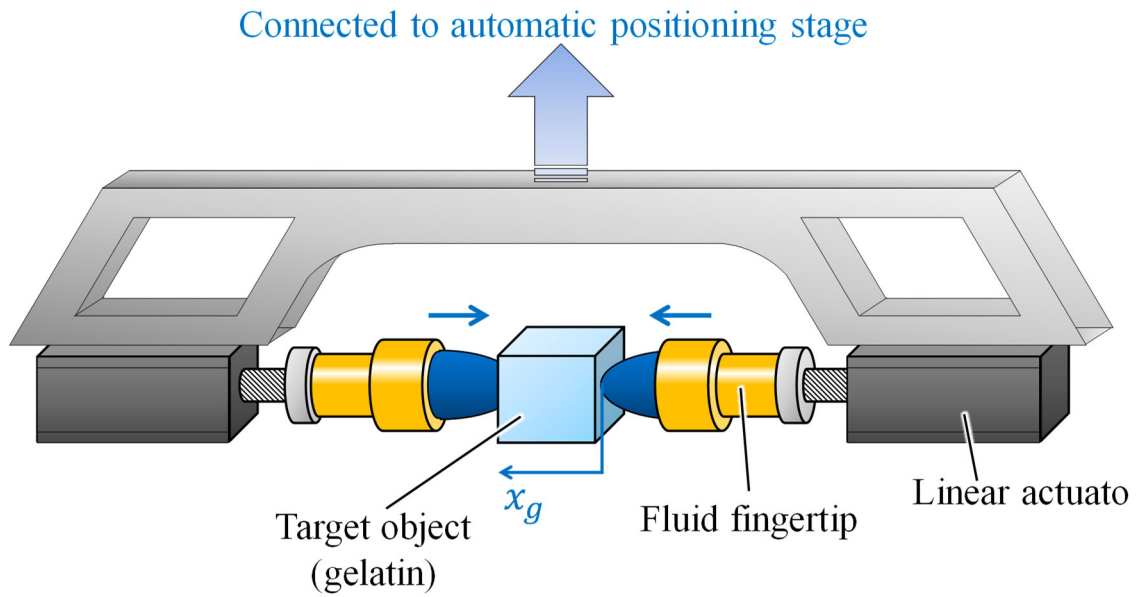


(d) 折り紙

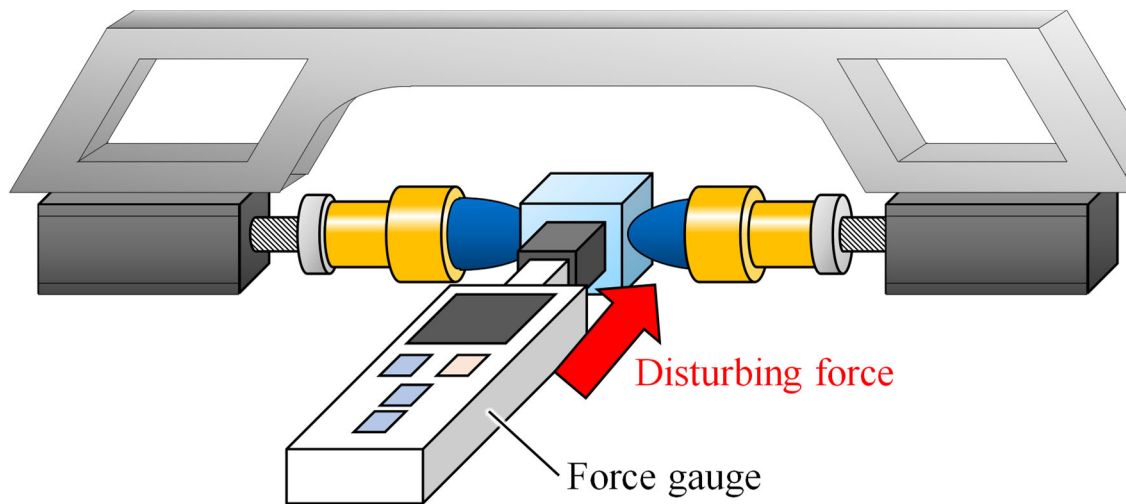


(e) ポテトチップス

Figure 2-14. 各対象物の把持の際の $RMSE_2$ と $RMSE_3$ の挙動



(a) Step 1: 押込み量を $x = 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24$ mm でそれぞれ把持



(b) Step 2: 横からフォースゲージで押す。落下した時を把持耐力とする。

Figure 2-15. 実験装置と実験手順

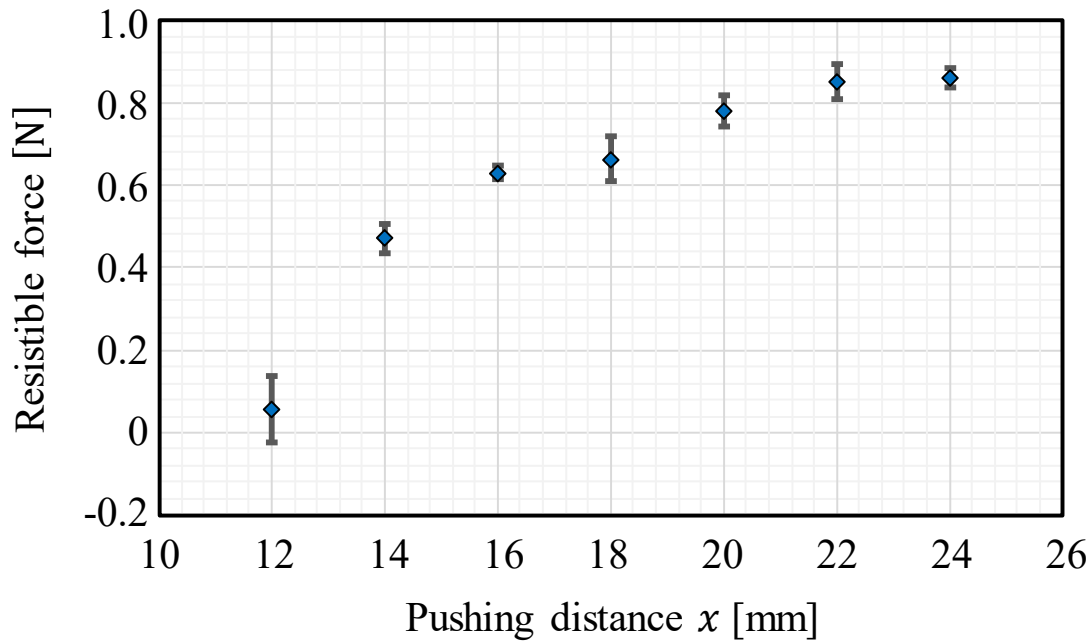


Figure 2- 1. 各押し込み量の把持耐力

第2.5節 おわりに

本章では、流体指を用いて壊れやすい物体を把握するための戦略を提案した。本戦略は、対象物の破壊を回避することができ、一方で流体指によって対象物に把持に十分な力を伝達することができる。2つのモデルのフィッティング精度を比較することによって下記の特徴が得られた

- 1) オンラインで検出が可能である。
- 2) 流体圧に関する情報のみで把持できる。
- 3) 検出のための閾値が対象物の種類に依らず一定である。

提案した手法は、対象物の剛性および変形に関する高度な知識を必要としない。提案した手法の有用性についても検証した。

流体指の流体圧は接触圧力に対応しているため、剛性や粘度などの対象物の状態情報が含まれてる。したがって、流体圧の監視および調整は、物体の状態に応じて指先の剛性を調整することができ、未知の対象物の剛性または粘度などの未知のパラメータを識別することにより、高度な把持または操作戦略が可能となる。

流体指の特性については十分に検証できたため、次章からは流体指を備える汎用ハンドの設計を行う。

第3章 マイクログリッパ内蔵流体指の開発

第3.1節 はじめに

1章にて述べた通り，幅広い物体の把持が可能なロボットハンドの開発にあたり，「指先」は重要な要素である．一般的にロボットハンドの指部は硬いものが多く，硬い指(以下，剛体指)の特徴として

- 重量物の把持が可能なこと．
- 柔らかい(壊れやすい)物体の把持が苦手であること．

が挙げられる．一方，柔らかい指は人間の指に近いことや硬い指にはない特徴があることから，その力の性質や形状変化，それを含むシステムなど様々な面から研究されている．H.B.Shimogaらはロボットハンドの指部に弾性膜を張り，中に様々な物質を充填しそれぞれの評価を行ったがその中には流体(ゲル)を充填したものもあった[38]．本研究グループもこれまで指部に弾性膜を張り，内部に流体(オイル)を充填した流体指の開発・研究を進めており，前章でもその有用性を示した．流体指を含む柔らかい指(以下，柔軟指)の特徴としては

- 複雑な形状の物体も把持できること．
- 壊れやすい物体も把持しやすいこと．
- 重量物の把持は苦手であること．

が挙げられる．

このように指の剛性によって把持が得意な物体，苦手な物体が存在する．そこで汎用ロボットハンド実現のために本章では流体指の内部に剛体のリンク機構を持つ，流体と剛体のハイブリッド構造の指部の設計・開発を行う．本研究ではその内部の剛体機構をマイクログリッパと呼ぶ．そのマイクログリッパ内蔵流体指を用いることで従来の剛体指や柔軟指がそれぞれ苦手とするような物体に対して剛体部と流体部でそれぞれの苦手を補うことで把持が可能な汎用性のある指を開発する(図3-エラー! 参照元が見つかりません．)．本稿では把持しにくい物体として

- 重量物
- 壊れやすい物体
- 複雑形状物体
- 大型の物体

を対象とし，それらの把持が可能なマイクログリッパ内蔵流体指の開発を行う．さらにその内部機構は指を押し込むことで受動的に動作し，位置補正機能も有するものとする．

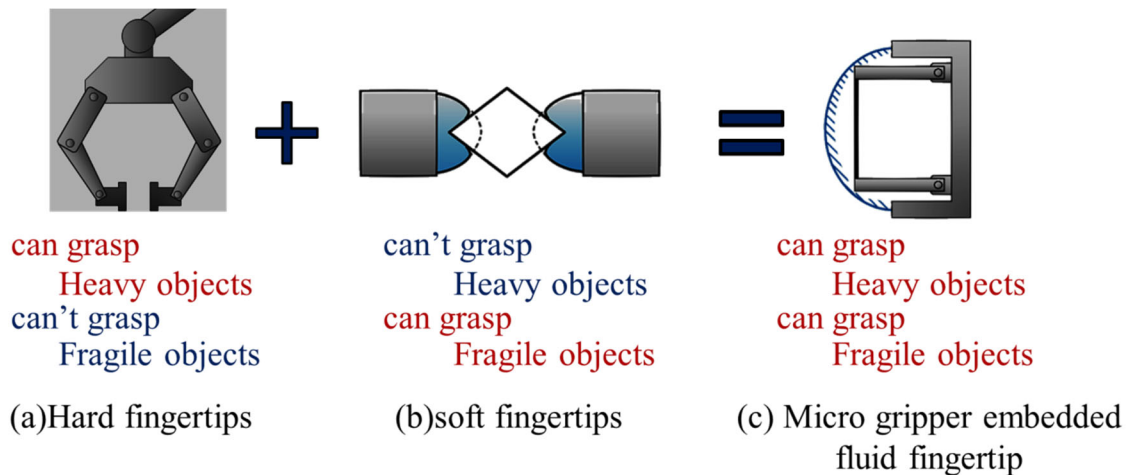


Figure 3-1. Grasping object with micro-gripper

第3.1.1項 関連研究

G.Grioli らは1つのアクチュエータで3本の指が動く、劣駆動ハンドを開発した[39]. M.Roa らは5指ハンドの把持シミュレーションを行った. S.Hirose らは対象物になじむ蛇型のハンドを開発した[34]. E.Brown らはジャミング効果を利用したハンドを開発した[18]. H.Choi らは空気を充填した流体指を持つグリッパを用いて様々な物体を把持している[21]. しかし、空気は圧縮性流体であるため流体圧力の制御が難しくなる. A.Pettersson らはMR流体を充填したグリッパを開発し、果物のピックングを行った[17]. このハンドはMR流体を用いているため励磁装置をグリッパに搭載する必要があり大型になってしまう. これらのようにロボットハンドは多様な面から研究されており、H.Choi や A.Pettersson のように流体指を搭載したハンドも存在する.

またエンドエフェクタとなるため、指に関する研究も多い. L.Jiang らはFBG (Fiber Bragg Gratings)センサを埋め込んだワイヤー駆動で動作する指を開発している[40]. Arimoto らは柔軟指による剛体の把持に着目し、2つの指で物体を把持したときの動力学を解析している[41]. Hosoda らは人の指を模したシリコーン指の内部にひずみゲージとPVDF(ピエゾ素子)フィルムを埋め込み接触実験を行うことで柔軟指の力のセンシングについて研究した[42]. N.Xydas らは柔軟指を押し付けた際の形状の変化などを調査した[43]. Arimoto や Hosoda, の指はシリコーンなどの弾性体で構成されるが流体指はその柔らかさから目標把持物体になじんだ把持ができるだけでなく、内部の流体圧力が弾性膜表面に均一に加わるため把持物体にも力が集中することなく把持することができる[44]. この特徴を用いて本研究グループは豆腐やポテトチップスなどの壊れやすい物体の把持に成功している. しかし本研究グループを含む柔軟指に関する研究の多くが重量物の把持は試みていない. それは柔軟指が重量物を把持した際、指部が変形し十分な摩擦力を得られないため[45], 柔軟指は剛体指に比べて重量物の把持が苦手であるからである.

一般的にソフトハンドは重量物の把持を苦手とし、iHY ハンド[15]は 22kg,

Flexible gripper[16]は 4kg などのように関節部に柔らかさを持つハンドは可搬重量が大きいものも存在が、皮膚に柔らかさを持つハンドはどれも可搬重量は小さい。しかし皮膚の柔らかさは柔軟物体を把持する際に大きな恩恵を与える。そのため汎用ハンドを目指すうえでは皮膚の柔らかさは必須の要素である。

自動車工場の車体部品などを把持するハンドならば重量物の把持に適した剛体指を持つハンドにすればよく、果物など形状が不確かなものに対しては柔軟指が適している。また指部の形状も工場のラインなどの単一の物体のみを把持するハンドはその目標物体の形状に合わせた設計にすれば良い。このように重量や形状がある程度限定された対象物を把持する際はそれぞれに適した指が存在する。しかし今後、家庭などにもロボットが浸透し、特定の物体ではなく様々な物体を把持できる汎用性のあるロボットハンドが必要になると考えられる。

そこでマイクログリップ内蔵流体指は壊れやすい物体や複雑形状物体の把持は流体部で把持し、重量物は剛体のマイクログリップで把持することで流体指、剛体指のみでは把持が困難な物体も 2 つの剛性を持つ本指ならば互いに欠点を補うことで把持が可能となる。本稿のように 2 つの剛性を持つハイブリッド構造の指に関する研究はいくつかあり、IanM.Bullock らは剛体の芯のまわりに弾性体を覆い、内部の剛体の芯の形状を円や星形などに変更し、それぞれを評価することで把持に適した形状を研究した[46]。Hasegawa らはシリコンでできた円筒形の指にアルミニウム製の爪を取り付け人間の指を模した指を作っている。その爪により物体の段差や隙間に引っ掛けて把持する指を開発している[47]。これらは弾性体と剛体のハイブリッド構造である。Maruyama らは流体指の内部に弾性部分を設けることで指を押し込んだ際に流体指が変形し物体が内部の弾性部に接触することで、剛性が流体指から弾性指に切り替わる流体と弾性体のハイブリッド構造を開発した[3]。本論文で提案するマイクログリップ内蔵流体指は内部に剛体の 2 本のリンクを設けた流体と剛体のハイブリッド構造である。本指は内部の剛体部がリンク機構となっており可動な点が上述の 3 つのハイブリッド構造を持つ指と異なる点である。これにより薄板などに対しては力学的な拘束に加え幾何学的な拘束を加えることで剛体指でも把持できない重量でも把持することができると考えられる。また指を押し込むことで受動的にマイクログリップが開閉する機構にすることでアクチュエータを増やさず制御の複雑化を防ぐものとする。

ロボットハンドが用いられる場面でほとんど場合に求められるのが上述のような把持(ピック作業)およびプレイス作業である。プレイス作業にはプレイスする位置精度が求められるが、それは把持位置に大きく左右される。目標物体の初期セッティングにずれがある場合には把持位置を常に同じにするには物体に対してハンドの位置を調整するのが一般的である。そしてその物体位置の検出には外界センサとしてカメラが使われることが多い(ロボットビジョン)。R.Ramadour らはロボットハンドにカメラを取り付け、予め与えておいた物体の画像を用いて得られた画像から物体を認識することで物体が動いていてもピックアップできるシステムを提案している[48]。しかしこのマイクログリップ内蔵の流体指を用いるハンドの位置を調整するのではなく指を押し込むことで物体を指中心に引き込むことで位置調整を行うことが可能となる。本論文では主に幾

何学的関係からマイクログリッパの設計を行う。

第3.2節 マイクログリッパ内蔵流体指の設計

第3.2.1項 設計要件

本研究で開発する流体指の設計要件を示す。

- (1) 流体指に接続するのは圧力センサとポンプのみで他に自由度を増やさない。
- (2) 把持耐力の増加は把持物体を押し込んだときに受動的に起こる。
- (3) 流体指の長所は無くさない
- (4) 把持耐力向上
- (5) 位置補正機能を有する
- (6) 小型化
- (7) 本稿では大きな把持耐力を発揮できる対象物体を 12mm 程度の厚さのものまでと設定する。

とする。設計要件(1), (2)は緒言で述べたように制御を複雑化しないためである。設計要件(3)は 1 章で述べたなじむ把持, 圧力集中がないという長所を用いて柔らかい物体や形状が不確かな物体を把持するためである, 設計要件(5)は力学的拘束に幾何学的拘束を加えることで力学的拘束のみの剛体指よりも大きな把持耐力を得ることを目指す。設計要件(7)はスマートフォン程度の厚さのものを想定した。ペンなど身の回りの物体もおおよそ 12mm 以下の厚さのものが多いことも勘案している。設計要件(5)については次節に示す。

第3.3節 マイクログリッパの基本仕様

受動的な機構のために考えなければならないのは, その機構が動作するきっかけである。流体指の場合, 把持の際に変化するのは内部の圧力と表面形状である。内部の圧力変化を利用して動作させる場合, 内部の構造が複雑になると考えられる。複雑な構造は小型化を目指したときに弊害となるためできる限り単純な機構を目指す。そこで物体を押し込んだ際の指の表面形状の変化を利用するために図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のような開閉する突起(以下, アーム)を持つ機構(以下, マイクログリッパ)を埋め込むことを提案する。アームの先端同士を非伸縮性の柔軟帯で繋ぐ。物体を押し込んでいないときはアーム根元のトーションバネの復元力で開いている。物体把持中はこの柔軟帯を物体が押し込んでいくことでグリッパが閉じる。この機構により以下のような 3 種類の把持形態が可能となる。

- (1) マイクログリッパは用いず(把持物体に接触させない), 流体部分で持つ形態。
- (2) マイクログリッパで物体を挟み込む形態。
- (3) アームを押し当てて把持する形態。

把持形態(1)は、図 3-エラー! 参照元が見つかりません。(a)のようにマイクログリップは用いずに流体部分で持つことで壊れやすい物体や複雑形状物体の把持に適している。しかし流体指と同様、重量物把持は困難である。把持形態(2)は図 3-エラー! 参照元が見つかりません。(b)のようにマイクログリップで物体を挟み込む把持形態である。これはアーム間距離よりも薄い把持部を持つ物体の把持に限られるがマイクログリップが閉じることで力学的拘束に加えて幾何学的拘束が加味されるため剛体指以上の把持耐力を得ることができる。把持形態(3)は図 3-エラー! 参照元が見つかりません。(c)のようにアーム間距離よりも厚い物体を把持した際にアームを押し当てて把持する形態である。これは幾何学的拘束がないため把持形態(2)ほどの把持耐力向上はないが、剛体部で把持するため流体指と比較すると大きな把持耐力となる。本論文では主にマイクログリップで挟み込む把持形態について議論する。

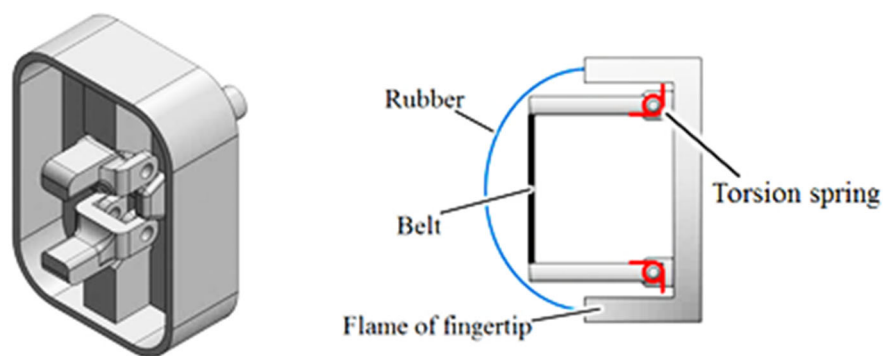


Figure 3-2. マイクログリップの構造

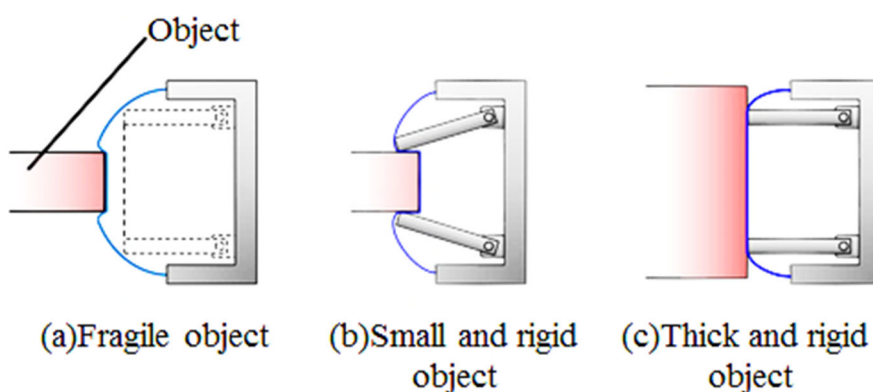


Figure 3-3. マイクログリップ内蔵流体指の把持形態

さらにこの機構のもう一つのメリットが位置決め補正である。内部に機構を持たない流体指の場合、その柔らかさにより把持は可能であるが、把持位置はずれやすく、プレイス作業など位置決めが求められる作業ではデメリットとなる。本流体指の場合、対象物を指内部へと引き込む際、必ず機構の中心へと把持物体が引き込まれる。これにより精密な位置決めが可能となる。以下ではその機構の中心への引き込みがなぜ成り立つかについて示す。簡単化のため、下

記のような仮定をおく.

- 奥行き方向の対称性から 2 次元で議論できる.
- マイクログリッパ先端部の柔軟帯は非伸縮である.
- 各リンク根元に設置されているトーションバネ同士は運動しない.
- 把持対象物の接触部は機構に比べて十分薄いとして対象物を棒形状として議論する.
- 物体と柔軟帯の間には弾性膜と内部流体が存在するため内部流体が潤滑剤となる. 加えて, 弾性膜の伸縮性により把持物体と弾性膜間はすべらなくとも弾性膜と柔軟帯間はすべる. このため把持物体の表面形状に関係なく柔軟帯に加わる摩擦は無視できると考えられる. そこで把持物体とは摩擦なし点接触をするものとする.

把持物体を水平に ε 押し込んでいくとき上下のアームがそれぞれ θ_1, θ_2 だけ閉じ柔軟帯が変形しているときの幾何学的関係と力の関係をそれぞれ図 3-エラー! 参照元が見つかりません., 図 3-エラー! 参照元が見つかりません. に示す. 図 3-エラー! 参照元が見つかりません. より幾何学的関係は

$$\varepsilon = \delta_1 \cos \alpha_1 + l(1 - \cos \theta_1) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \delta_2 \cos \alpha_2 + l(1 - \cos \theta_2) \quad (2)$$

である. 接触点と各アームの先端との距離を δ_1, δ_2 とした. 図 3-7 より柔軟帯の張力を T とし水平方向の力の関係と鉛直方向の合力 f_{ver} , および図 3-エラー! 参照元が見つかりません. での上下のアームの回転軸まわりのモーメント M_1, M_2 は次のようになる.

$$f_{gra} = T(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (3)$$

$$f_{ver} = T(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \quad (4)$$

$$M_1 = -T \sin(\alpha_1 + \theta_1) + k\theta_1 \quad (5)$$

$$M_2 = T \sin(\alpha_2 + \theta_2) - k\theta_2 \quad (6)$$

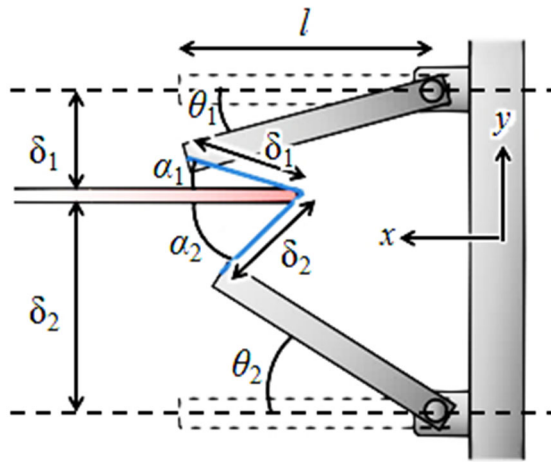


Figure 3-4. マイクログリッパの幾何関係

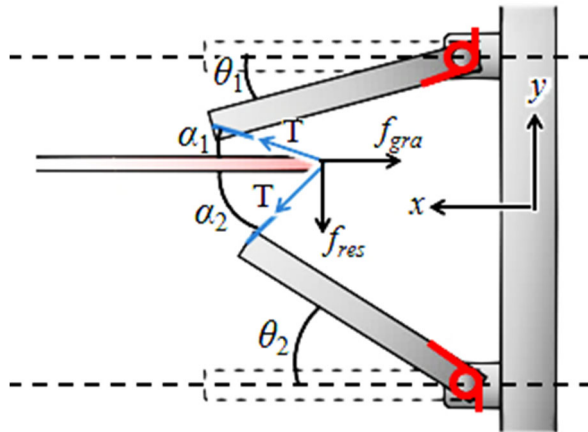


Figure 3-5. マイクログリッパの力学関係

ただしトーションバネのばね定数を $k[\text{N} \cdot \text{m}/\text{deg}]$ とした. 図 3-エラー! 参照元が見つかりません. において物体が中心よりも上にずれているとき ($\delta_1 < \delta_2$ のとき), $\alpha_1 < \alpha_2$ となるため $f_{\text{ver}} < 0$ となり, 物体には下向きの力が加わることで物体は中心方向に移動する. 同様に中心よりも下にずれたとき ($\delta_1 > \delta_2$ のとき) は $\alpha_1 > \alpha_2$ であり $f_{\text{ver}} > 0$ となるため上向き方向に力が加わり物体が中心に移動する. よって, 鉛直方向に釣り合うためには $f_{\text{ver}} = 0$ となるときなので式(4)より $\alpha_1 = \alpha_2$ である. さらにアームが静止するのは M_1 と M_2 の大きさが等しくなるときなので式(5), (6)より $\theta_1 = \theta_2$ となる. 式(1), (2)より $\delta_1 = \delta_2$ となり, 図 3-エラー! 参照元が見つかりません. のように物体をアーム間の中心に引き込むことができる. そこからさらに物体を押し込みアームが閉じることで物体を幾何学的な拘束で把持することができる.

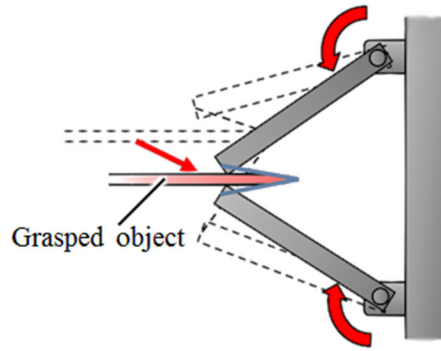


Figure 3-6. マイクログリッパによる幾何拘束

よって本機構では把持物体の位置がずれていても指を押し込むことで位置補正ができ、物体を置く際のずれを無くすることができる (図 3-エラー! 参照元が見つかりません。)



Figure 3-7. 位置補正機能

このマイクログリッパの設計では図 3-エラー! 参照元が見つかりません。(a)のようにマイクログリッパを用いて重量物を把持しようとしたとき、その重さによりアームが回転してしまい位置決め補正機能が失われる可能性がある。そこで図 3-エラー! 参照元が見つかりません。bのようにアームの根元部にストッパーを設ける。このストッパーはアームが閉じる方向に回転し過ぎるのを防ぐためである。これにより物体を押し込んだ状態では帯の張力も働くため把持中にアームが回転し物体がずれるのを防ぐことができると考えられる。また図 3-エラー! 参照元が見つかりません。(c)のようにアーム間距離より大きな物体を把持する際はアームを押し当て把持耐力を向上させるが、そのとき物体を押し当てる力によりアームが回転してはいけない。そこで図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のようにアームをわずかに開いた状態を初期状態とすることで物体を押し込んだ際に、アームが閉じる方向に回転しないようにするものとする。さらに一方が内側、一方が外側に回転しないように図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のように外側にもストッパーを設けるものとする。

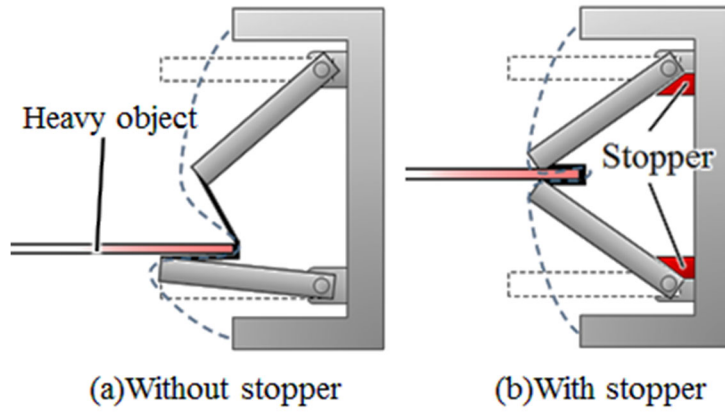


Figure 3-8. Grasping heavy object with micro-gripper

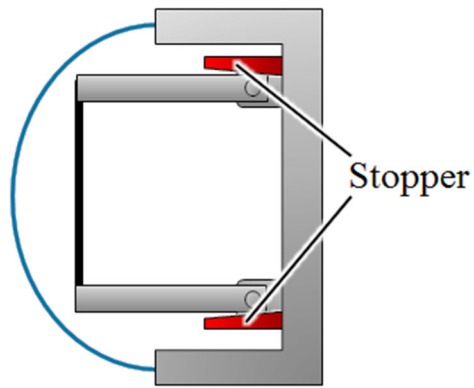


Figure 3-9. Initial state of micro-gripper

第3.4節 マイクログリッパの設計

機構の具体的な各寸法の設計手順を幾何学的な条件を考慮することで示す。設計において決定すべき寸法は図 3-エラー! 参照元が見つかりません。の通りである。外形の高さ a 、幅 b 、深さ d 、マイクログリッパのアーム長 l 、アーム間距離 w である。ここで w は把持物体の大きさによって決定され、 a と b も取り付けるハンドの大きさや周囲の環境に合わせて適宜決定するものとする。今回は人間の指 2 本分程度の大きさを想定し $a=44\text{mm}$ 、 $b=32\text{mm}$ とする。また目標把持物体の厚さを 12mm と設定し、位置決め精度や寸法精度を考慮し $w=14\text{mm}$ とする。よって以下には残りの 2 つの寸法(l 、 d)を決定する手順と使用時の内圧を示す。

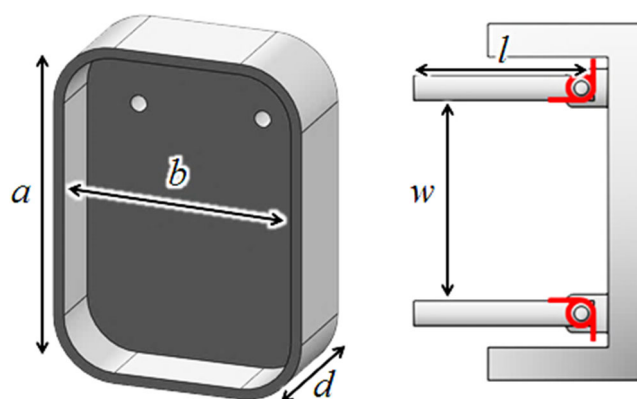


Figure 3-10. Measurement of fingertip

まずはマイクログリッパの寸法の条件を考える。目標把持物体の厚さを w とする。厚さ w 以下の物体を把持するために厚さが 0 に近い物体(薄板)を押し込んだときも考える必要がある。薄板を押し込んだときの幾何学的関係は図 3-エラー! 参照元が見つかりません。より

$$\theta = \sin^{-1} \frac{w}{2l} \quad (7)$$

である。薄板を押し込んだとき薄板の先端の押し込み量が $w/2$ となることを考慮すると押し込んだ薄板が指外形の枠に接触しないためには

$$l \cos \theta > d + \frac{w}{2} \quad (8)$$

という条件が成り立つ。式(7)、(8)より

$$l \sqrt{1 - \left(\frac{w}{2l}\right)^2} - \frac{w}{2} > d \quad (9)$$

式(9)の示す範囲は図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のようになる。これによりアーム長 l と指の枠の深さ d の条件が求まる。ただし図 3-エラー! 参照元が見つかりません。は目標把持物体の厚さを 12mm と設定し、位置決め精度や寸法精度を考慮し $w=14\text{mm}$ としたものである。

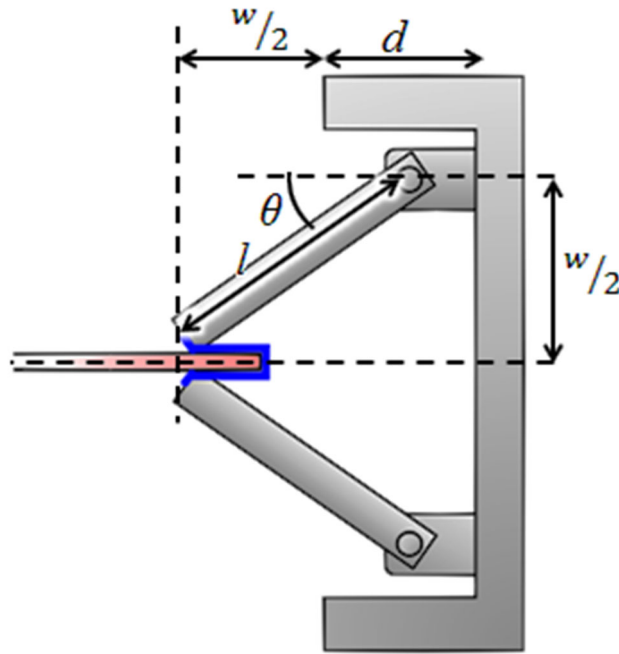


Figure 3- 11. シートの把持

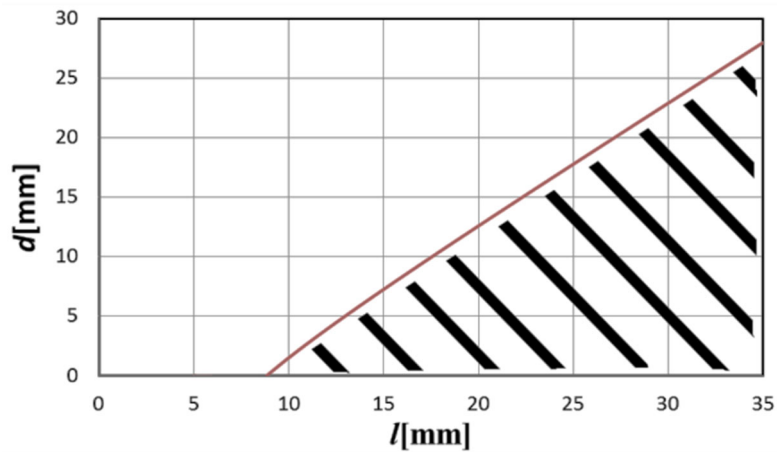


Figure 3-12. 式(9)を満たす領域

さらに式(9)での臨界点を用いて l と $l-d$ との関係とその曲線の傾きを求めると図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のようになる。

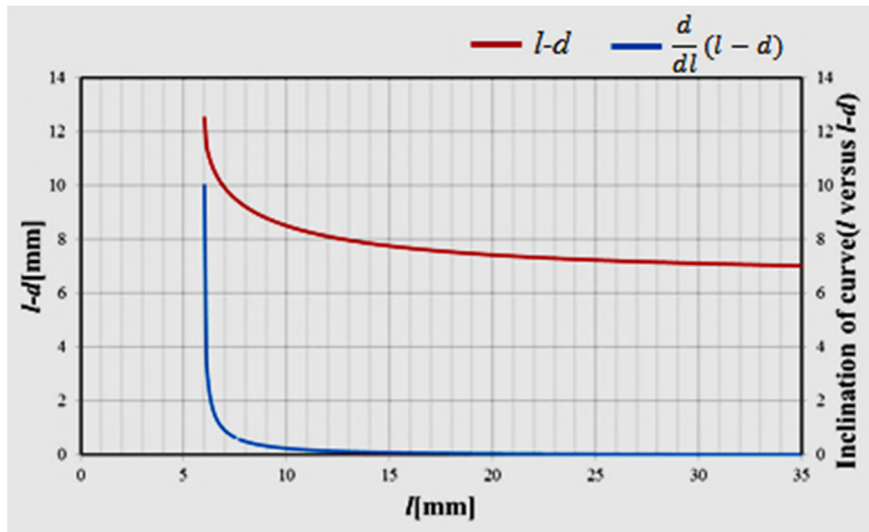


Figure 3-13. アーム長さ l に対する $l-d$ と $\frac{d}{dl}(l-d)$ の関係

この $l-d$ という値は図 3-14 のようにマイクログリッパが開いた状態でのアーム先端と指外形の杵との距離であり、弾性膜を膨張させるべき大きさである。つまり $l-d$ が大きいほど弾性膜を膨張させるために内圧を高くする必要があるが、内圧が高いと把持物体によっては把持の際に弾性膜の破損などにつながる可能性がある。そのため $l-d$ の値は小さいほど良いと考えられる。そのために図 3-13 からわかるように l を大きくすれば $l-d$ を小さくできる。しかし l が大きいほど指の大きさに影響するため、 l も極力小さい方が良いと考えられる。よって $l-d$ を小さくしつつ l も長くなり過ぎない最適なバランスとなる寸法を決定する必要がある。図 3-エラー! 参照元が見つかりません。より l を大きくすると $l-d$ の曲線の傾きも徐々に小さくなっていることからこの傾きの閾値を定めることで $l-d$ を小さくしつつ l を出来る限り小さい長さにできると考えられる。今回は傾きの閾値を 0.1 とすると $l=14.4\text{mm}$, $d=6.59\text{mm}$, $l-d=7.81\text{mm}$ となる。

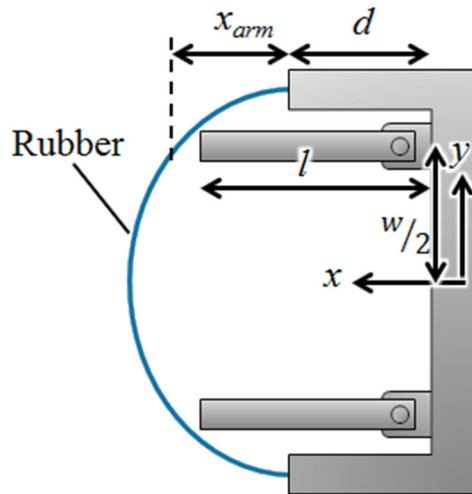


Figure 3-14. 全開時のマイクログリッパ

第3.5節 流体指内圧の決定

次に指表面の形状の推定から最適な内圧の設定を行う．設計要件(3)で示したように流体指は内部の圧力が均一で把持物体に圧力集中がかからないという長所を残す必要がある．そのためにアームの先端が弾性膜の表面に接触しないようにしなければならない．

そこで流体指の表面形状の計測を行い，流体指表面の断面形状を楕円で近似する．図 3-エラー! 参照元が見つかりません.のように固定した流体指を横から撮影し，図 3-エラー! 参照元が見つかりません.のように流体指先端の高さ x_{tip} と弾性膜の接合部の接線の傾き角 φ を各圧力で測定する．図 3-エラー! 参照元が見つかりません.は $a=44\text{mm}$ ， $b=32\text{mm}$ としたときの P と x_{tip} ， φ との関係である．

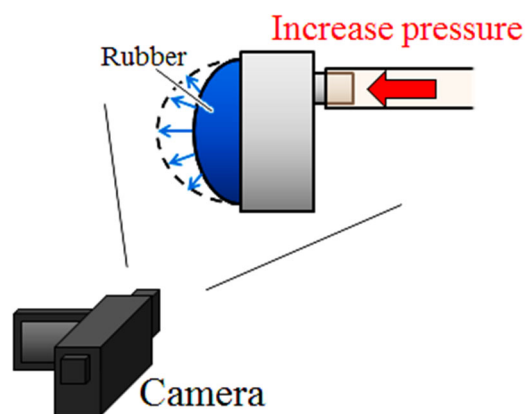


Figure 3- 15. 指の先端形状の測定

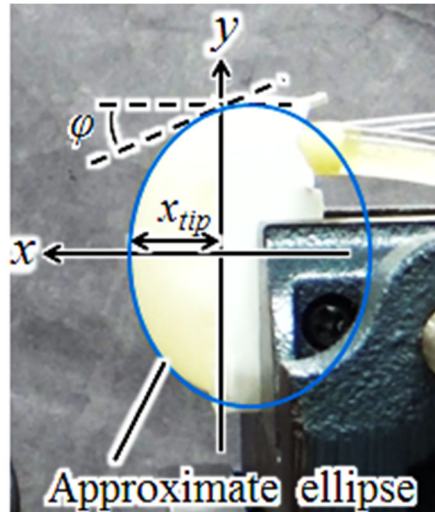


Figure 3-16. 楕円形上による近似

そこから圧力 P [kPa]と高さ x_{tip} [mm], 傾き角 φ [deg]との関係式

$$x_{tip} = 0.769P + 4.1158 \quad (10)$$

$$\varphi = -4.122P + 67.60 \quad (11)$$

を得ることで任意の圧力での x_{tip} , φ を求めることができる。

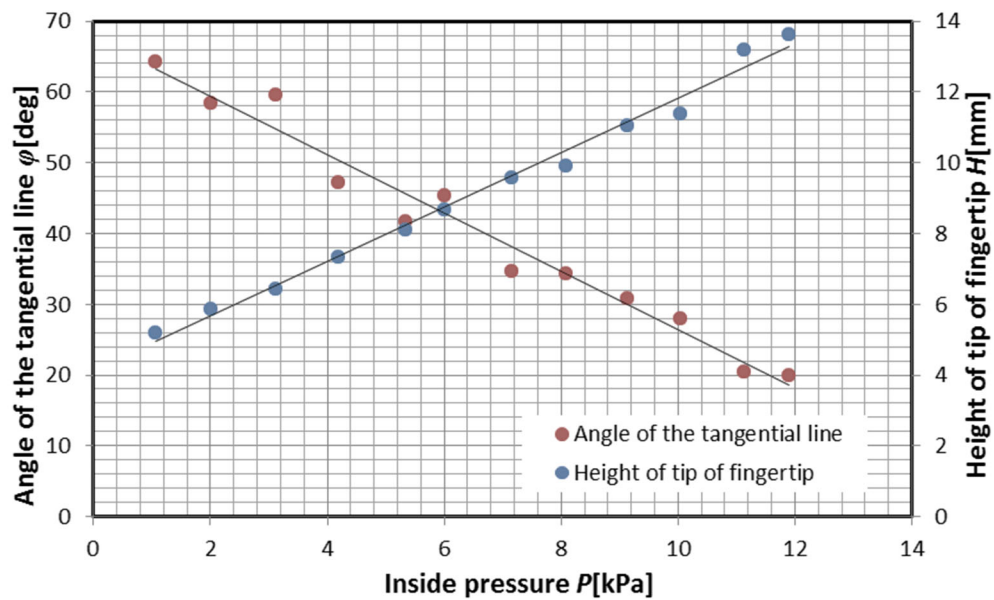


Figure 3-17. 流体圧 P に対する指部の高さ H と傾き角 φ の関係

図 3-エラー! 参照元が見つかりません。の座標系において近似楕円の方程式は

$$\frac{(x - \alpha)^2}{p^2} + \frac{y^2}{q^2} = 1 \quad (12)$$

で表すことができる。この楕円は $(0, a/2)$, $(x_{tip}, 0)$ を通り, $(0, a/2)$ での接線の傾きが $-\tan \varphi$ である。式(10), (11)を用いると α , p , q は圧力 P を用いて表されるため図 3-エラー! 参照元が見つかりません。に示すようにアームの位置($y=w/2$)での弾性膜の高さ x_{arm} の値

$$x_{arm} = \alpha + p \sqrt{1 - \frac{w^2}{4q^2}} \quad (13)$$

が圧力の関数として表される。したがって図 3-エラー! 参照元が見つかりません。に示すようにアーム先端が弾性膜に接触しないための条件は

$$l - d < x_{arm} \quad (14)$$

となる。3.3 節で求めた $l-d=7.81\text{mm}$ を用いると式(14)を満たす最小の x_{arm} が求まるため、式(13)よりそのときの圧力は 5.83kPa と求められる。

第3.6節 評価

第3.6.1項 仕様

2章で決定した各寸法で製作した流体指を図 3-エラー! 参照元が見つかりません。に示す。指外形にはABS樹脂, 弾性膜にはニトリルゴム, 内部流体はチェーンソーオイル(ISO VG 100), 柔軟帯はポリ塩化ビニルを使用しトーションバネはばね定数 $0.05\text{N} \cdot \text{mm}/\text{deg}$ のものを用いた。次節で本指を用いて重量物, 壊れやすい物体, 複雑形状物体の把持を試みる。

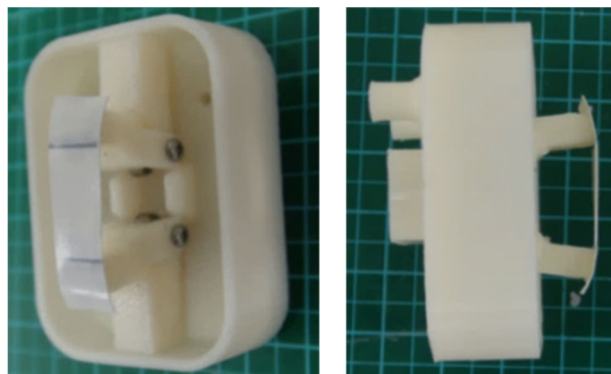


Figure 3-18. The optimized fluid fingertip

第3.6.2項 評価

把持耐力比較実験

マイクログリップ内蔵流体指の把持耐力を評価するために把持耐力の比較図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のような装置を用いて実験を行う。まず2つの指で物体(PETシート 100×70×0.41)を把持し、そのときの把持方向の力を把持力 f_{gra} とする。そして鉛直下向きにフォースゲージで荷重を加えていき、物体が落下したときの垂直荷重を把持耐力 f_{res} とする。指部を内部機構を持たない流体指、剛体指(ABS樹脂)、マイクログリップ内蔵流体指でそれぞれ把持力と把持耐力を計測した結果を図 3-エラー! 参照元が見つかりません。に示す。いずれの把持力においても流体指、剛体指よりも把持耐力が増加している。また流体指や剛体指は把持力と把持耐力はおよそ線形の関係になっているがマイクログリップ内蔵流体指は指を押し込むほど流体部が変形しマイクログリップの引っ掛かりが大きくなるため把持耐力の増加率が大きくなっているのがわかる。

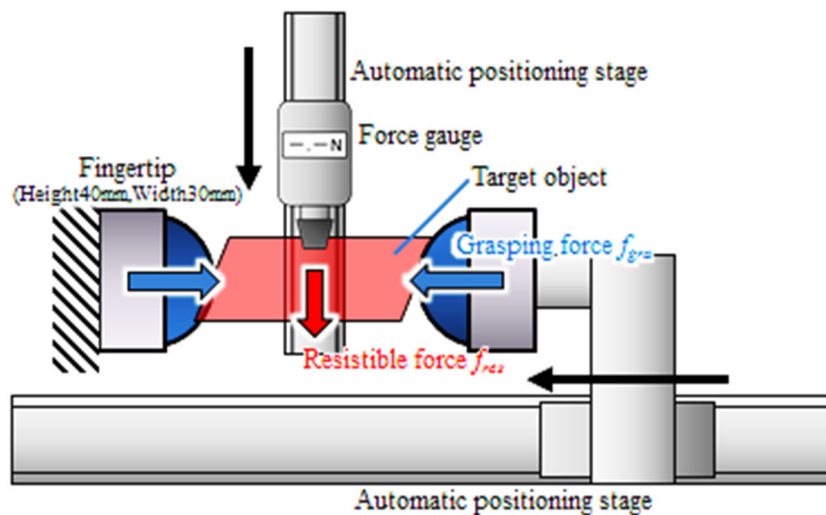


Figure 3-19. 実験装置

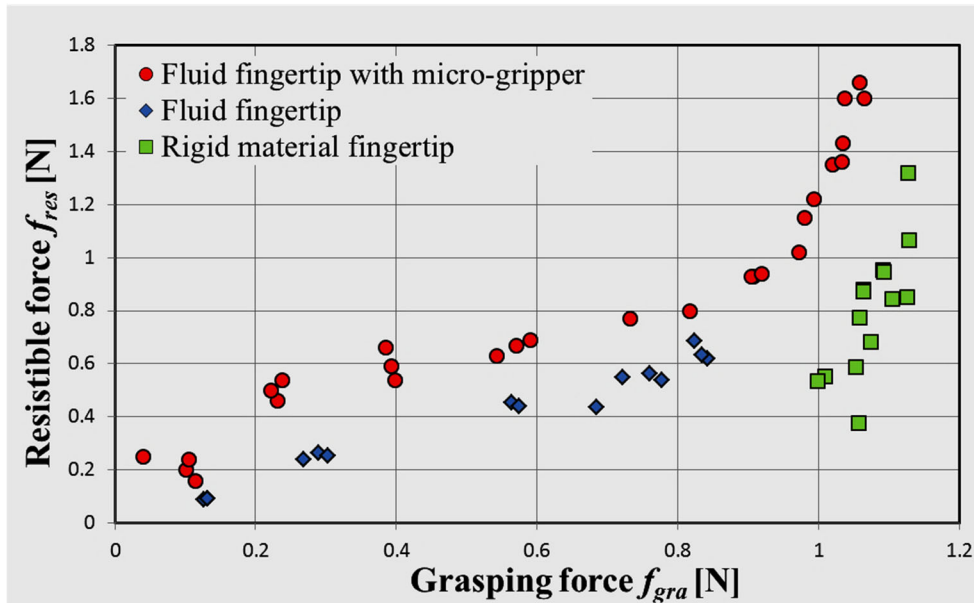


Figure 3-20. 把持力 f_{gra} と把持耐力 f_{res} の関係

上記の実験は荷重により把持物体(シート)が変形し幾何学的拘束から離脱し、落下したが図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のように把持物体を剛体(ABS 樹脂, 厚さ 6mm)に替え同様の実験を行ったところ物体は落下しなかった(装置の破損の可能性があったため $f_{res}=12N$ まで)。

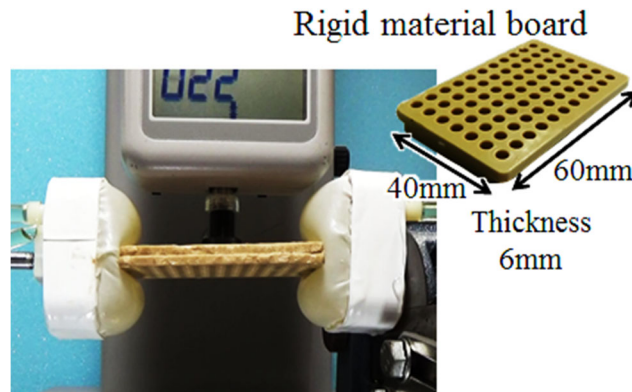


Figure 3-21. Evaluation of resistible force

把持実験

次に図 3-エラー! 参照元が見つかりません。に示すような鉛直方向に運動可能なグリップを用いて実際の重量物の把持を試みる。2.2 節で述べたマイクログリップ内蔵流体指の 3 種類の把持形態ごとに評価する。

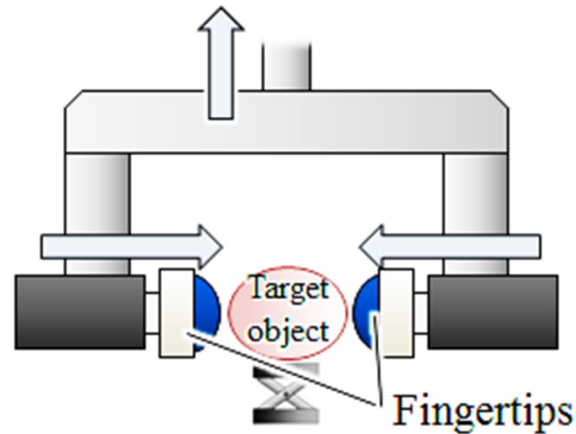


Figure 3-22. 実験装置

- 把持形態(1) – マイクログリップを用いず流体部のみで把持する形態

マイクログリップを用いず流体部のみで把持する把持形態について把持実験を行う。把持形態(1)となるのは柔らかい物体を把持するとき有効である。図 3-エラー! 参照元が見つかりません。の豆腐や、いちご(図 3-エラー! 参照元が見つかりません。), ポテトチップ(図 3-エラー! 参照元が見つかりません。), 卵(図 3-エラー! 参照元が見つかりません。)の把持に成功したことから壊れやすい物体の把持が可能であることがわかる。また軽量の物体ならば把持形態(1)での把持が可能であり、図 3-エラー! 参照元が見つかりません。の電子基板や図 3-エラー! 参照元が見つかりません。の toy model のような複雑形状物体の把持にも有効である。加えて上記の把持耐力比較実験において PET シートを把持したが、PET シートは把持の際、変形するため剛体指では把持が困難(11 回中 6 回成功)であるが、本指では容易に把持できたことから把持物体になじむという特徴も残っており、2.1 節の設計要件(3)を満たしていると考えられる。しかし図 3-エラー! 参照元が見つかりません。、エラー! 参照元が見つかりません。に示すようなプリン、卵黄の把持には失敗した。これは物体の質量に対して柔らかさが大きいため持ち上げる際に自重により大きく変形し十分な鉛直方向の摩擦力が得られなかったためである。摩擦力を得るために押込み量を増やすとどちらも破壊してしまう。

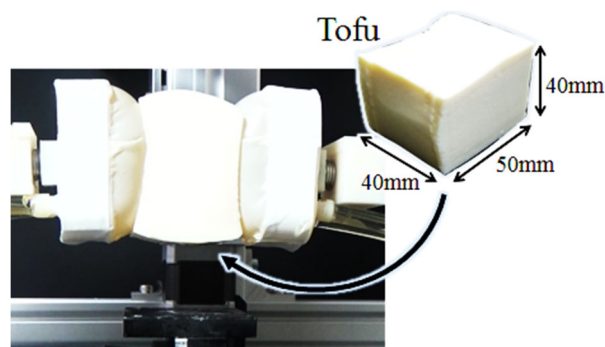


Figure 3-23. 壊れやすい物体の把持(絹ごし豆腐)

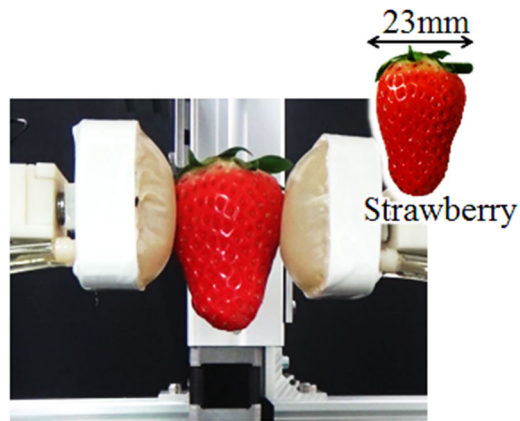


Figure 3-24. 壊れやすい物体の把持(いちご)

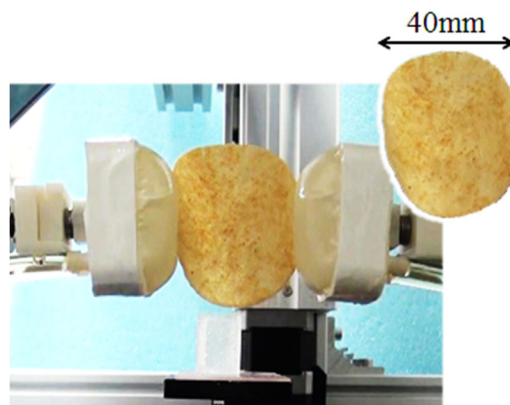


Figure 3-25. 壊れやすい物体の把持(ポテトチップス)

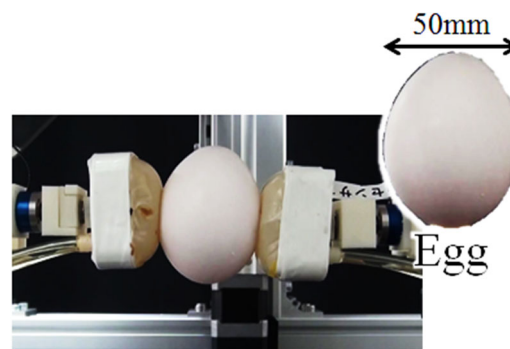


Figure 3-26. 壊れやすい物体の把持(卵)

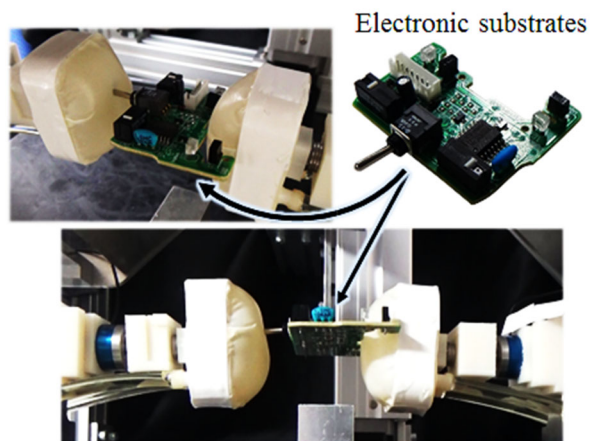


Figure 3-37. 複雑形状物体の把持(電子基板)

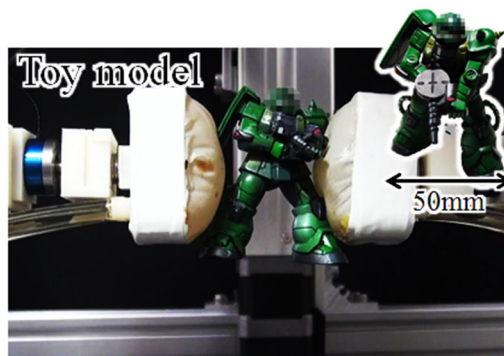


Figure 3-28. 複雑形状物体の把持(フィギュア)

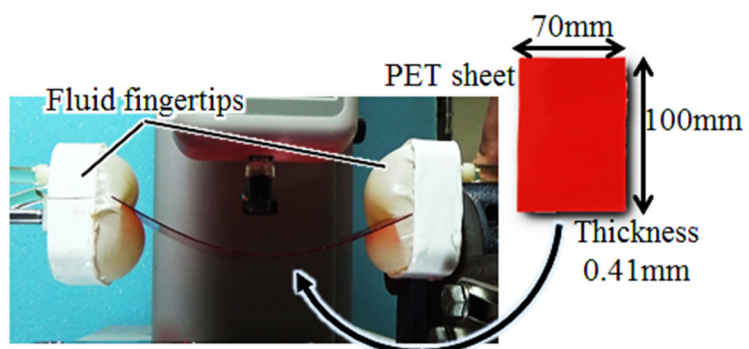


Figure 3-29. 変形しやすい物体の把持(PETシート)

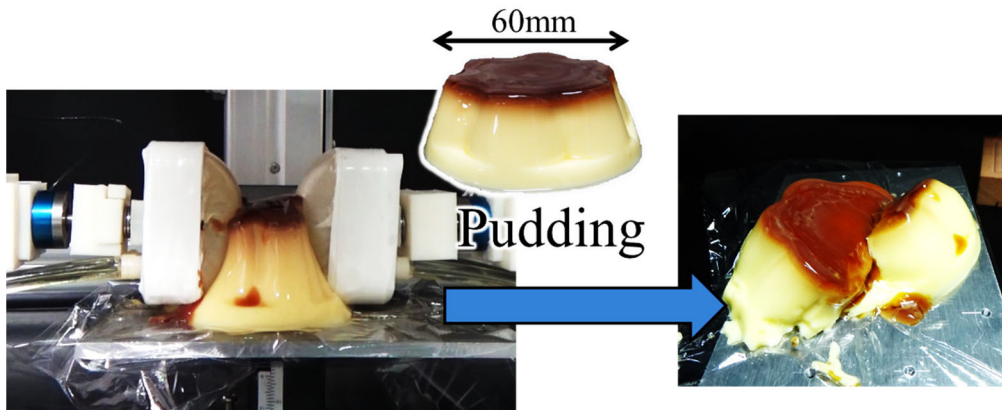


Figure 3-30. 壊れやすい物体の把持(プリン) — 失敗

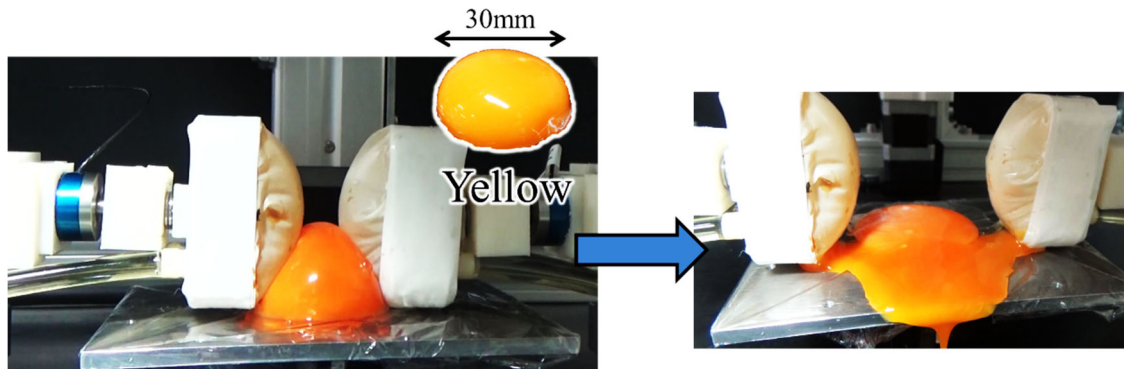


Figure 3-31. 壊れやすい物体の把持(卵黄) — 失敗

- 把持形態(2) – マイクログリップで挟み込む把持形態

続いてマイクログリップで物体を挟み込む形態による把持を評価する。この把持形態はアーム間距離よりも薄く硬い物体に対して有効である。図 3-エラー! 参照元が見つかりません。に示すバイスは質量 600g, 把持部の厚さ 8mm であり, 内部機構を持たない流体指では把持できなかったが本指ならば把持が可能であった。

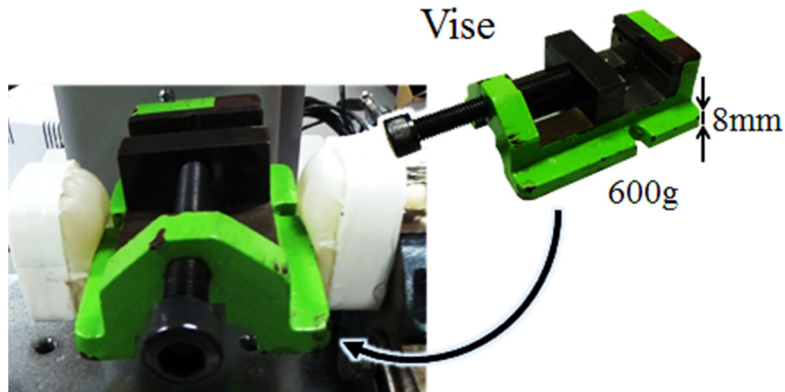


Figure 3-32. 重量物の把持(バイス)

また上記の図 3-エラー! 参照元が見つかりません。の剛体板は厚さ 6mm であり、実験結果からわかるように大きな把持耐力を得られている。

- 把持形態(3) – マイクログリップ(剛体部)を押し当てる形態

マイクログリップを押し当てることで把持する把持形態(3)はアーム間距離よりも厚く硬い物体を把持する際に有効である。図 3-エラー! 参照元が見つかりません。の箱(147g)のような軽量なものだけでなく、図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のような本(質量 2000g)や図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のようなペットボトル(中心部分を把持)の把持に成功したことからこの把持形態でも十分に把持耐力が向上していると考えられる。

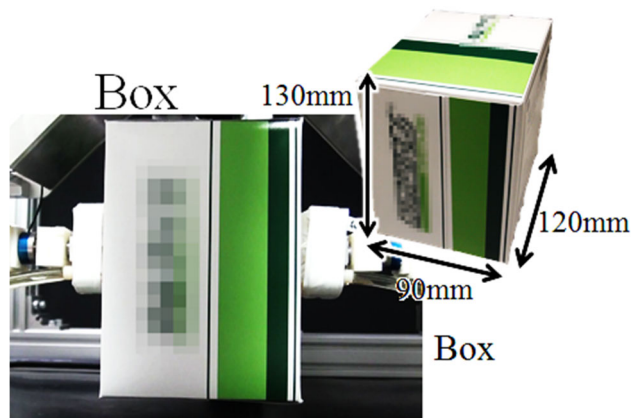


Figure 3-33. 平坦な面を持つ物体の把持(箱)

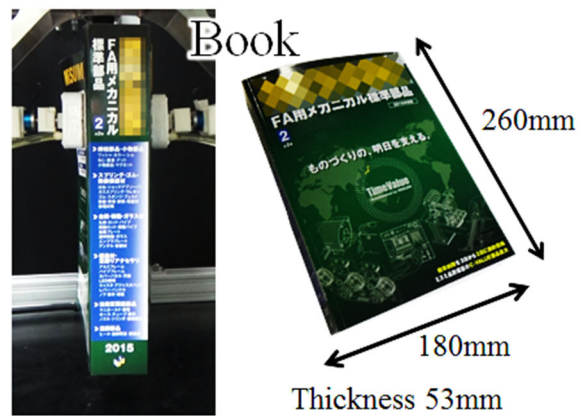


Figure 3-34. 大きな物体の把持 (本)



Figure 3-35. 重量物の把持 (ペットボトル)

他にも図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のペットボトルのキャップの部分を押し込んでの把持に成功した。これはマイクログリッパのアーム間距離よりも大きい物体であるがフタに引っ掛かりがあるためマイクログリッパが引っ掛かることで把持耐力が向上している。把持形態(2)と(3)の中間の把持形態である。



Figure 3-36. 重量物かつ複雑形状物体である物体の把持

把持形態(2)において把持可能な最大重量を示す. 2.2 節で述べたようにアームの外転を防ぐストッパーがあるため, マイクログリッパのアームを図 3-エラー! 参照元が見つかりません. のような一端固定の片持ち梁と考える. このとき物体の重量の半分 $P[N]$ がアーム先端にかかっているとすると最大モーメント M_{max} は固定端で発生するため

$$M_{max} = Pl \quad (15)$$

となる. ここで断面係数 Z は

$$Z = \frac{bh^2}{6} \quad (16)$$

で表される. ABS 樹脂の引張強度 σ は 23MPa から 55MPa 程度であり片持ち梁が破壊されるときは

$$M_{max} < \frac{\sigma}{Z} \quad (17)$$

となるため, $23\text{MPa} < \sigma < 55\text{MPa}$ を考慮すると式(15), (16), (17)より

$$31.3\text{N} < P < 74.7\text{N} \quad (18)$$

となり, この範囲の荷重でアームが破損すると考えられる.

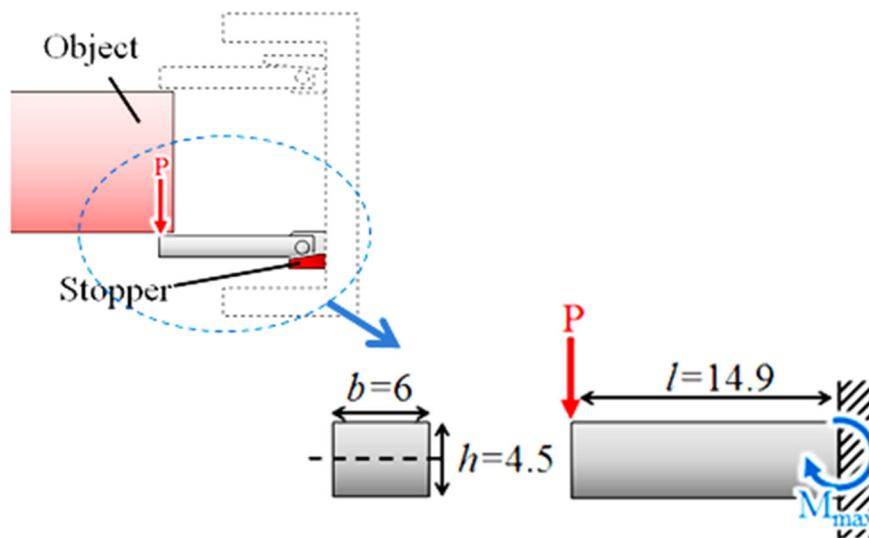


Figure 3-37. 片持ちはり

図 3-エラー! 参照元が見つかりません。のような装置を用いて、実際にアームの強度を測定する。設計した寸法のアームを固定し、上からフォースゲージで荷重を加えていきアームが破損する荷重を測定する。結果は 43.6N であった。これは式(18)の範囲内である。

よって把持形態(2)では $43.6 \times 2 = 87.2\text{N}$ (8.9kgf) までの荷重に耐えることができると考えられる。

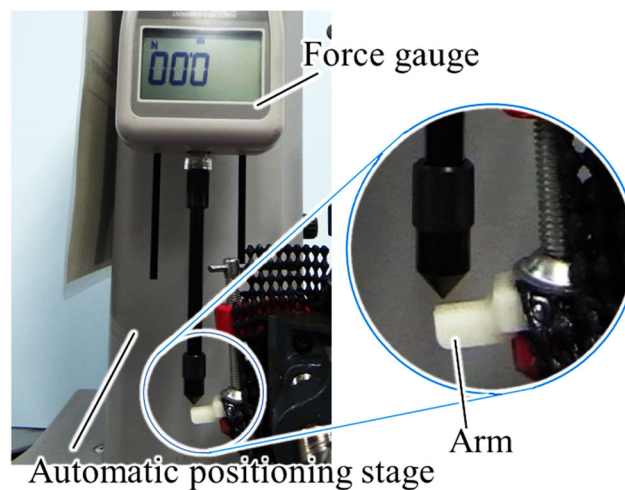
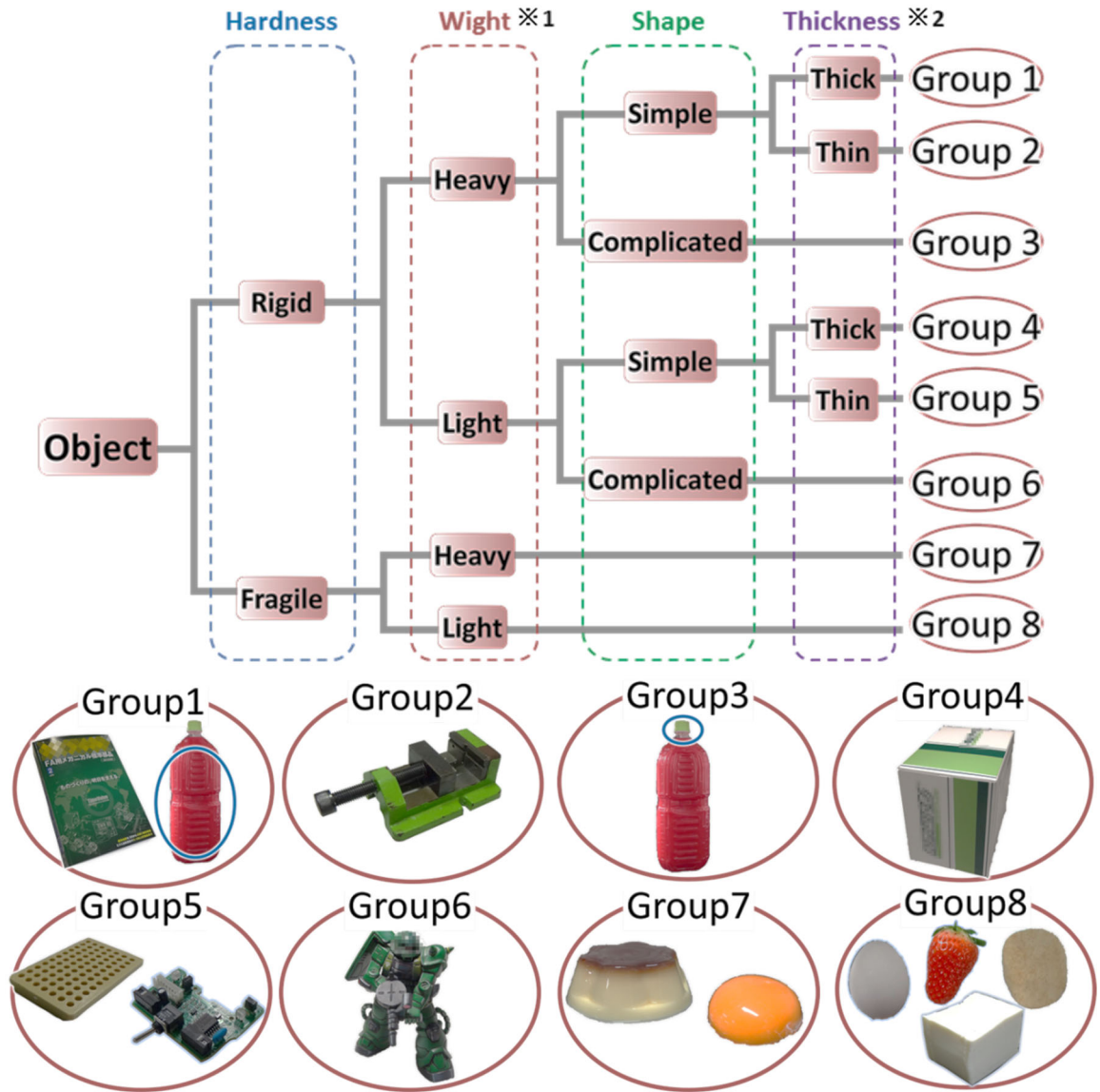


Figure 3-38. アームの強度評価実験

これらの結果を踏まえ、目標把持物体を特徴により分類し(図 3-エラー! 参照元が見つかりません。), マイクログリッパ内蔵流体指により把持できる物体およびその把持形態を表エラー! 参照元が見つかりません。に示す。



※1 The fluid fingertip without micro-gripper can't grasp it→heavy

※2 It is more thick than the distance between two arms of the micro-gripper→Thick

Figure 3-39. 対象物の分類

Table I. 物体把持の種類

Grasping						
		Wether to grasp or not	Grasping form	Restriction ※3	Resistible Force	Adjustment of grasping point
Grasp	1	○	3	M	equal to the rigid material fingertip	
	2	○	2	M+G	larger than the rigid material fingertip	○
	3	○	between 2 and 3	M(+G)	equal to or larger than the rigid material fingertip ※4	
	4	○	3	M	equal to the rigid material fingertip	
	5	○	2	M+G	larger than the rigid material fingertip	○
	6	○	1	G+M	equal to or larger than the rigid material fingertip ※4	○ ※depending on form
	7	not subject to grasp	-	-	-	-
	8	○	1	G(+M)	equal to or larger than the rigid material fingertip ※5	

- ※3 M→Mechanical restriction, G→Geometrical restriction
- ※4 The fingertip can grasp it according to the object's forms
- ※5 The fingertip can grasp it according to the object's hardness

第3.7節 おわりに

従来の流体指に長所を残しつつ，受動的機構，把持耐力の向上，物体の位置補正の特性を付け加えることに成功した．なお，本論文では一例として目標把持物体を 12mm の大きさのものとしたが上記の手順で設計すれば他の大きさの目標把持物体でも同様の流体指が作成可能であると考えられる．

第4章 幅広い物体把持が可能なソフトグリップの開発

第4.1節 はじめに

前章にて幅広い物体の把持が可能な指部の開発を行ったため本章ではハンド全体の構造について議論する。指部には前章にて開発したマイクログリップ内蔵流体指を搭載する。

汎用ハンドを開発するにあたり、物体の不確かさへの対処を検討する必要がある。マイクログリップ内蔵流体指により、指と物体の接触面での不確かさ（対象物の剛性、表面形状）は吸収することができる。そのため、ハンド全体では物体の全体的な不確かさ（サイズ、形状）を吸収する必要がある。そのためには、対象物に合わせた把持モードを実現できるのが適している。そのため、本章で開発するロボットハンドは複数の把持モードを有することで幅広い物体に対応できるように設計を行う。また前章では、台にセットされた物体の把持テストを行い、幅広い物体の把持が可能なことを確認したが、テーブル上の小さな物体を把持するようなシチュエーションは検討されていなかった。そこで、より実践的な状況として、テーブル上に置かれた物体を把持する状況を対象に開発を行う。複数の把持モードを実現するために、ハンドの関節部に柔らかさを導入する。ただし、単純にワイヤ駆動ハンドのような弾性要素を利用した関節にすると可搬重量を低下させてしまう。弾性要素が変形し、物体の重量を支えられないためである。そのため、関節部にラチェット構造を搭載した受動回転機構を設ける。指の屈曲については受動的に回転することができるが、伸展はラチェット構造により拘束されるためリジッドな特性となる。この受動関節を環境との接触を活用して屈曲させることで、複数の把持モードを選択できる機能を持ったハンドを開発する。指の屈曲は環境との接触を用いるため、ハンドの操作には指のスライド用のアクチュエータ1つで把持動作、把持モードの変更が可能となる。開発するハンドの特徴は以下の通りである。

- 指表面の柔らかさとしてマイクログリップ内蔵流体指を用いる。
- 把持対象物は重量物や小さな物体、柔らかい物体など幅広いものとする。
- 1つのアクチュエータで3種類(平行グリップ、ピンチング、包み込み把持)の把持モードを実現する。
- ラチェット構造を用いて、環境との接触後も、把持モード変更後の姿勢を維持する。

以下，本章では設計，各把持モードの特徴，制御則，評価実験を示す．

第4.2節 設計・開発

本グリップの設計要件を以下に示す。

1. 対象物は柔らかく壊れやすい物体，変形しやすい物体，薄い物体，幅が80mmまでの物体，質量3kgの物体，小さい物体。
2. 追加するアクチュエータは1つ（平行グリップ用）。
3. 把持モードは平行グリップ，ピンチング，包み込み把持の3種類。

これらの設計要件を満たすために，上述のようにマイクログリップ内蔵流体指を開発するハンドの指部に搭載する。

第4.2.1項 マイクログリップ内蔵流体指の構造と接触状態

今回は図4-1に示すように単純構造のマイクログリップ内蔵流体指とした。このマイクログリップ内蔵流体指では3種類の接触状態があり，図4-2に示す通りである。接触状態1ではマイクログリップで物体を挟んで保持することができる。接触状態2では大きな物体を剛体部で把持する。接触状態3では柔らかい物体や壊れやすい物体を流体指部で把持する。接触状態1や2では剛体部を用いて把持するため重量物の把持が可能である。これらの機能により重量物や柔らかい物体，壊れやすい物体，複雑形状物体の把持が可能である。ただし，このマイクログリップ内蔵流体指だけではテーブル上の小さな物体などが把持できない。そこで複数の把持モードを実現する受動関節を導入し，リアルシミュレーションでの物体把持の実現を目指す。

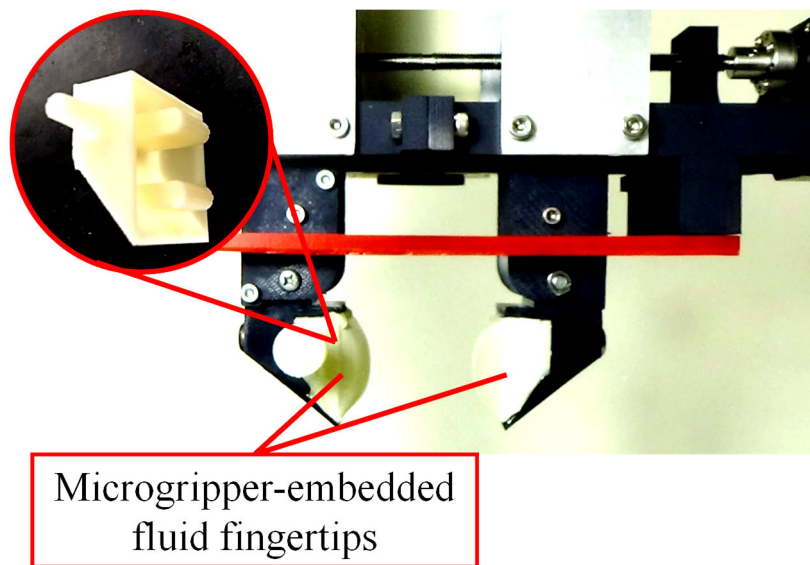


Figure 4-1. 本章で使用するマイクログリッパ内蔵流体指

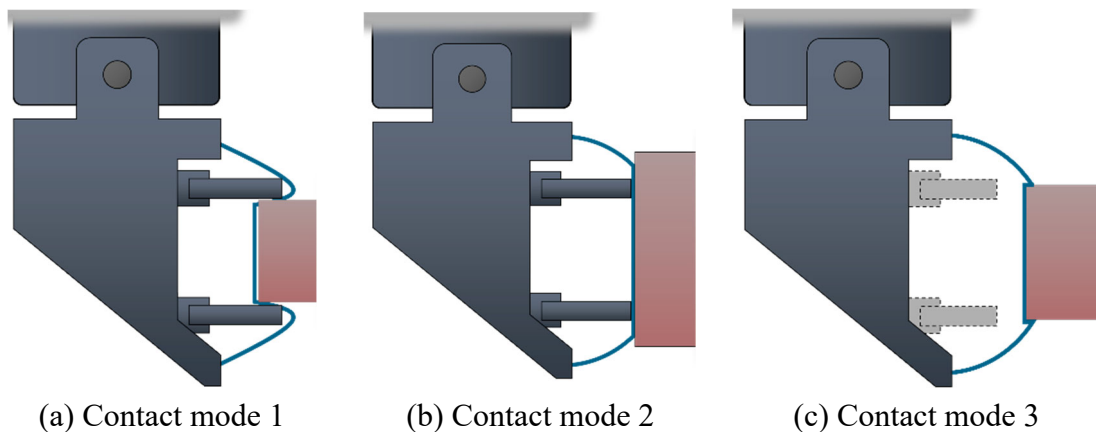


Figure 4-2. 接触モード

第4.2.2項 グリッパの構造

図 4-3, 4 に開発したグリッパ構造と動作を示す. 本グリッパは受動回転関節とマイクログリッパ内蔵流体指を搭載した指が 2 本と, その指を取り付ける直動レール, アクチュエータ(Dynamixel XM430-W210)1 つから構成される. アクチュエータの役割は直動レールに沿って 2 指を開閉させることである. 把持モードの変更は環境との接触により行う. 図 4-5 がそのラチェット構造を内蔵した受動回転関節の構造である. 指先側にラチェットギア, 指の根元側に歯止めが取り付けられており, テーブル等との環境との接触で指先の姿勢が変わると, それをラチェットで保持できる. この構造により, 初期状態では平行グリッパであるが, テーブルとの接触でピンチングや包み込み把持に変更でき, 物

体の特性に合わせた把持が可能となる。直動レールには拘束解放用ピンが取り付けられており、グリップを最大まで開くと、ピンが歯止めを押し、ラチェットの拘束が解放され、指の姿勢が初期状態(平行グリップ)に戻る構造となっている。また直動レールにはシリコンのベルトが取り付けられており、図 4-3 に示すように、スプレーのような長い物体を安定して把持することができる。

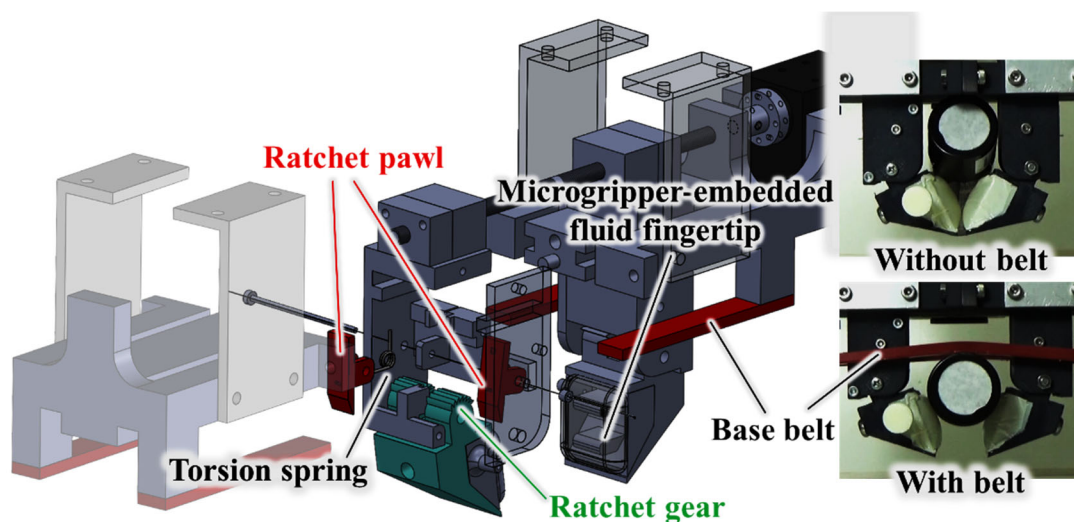


Figure 4-3. 開発したグリップの構造

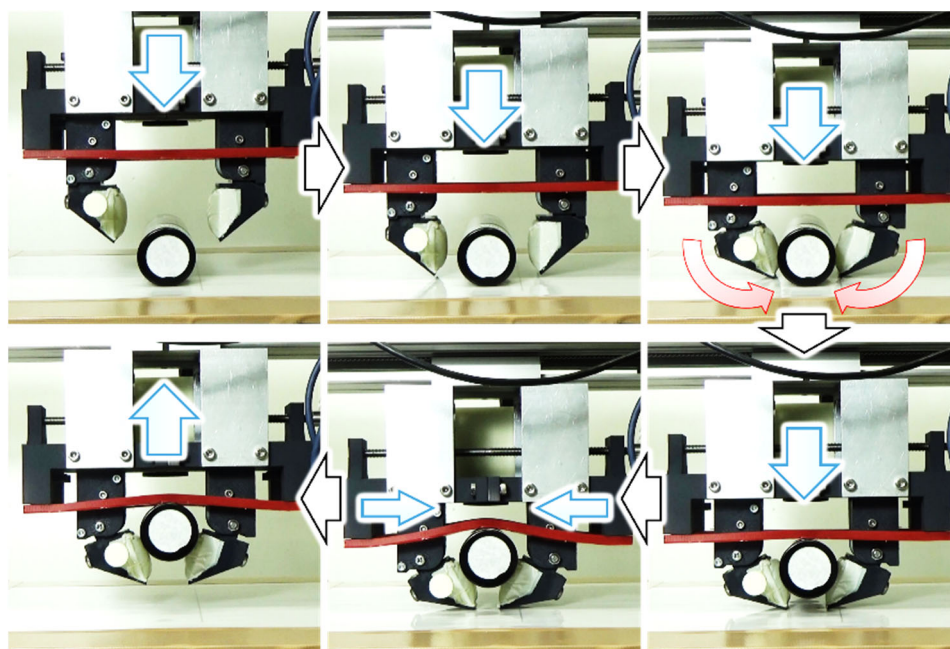


Figure 4-4. 開発したグリップの動作

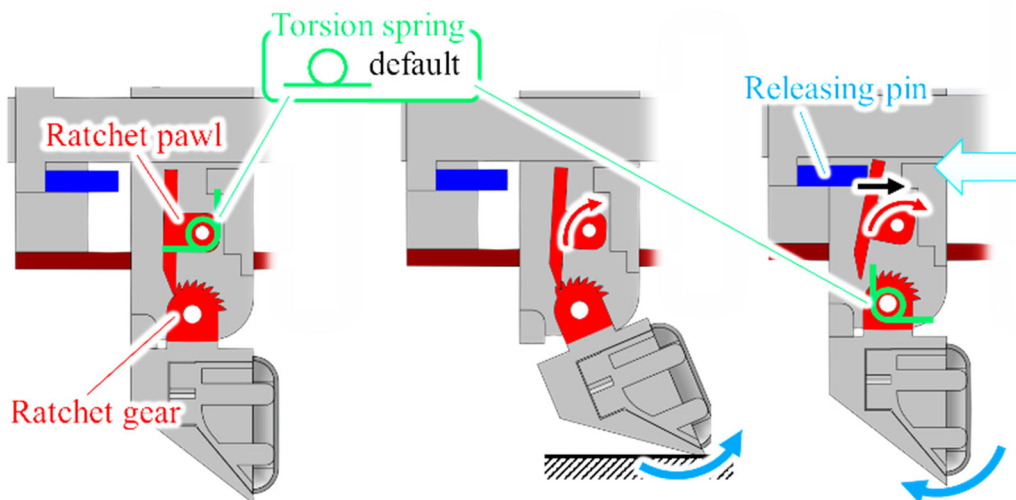
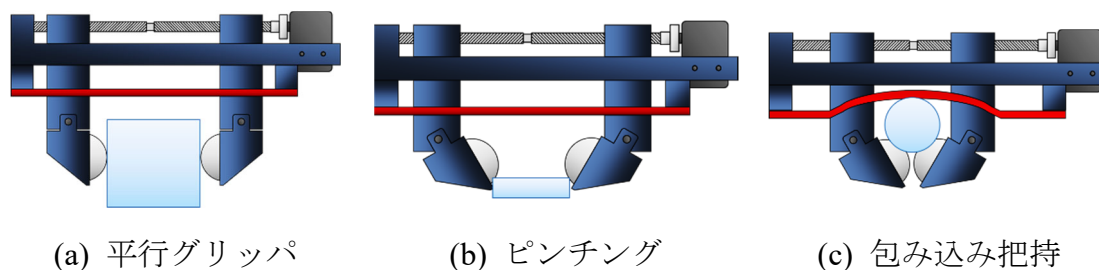


Figure 4-5. 受動回転関節の動作

本稿では、各把持モードの定義を以下の通りとする。

- 平行グリッパ：ラチェットの拘束を用いず、流体指部もしくは指先部で把持する(図 4-6a).
- ピンチング：ラチェットにより指の姿勢を曲げた状態で保持し、ベルトを用いずに把持する(図 4-6b).
- 包み込み把持：ラチェットにより指の姿勢を曲げた状態で保持し、ベルトを用いて把持する(図 4-6c).



(a) 平行グリッパ

(b) ピンチング

(c) 包み込み把持

Figure 4-6. 把持モード

第4.3節 把持モード

本節では各把持モードの詳細を述べる。

第4.3.1項 平行グリッパ

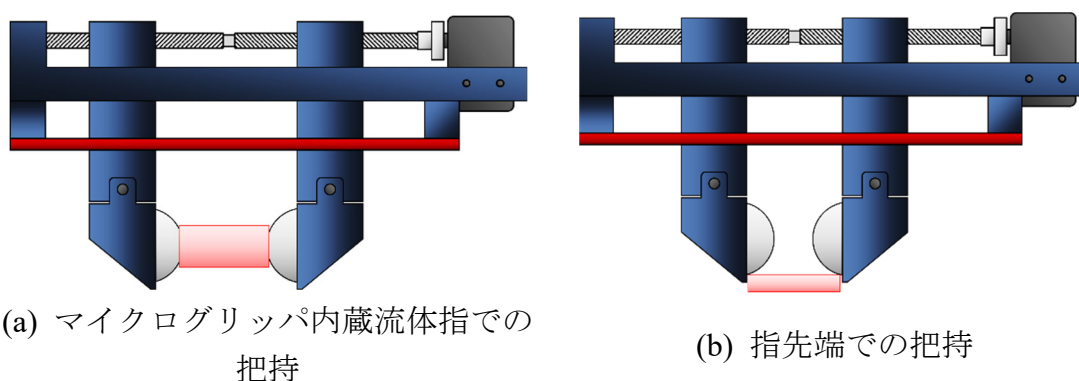
平行グリッパでは図 4-7 に示すように流体指部と指先で把持する 2 つ把持形

態がある。これは物体の大きさにより決定される。平行グリップでの特徴は以下の通りである。

- 2.1 節で述べたマイクログリップ内蔵流体指の特性を発揮できる。
- 最大把持可能幅は 80 mm である。(図 4-8a)

ただし、指先端部で把持する場合は、

- 小さな物体や薄い物体(ただし、流体内のマイクログリップが干渉するため図 4-8a-2 に示す範囲以上)の物体を把持できる。



(a) マイクログリップ内蔵流体指での把持

(b) 指先端部での把持

Figure 4-7. Two styles based on the contact area

第4.3.2項 ピンチング

ピンチングモードでの特徴は以下の通りである。

- テーブル上の小さい物体や薄い物体を把持することができる。
- 柔らかい物体や壊れやすい物体をすくい上げて把持できる。
- ラチェットギアにバックラッシュがあるため、制御側が必要である(後述)。
- 把持可能範囲は図 4-8b の通りである。

第4.3.3項 包み込み把持

包み込み把持の特徴は以下の通りである。

- 物体をすくい上げて把持できる。
- 複数の接触点で把持し幾何学的に拘束するため、接触力を小さくでき、柔らかい物体や壊れやすい物体の把持に適している。

- 把持可能範囲は図 4-8c の通りである。

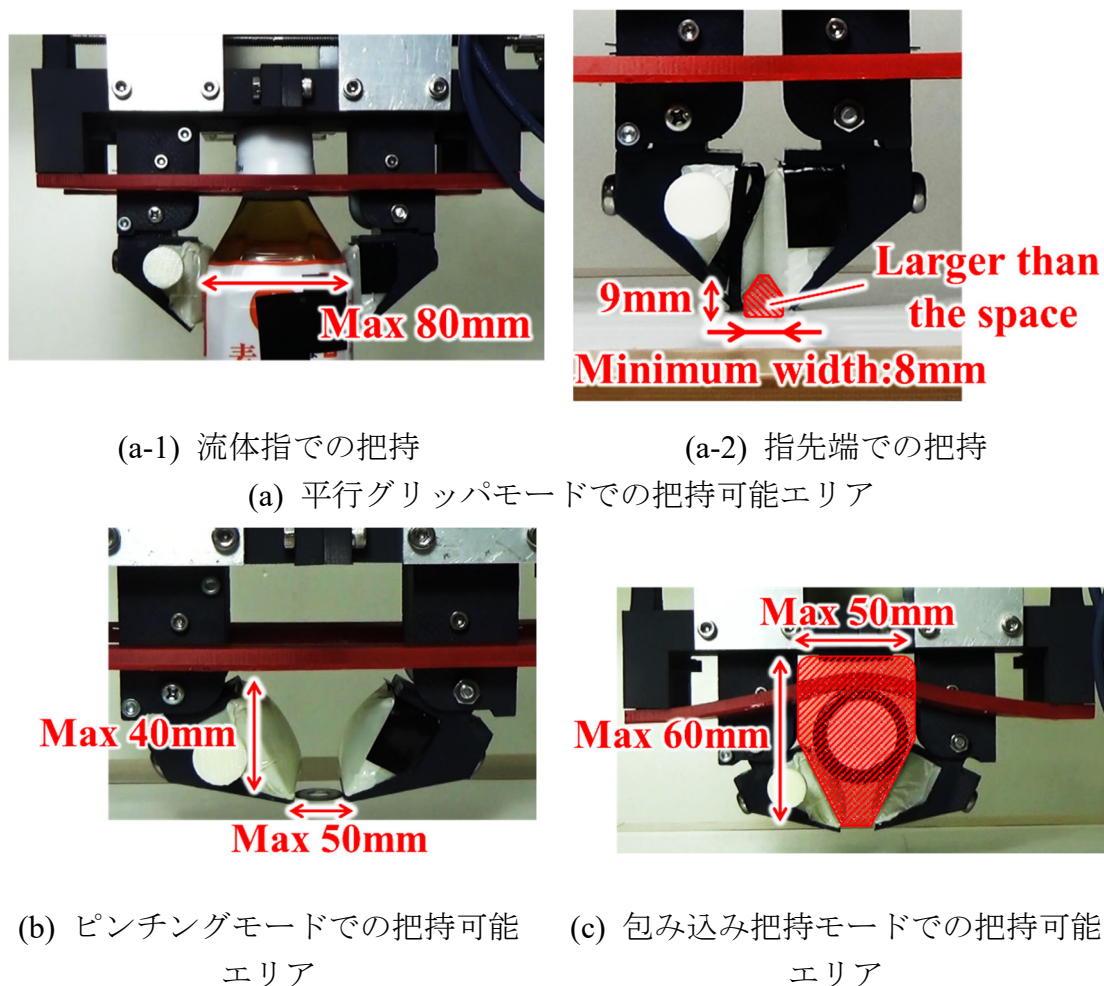


Figure 4-8. 各把持モードでの把持可能エリア

第4.4節 制御則

ピンチング(場合によっては包み込み把持でも)では、物体をピックする際にラチェットのバックラッシュを考慮する必要がある。そこでまず、ラチェットのギアが切り替わる位置を調べる。付録に示すような3軸の自動ステージに開発したグリップを取り付け、グリップの指先がテーブルに接触した位置をz座標の原点とする。そこからz軸方向に降下させ、ラチェットのギアが切り替わる位置を調べた。実験は3回行った。 n ($n = \{1,2,3\}$)番目のギアのロックの位置の平均をまとめたのが表2である。作成誤差により左右の指でも違いがあるのがわかる。また実験誤差(ゼロ点の誤差)もあるため、このときの標準偏差をもとに表3を作成した。これは確実にギアのロックの位置がわかる範囲であ

り，各段階の上限値 z_{u_n} と下限値 z_{l_n} は以下の式で求めた．

$$z_{u_n} = \max_{\text{Right or Left}} (\bar{z}_n + \sigma_n)$$

$$z_{l_n} = \min_{\text{Right or Left}} (\bar{z}_n - \sigma_n)$$
(1)

また，バックラッシュがなくなるまで上げたときのグリッパの z 座標は表4のようになる．これらの数値を考慮し，ピック時に指先の位置を変えずに持ち上げる制御則を示す．

まず， z 座標が表3を満たす範囲にない場合，グリッパを降下させ，ギアの噛み合いの状態がわかる状態にする．そこからバックラッシュを考慮し，指先の位置を変えないためには，グリッパを閉じながら， z 方向に上昇させる必要があるが，このときのグリッパの開く速度 v_g と上昇速度 \dot{z} の関係は指先の幾何学的状態より求められる．図4-9aのような初期状態のグリッパが，図4-9bのように変更したとき幾何学的関係より

$$l_1^2 + l_3^2 = (l_1 - z)^2 + (x_g + l_3)^2$$
(2)

が成り立つ．このとき x_g は指先の変位である．(2)式を時間微分すると

$$(l_1 - z)\dot{z} = (x_g + l_3)\dot{x}_g$$

$$\rightarrow \dot{x}_g = \dot{z} \frac{l_1 - z}{\sqrt{l_3^2 - (l_1 - z)^2}}$$
(3)

これより， \dot{z} を一定にし，現在地 z の値から指先の移動速度 \dot{x}_g がわかるため，それと同じ大きさで反対方向にグリッパを閉じれば指先の位置を変えずにグリッパを移動させることができる．この操作を表4のバックラッシュがなくなる位置まで続ける．実際にこの操作を行ったのが図4-10である．指先の位置を変えずにバックラッシュがない姿勢まで移動できているのがわかる．これらの操作をまとめたのが図4-11である．

Table II ラチェットギアの切り替わり位置 z [mm]

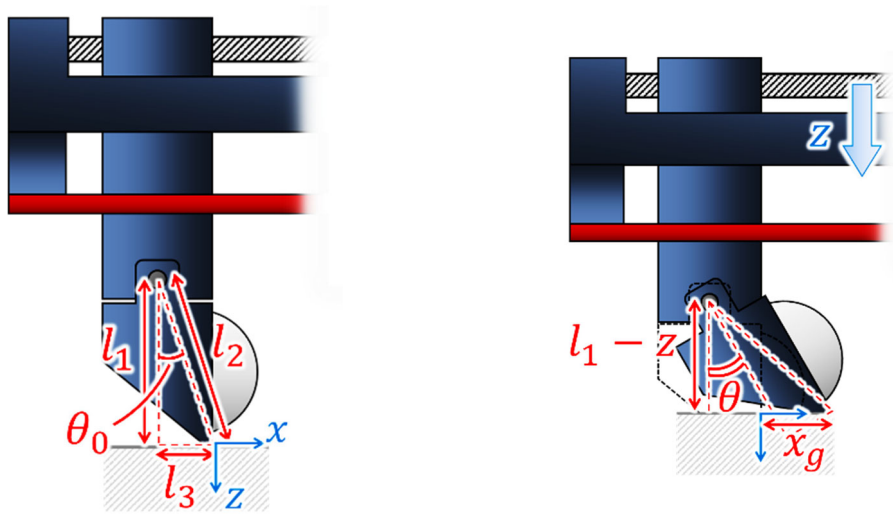
Gear lock	Right fingertip			Left fingertip		
	1nd	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Mean (\bar{z} [mm])	6.43	10.3	15.2	5.93	10.9	14.9
Standard deviation (σ_n [mm])	0.18	0.32	0.05	0.21	0.21	0.33

Table III ラチェットギアの切り替わり位置 z [mm] での状態

Gear-lock state	Range of z [mm] where the gear-lock states of both fingertips are identical
1st gear lock	6.61–9.98
2nd gear lock	11.1–14.6
3rd gear lock	15.3 –

Table IV バックラッシュを解放したときの位置 z [mm]

Initial state of the ratchet before the gripper moves upward	Mean z [mm]	Standard deviation [mm]
1st gear lock	4.46	0.12
2nd gear lock	7.87	0.16
3rd gear lock	11.9	0.32



(a) 指先が床面に接触したときの状態 (b) z だけ降下したときの状態

Figure 4-9. バックラッシュを考慮した制御

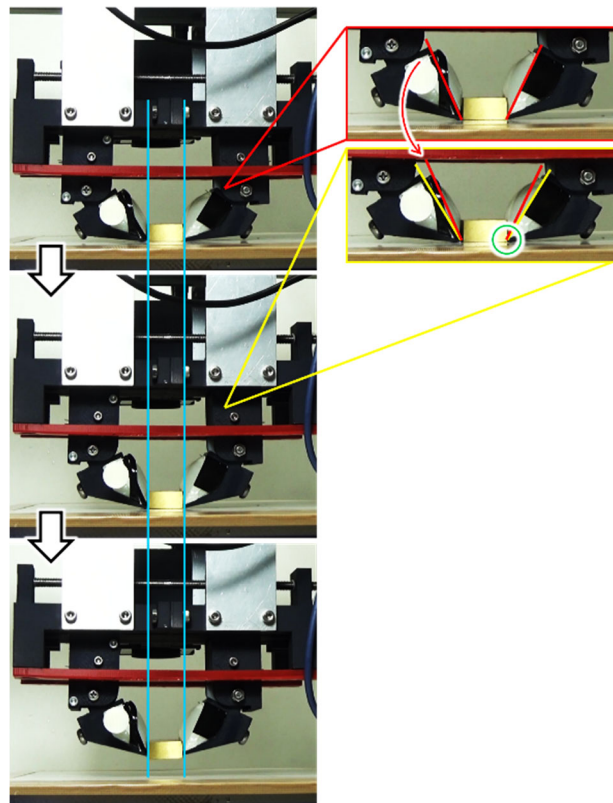


Figure 4-10. 制御を適用した際の様子

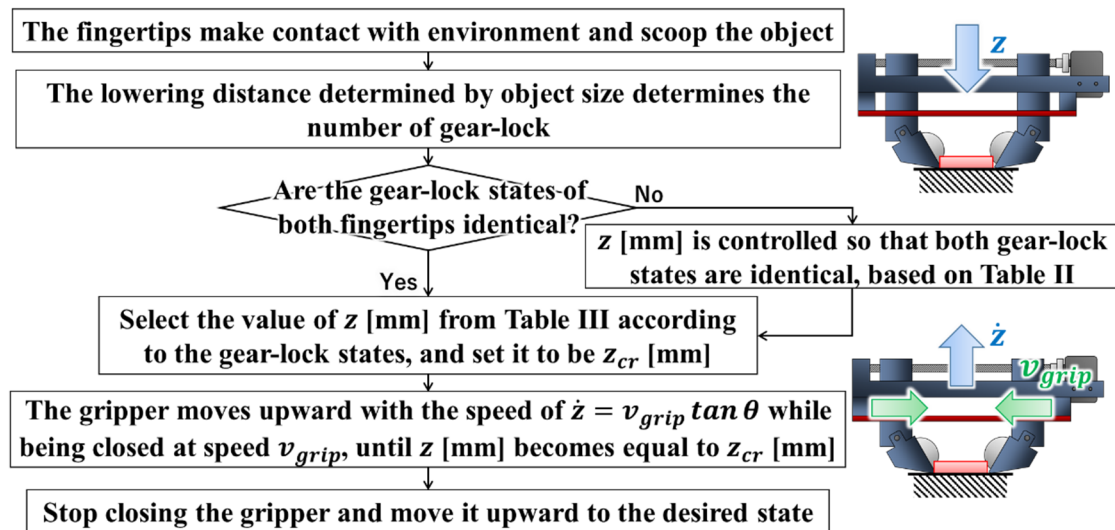


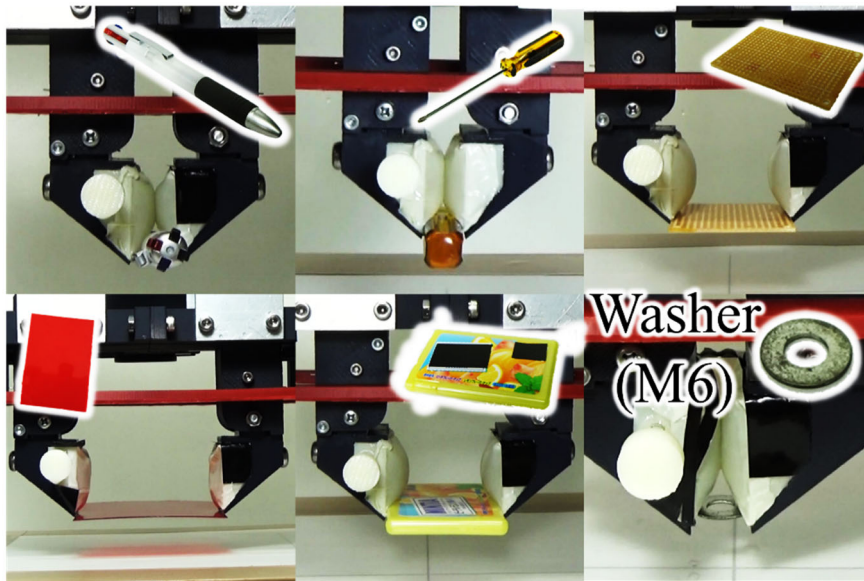
Figure 4-11. ピンチングと包み込み把持での制御測

第4.5節 評価実験

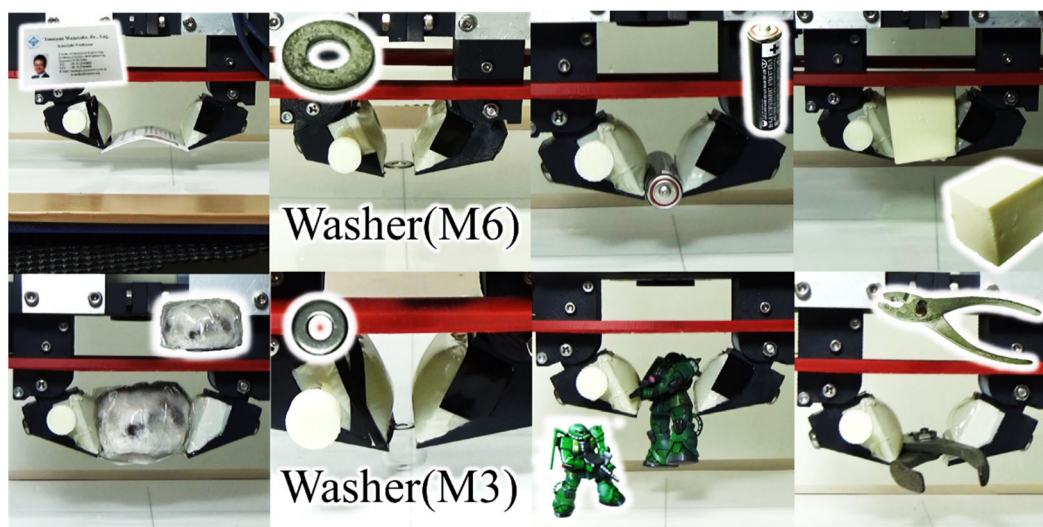
本節ではテーブル上の様々な物体の把持実験を行い、各把持モードの性能評価を行う。本稿では、重量物、柔軟物体等の70種類の物体に対して各把持モードでの把持実験を3回ずつ試みた。対象物の選定は主に Amazon Robotics Challenge[49][50]で使用される物体と YCB objects[51]の中からの行った。グリッパの x 座標、 y 座標は固定とする。物体を10mmの誤差範囲の中でランダムにセットし把持を行った。図4-12は実際の把持実験の様子である。結果を表5に示す。表5での赤字が把持した幅である。様々な種類の幅広い物体に対して把持が成功しているのがわかる。ただし、大きさが把持可能幅に近い物体の場合、物体の位置誤差により把持が失敗するときもあった。また把持可能幅より大きい物体の把持は当然、把持できなかった。



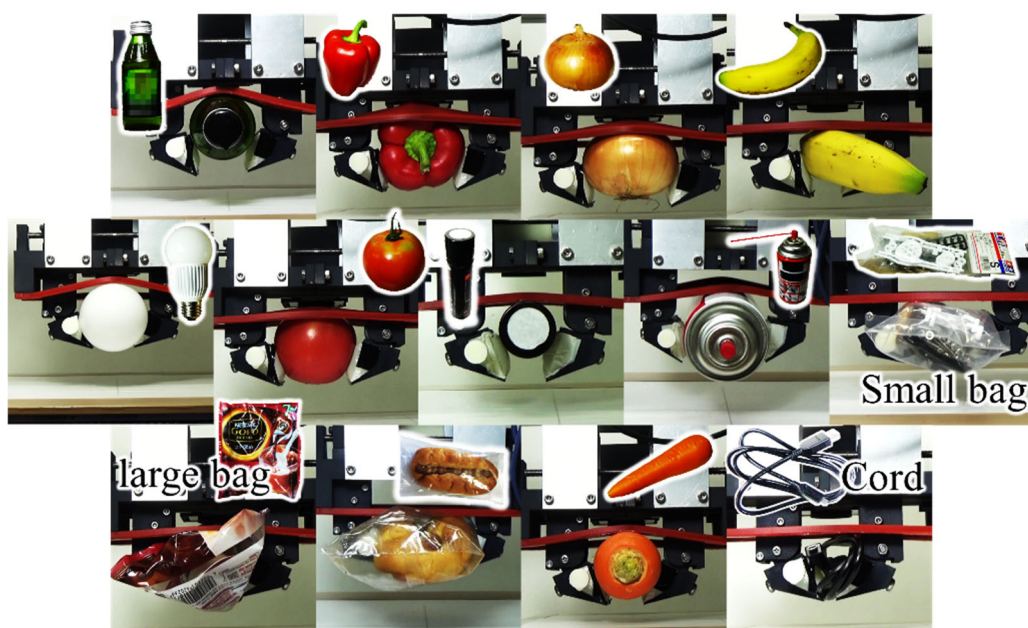
(a-1) 平行グリップモード; 流体指での把持



(a-2) 平行グリップモード; 指先端での把持



(b) ピンチングモード



(c) 包み込み把持モード

Figure 4-12. 把持実験

Table V 把持実験の結果：把持成功率 (赤字部は把持を行った方向の寸法)

Success rate	平行グリップモード		ピンチングモード	包み込み把持モード
	3/3	Pencil cup (Thickness:4)	Dove bar ¹ (94 × 65 × 35)	Dice ² (16 × 16 ×

Outlet plug covers ¹ (68 × 187 × 30)	Board eraser (55 × 132 × 35)	16)	Glass bottle (Ø51 × 135)
Thin plate (72 × 47 × 1.6)	Cups ¹ (Ø67 × 158)	Soft tofu (26 × 26 × 30)	Bath toy ¹ (90 × 133 × 71)
Golf ball ² (Ø42.7)	Soft tofu (26 × 26 × 30)	Washer (M3) (Ø6 × 0.5)	Tennis ball ² (Ø64.7)
Baseball ² (Ø80)	Tennis ball ¹ (Ø63 × 108 × 190)	Battery (Ø14.5 × 50.5)	Dog squeaky toy (Duck) ¹ (50 × 97)
Spark plug ¹ (96 × 25 × 22)	Spam can ² (50 × 97 × 82)	PET sheet (100 × 70 × 1)	Dog squeaky toy (Frog) ¹ (30 × 116)
Tomato can ² (Ø66 × 101)	Screwdriver (13 × 13 × 130)	Daifuku (Ø50)	Banana (Ø35 × 150)
PET bottle (2L) (cap:Ø35)	Washer(M6) (Ø11.5 × 1.6)	Toy model (60 × 40 × 30)	Ball dog toys ¹ (67 × 123)
Battery (Ø14.5 × 50.5)	Balloon (250 × 60 × 150)	Business card (91 × 55 × 0.2)	Onion (70 × Ø55)
Screwdriver set ¹ (77 × 137)	Racquetball ² (Ø55.3)	Washer (M6) (Ø11.5 × 1.6)	Plastic strawberry ² (43.8 × 55)
Tablet pill box (47 × 78 × 7)	Pen (Ø12 × 139)	Plier (29 × 135 × 15)	Rope ² (8 × 2000)
Paper cup with liquid (68 × 187 × 30)	Plastic strawberry ² (43.8 × 55)	Hummer (Ø14 × 250)	Packaging bag (large) (70 × 200 × 40)
Small spray (Ø40 × 150)	Toy model (60 × 40 × 30)	Hummer (Ø13 × 250)	Cord (8 × 1000)
Dental treats ¹	Bottle brush ¹	Glue ¹	Packaging bag

	(210 × 54 × 160) Large book ¹ (125 × 198 × 12) Color pen set ¹ (118 × 120 × 20) PET bottle (500mL) (70 × 70 × 190) Can of juice (Ø66 × 122) Crayon ¹ (145 × 35 × 126) Tomato (Ø70)	(115 × 55 × 290) Small book ¹ (113 × 170 × 8) Juice box (70 × 140) PET sheet (100 × 70 × 0.45) Self-stick notes ¹ (51 × 116 × 39) Large Spray (Ø66 × 150)	(29 × 63 × 146) Binder clip (20 × 37 × 9) Ball point pen refill (25 × 134) Japanese coin (Ø22 × 1) Chocolate (Ø27)	(small) (50 × 150 × 30) Carrot (Ø45 × 180) Packaged bread (65 × 180 × 30) Small spray (Ø40 × 150) Electric bulb (base: Ø35 × 40) Large Spray (Ø66 × 150) Safety glasses ¹ (65 × 50 × 190) Paprika (Ø55 × 85)
1/3	Index cards ¹ (76 × 128 × 20)	Pringles can ² (Ø75 × 250)	-	-
0/3	Bottle brush ¹ (115 × 55 × 290)	Large book ¹ (125 × 198 × 12)	Small book ¹ (113 × 170 × 8)	Color pens ¹ (118 × 120 × 20)

1: Amazon picking challenge objects, 2: YCB objects, 3: By changing the pose, these objects were grasped with a success rate of 3/3

第4.6節 性能評価

本節では、力学的解析により把持可能な重量を求める。まず、平行グリッパモードの場合、マイクログリッパを用いて把持した場合を考える。図 4-13a のようにマイクログリッパの下側のアームを片持ち梁として考える。このとき、

最大応力 σ_{ABS} [Pa]は根元で発生することを考慮するとアーム先端に加わる最大負荷 f_a [N]は以下の式で表される。

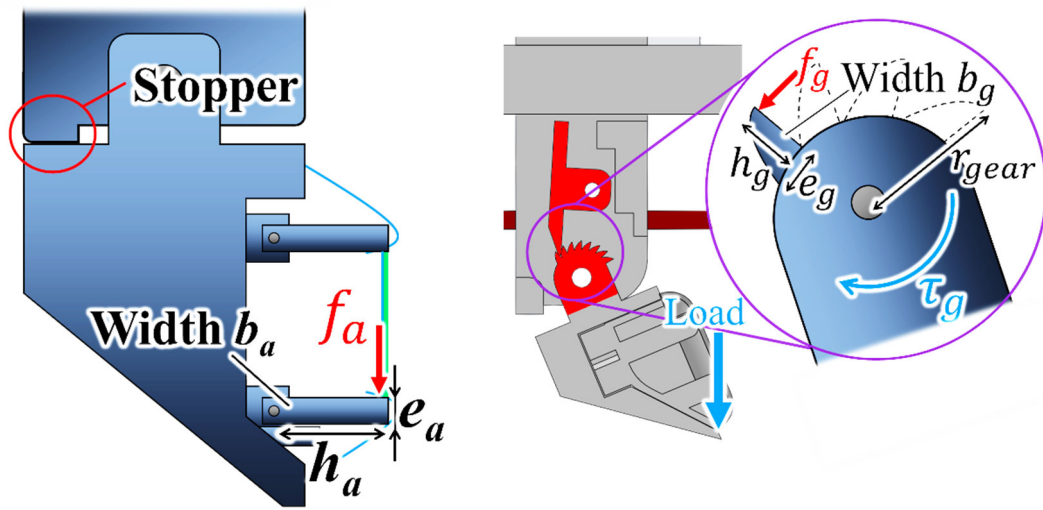
$$f_a = \frac{\sigma_{ABS}}{h_a} Z_a = \frac{\sigma_{ABS}}{h_a} \frac{b_a e_a^2}{6} \quad (4)$$

このとき、 Z_a は断面係数、 σ_{ABS} は使用材料であるABS樹脂の許容応力である。 $b_a = 13$ mm, $e_a = 5$ mm, $h_a = 13$ mm, $\sigma_{ABS} = 35$ MPa とすると $f_a = 150$ N (15 kgf)となる。よって設計要件は満たすことがわかる。ピンチングと包み込み把持の場合ではラチェットギアに最大応力が加わると仮定する。このとき図4-13bのようにラチェットギアを片持ち梁と考えると、関節部に加えられる最大トルク τ_g は

$$\tau_g = r_{\text{gear}} \frac{\sigma_{ABS}}{h_g} Z_g = r_{\text{gear}} \frac{\sigma_{ABS}}{h_g} \frac{b_g e_g^2}{6} \quad (5)$$

で得られる。 $r_{\text{gear}} = 8$ mm, $b_g = 12$ mm, $e_g = 1.57$ mm, $h_g = 2$ mmとすると $\tau_g = 0.69$ Nmとなる。指先先端(モーメントアーム=32 mm)に力が加わった場合、耐えられる力は22 N(2.2 kgf)となる。よって2指で44 N(4.4 kgf)に耐えられることがわかる。ここでラチェットギアに最大荷重が加わることを確認するためにFEM解析を用いて検証する。図4-14に示すように関節部に $\tau_g = 0.69$ Nmのトルクを加えたとき、ラチェットギアの根元で最大応力が発生しているのが確認できた。最大応力も34 MPaと仮定時の35 MPaに近い値が出ているため、理論通りであると考えられる。よってピンチングや包み込み把持でも設計要件を満たす。

実際に、設計要件を満たすかを実機実験により確認する。図4-15に示すようにそれぞれの把持モードで物体(剛体薄板)を把持し、それに鉛直下向きに荷重を加えた。結果は図4-15に示す通り、30 N(3 kgf)に耐えられることを確認できた。



(a) 平行グリップモード (b) ピンチングまたは包み込み把持モード

Figure 4-13. Models for feasibility analysis

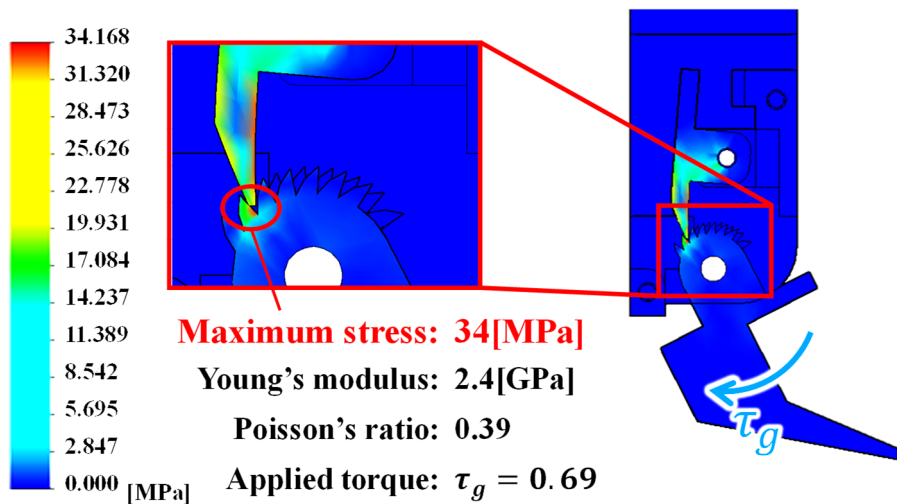


Figure 4-14. FEM 解析の結果

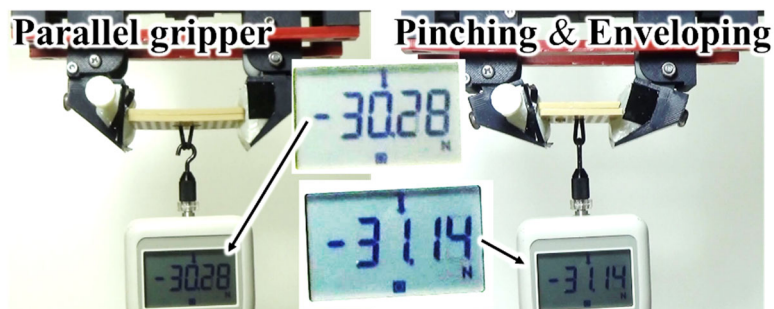


Figure 4-15. 実機試験による可搬重量の検証

第4.7節 考察

これらの各把持モードの特徴を踏まえ、把持モードの選択方法を考える。対象物がテーブル上に置かれている場合、把持モードは対象物の特徴によって選択される。その選択手順は図 4-16 の通りである。

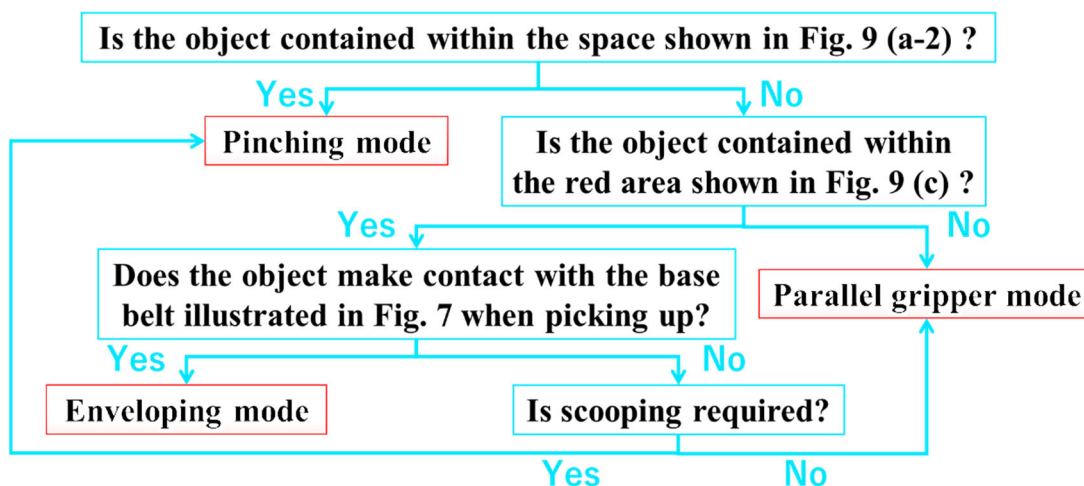


Figure 4-16. 把持モードの選択方法

第4.8節 自由度の拡張

ここまでに提案した構造は環境との接触により自由度の少なさを補っている。ラチェット構造により把持モード変更後はあたかもアクチュエータ指を曲げたかのような状態を創り出せている。そこで、この受動回転関節を増やすことで、より複雑な姿勢を得られると考えられる。本節では、受動回転関節を増やした場合の有用性についての検討を行う。

受動回転関節を増やしたバージョンのハンドの設計要件として、前節の実験では把持できなかった大きな物体の把持が可能なハンドを開発する。図 4-17 に受動回転関節を指の根元に追加したバージョンの劣駆動グリップの構造を示す。上述のグリップの回転関節を根元にも配置し、指が外転する構造となっている。根元側の関節のラチェットを開放するには指を一度閉じ切る操作を行う。互いの指のピンがもう一方のラチェットを押し、拘束が外れる構造となっている(図 4-18)。あとは指先を環境との接触で姿勢を変えることで把持姿勢を確保できる、実際に幅が 140mm の物体を把持した様子が図 4-19 である。指の姿勢を変える操作が必要になる分、操作時間が増えるが、前節までのグリップでは把持できなかった大きさの物体の把持に成功した。このように受動関節を

増やすことでより器用な操作が可能となることを示した。

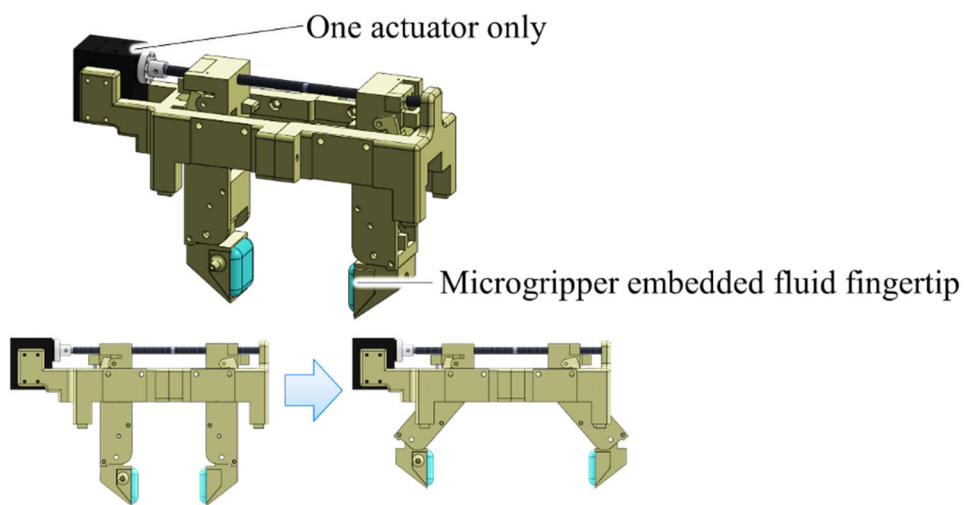


Figure 4-17. 外転動作

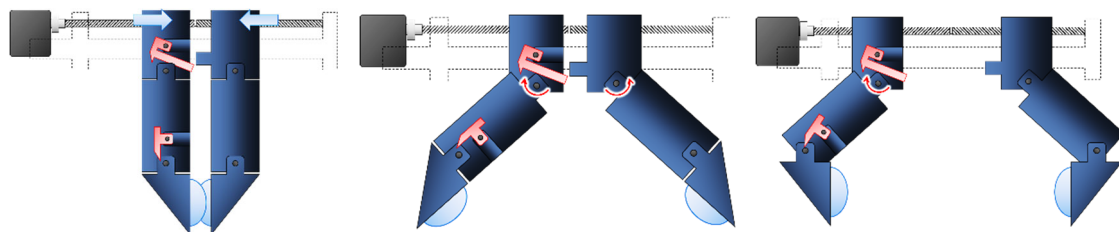


Figure 4-18. 外転動作の仕組み

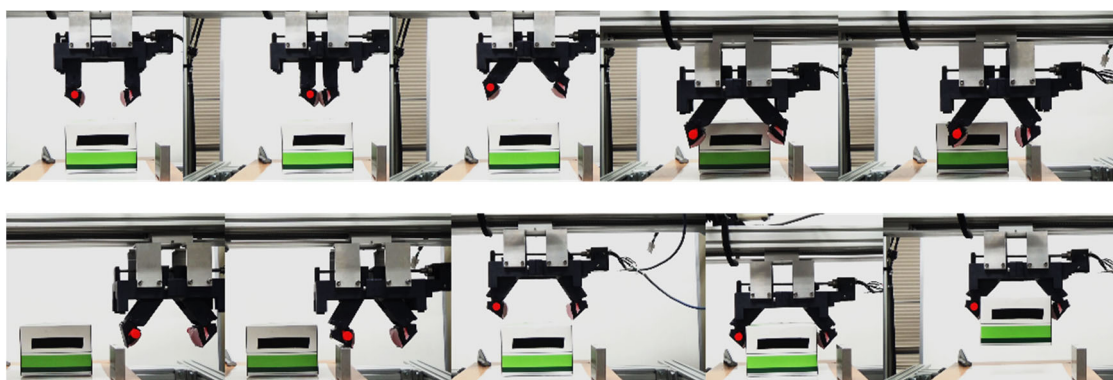


Figure 4-19. 外転動作を用いた把持実験

第4.9節 おわりに

皮膚と関節の2か所に柔らかさを導入した劣駆動ソフトグリップを開発した。皮膚の柔らかさにより、物体の状態を吸収することができる。また環境を利用した制御がソフトグリップに適用可能なことを示した。この環境を利用した操作は物体把持だけでなくより複雑なマニピュレーションでも活用できると考えられる。

第5章 結言

本研究では幅広い物体の把持が可能なロボットハンドを開発するために、流体指の有用性の確認、マイクログリップ内蔵流体指の開発、受動関節を有するハンド部の開発を行った。

流体指は先行研究において、様々な視点から研究されてきたが、本研究では柔らかい物体を把持する際のメカニズムを光弾性法を用いることで明らかにした。柔軟物体を流体指で把持する際、指部が物体に侵入していく現象から始まり、物体の内部応力が徐々に増加していく。そして、物体（特に自由境界面）の内部応力の変化が小さくなったところで物体の変形が現れ始めることがわかった。これ以降の状態では物体に十分な力が加わっており、また柔軟物体が破壊される際に必ず起こる現象であることから、この位置(本稿では CP と呼んでいる)で把持することが柔軟物体を破壊せずに把持するのに適していることを示した。そして、流体指の流体圧をモニタリングすることでその位置を検出する手法を提案した。CP 付近では流体圧の増加率がそれまでと変化するため、それを検出する手法を執った。そのために、2次元と3次元の近似関数により流体圧のデータを近似し、そのフィッティング精度の差から検出できることを確認した。フィッティング精度の差を検出に用いることで対象物の物性値に影響されることなく、同一の閾値で CP の検出が可能であることも確認した。

流体指の有用性が確認できたため、流体指の長所も生かしつつ、さらに幅広い物体に対応できる流体指の開発を行った。ソフトロボットハンド全般に言えることとして、重量物の把持が苦手という弱点がある。そのため、流体指の長所（壊れやすい物体の把持、複雑形状物体の把持が得意であること）を残しつつ重量物の把持も可能な流体指の開発を行った。ソフトロボットハンドが重量物の把持が苦手な理由としては、物体の重量により指部が変形し、把持を維持できないことにある。そのため、重量物を把持した際、物体の重量で変形しない剛性の高い部分で把持するという方法を執った。流体指の流体中にマイクログリップと呼ばれる剛体機構を設けることで重量物の把持を実現した。この柔らかさと剛体のハイブリッド構造により、幅広い物体の把持が可能であることを実機実験により確認した。また流体内部のマイクログリップは対象物が指部を変形させ、マイクログリップ間のベルトを圧縮していくと閉じる機構とした。これにより、力学的な力のつり合いから対象物が指の中心方向に移動していき、位置補正機能を実現できることも確認した。

マイクログリップ内蔵流体指を開発し、多様な種類の物体を把持できることを確認した。ただし、マイクログリップ内蔵流体指を単純な平行グリップで使

用するにはテーブルに置かれた小さな物体が把持できない点や長物を把持すると安定性がない点などが課題となる。またマイクログリップ内蔵流体指により指と物体の接触面での不確かさは吸収できるが、物体の全体的な不確かさは吸収できないという視点からもロボットハンド全体の開発が必要となる。そのため、マイクログリップ内蔵流体指を搭載し、かつ物体の全体的な不確かさを吸収するために3種類の把持モード（平行グリップ、ピンチング、包み込み把持）を実現可能なロボットハンドを開発した。指の関節部にラチェット構造を設け、指先をテーブルなどの環境に当てることで指先の姿勢を変化させる構造となっている。これにより、対向する2指を開閉するためのアクチュエータのみで把持動作、把持モード変更を実現する構造となっている。このハンドを用いて、70種類の物体に対して把持実験を行い、サイズによる制約がある物体以外については把持が可能であった。また、ラチェット構造のバックラッシュを考慮した制御則の提案や、本ハンドの可搬重量の算出を行った。

これらにより、下記のような様々な物体の把持が可能なロボットハンドの開発に成功した。

- 柔らかく壊れやすい物体
- 変形しやすい物体
- 薄い物体
- 重量物
- 小さい物体

柔らかさを用いることで把持対象物の不確かさを吸収できることはわかったため、今後の課題は柔らかさを持つエンドエフェクタを用いた場合のマニピュレーションへの貢献を調査することである。

参考文献

- [1] T. Nishimura, Y. Fujihira, R. Adachi, and T. Watanabe, “New Condition for Tofu Stable Grasping with Fluid Fingertips,” *Proc. IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, 2016.
- [2] R. Adachi, Y. Fujihira, and T. Watanabe, “Identification of danger state for grasping delicate tofu with fingertips containing viscoelastic fluid,” *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, no. Sept 28-Oct 2, pp. 497–503, 2015.
- [3] R. Maruyama, T. Watanabe, and M. Uchida, “Delicate grasping by robotic gripper with incompressible fluid-based deformable fingertips,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 5469–5474, 2013.
- [4] K. Mizushima, T. Nishimura, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, “Surface Texture of Deformable Robotic Fingertips for a Stable Grasp Under Both Dry and Wet Conditions,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, no. 4, pp. 2048–2055, Oct. 2017.
- [5] 渡辺哲陽, “ロボットマニピュレーションを支えるハードウェア：柔らかさをもつロボットハンド,” *計測と制御*, vol. 56, no. 10, pp. 736–740, 2017.
- [6] M. Controzzi, C. Cipriani, and M. C. Carrozza, “Design of Artificial Hands: A Review,” 2014, pp. 219–246.
- [7] K. Yamaguchi, Y. Hirata, and K. Kosuge, “Underactuated Robot Hand for Dual-Arm Manipulation,” 2015.
- [8] Robotiq, “3-Finger Adaptive Robot Gripper,” [Online]. Available: <http://robotiq.com/en/products/industrial-robot-hand/>. .
- [9] S. B. Backus and A. M. Dollar, “An Adaptive Three-Fingered Prismatic Gripper With Passive Rotational Joints,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 668–675, Jul. 2016.
- [10] Shadow Robot Company, “Shadow Dexterous Hand,” 2015. [Online]. Available: <http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>.
- [11] W. Townsend, “The BarrettHand grasper – programmably flexible part handling and assembly,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 181–188, Jun. 2000.
- [12] Barret Technology Inc., “Barret Hand BH8-282,” [Online]. Available: <http://www.barrett.com/robot/index.htm>. .
- [13] J. Butterfass, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, and G. Hirzinger, “Design and experiences with DLR hand II,” *World Autom. Congr. Proc. Tenth Int. Symp. Robot. with Appl.*, pp. 105–109, 2004.

- [14] I. Gaiser, S. Schulz, A. Kargov, H. Klosek, A. Bierbaum, C. Pylatiuk, R. Oberle, T. Werner, T. Asfour, G. Bretthauer, and R. Dillmann, “A new anthropomorphic robotic hand,” in *Humanoids 2008 - 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2008, pp. 418–422.
- [15] L. U. Odhner, L. P. Jentoft, M. R. Claffee, N. Corson, Y. Tenzer, R. R. Ma, M. Buehler, R. Kohout, R. D. Howe, and a. M. Dollar, “A compliant, underactuated hand for robust manipulation,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 736–752, 2014.
- [16] M. Tavakoli, L. Marques, and A. T. De Almeida, “Flexirigid, a novel two phase flexible gripper,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 5046–5051, 2013.
- [17] A. Pettersson, S. Davis, J. O. O. Gray, T. J. J. Dodd, and T. Ohlsson, “Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes,” *J. Food Eng.*, vol. 98, no. 3, pp. 332–338, 2010.
- [18] 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. Natl. Acad. Sci.*, vol. 107, no. 44, pp. 18809–18814, 2010.
- [19] EMPIRE ROBOTICS, “VERSABALL GRIPPER,” [Online]. Available: <http://empirerobotics.com/products>.
- [20] J. Kim, A. Alspach, and K. Yamane, “3D printed soft skin for safe human-robot interaction,” in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 2419–2425.
- [21] H. Choi, M. Koc, and M. Koç, “Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 12–13, pp. 1350–1361, 2006.
- [22] A. Dameitry and H. Tsukagoshi, “Lightweight underactuated pneumatic fingers capable of grasping various objects,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 2009–2014.
- [23] R. Deimel and O. Brock, “A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 35, no. 1–3, pp. 161–185, Jan. 2016.
- [24] K. Ramesh, Ed., *Digital Photoelasticity*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [25] C. S. Lovchik and M. A. Diftler, “The Robonaut hand: a dexterous robot hand for space,” in *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*, 1999, vol. 2, pp. 907–912.

- [26] N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, and R. Dillmann, "Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand," in *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*, vol. 3, pp. 1754–1759.
- [27] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, "DLR-Hand II: next generation of a dextrous robot hand," in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, vol. 1, pp. 109–114.
- [28] Jun Ueda, Y. Ishida, M. Kondo, and T. Ogasawara, "Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 2332–2337.
- [29] H. Iwata and S. Sugano, "Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 580–586.
- [30] J.-P. J. DEMERS Louis-Alexis ALLEN, Simon LEFRANÇOIS, "A gripper having a two degree of freedom underactuated mechanical finger for encompassing and pinch grasping," 2013.
- [31] H. Takeuchi and T. Watanabe, "Development of a Multi-fingered Robot Hand with Softness-changeable Skin Mechanism," in *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, 2010.
- [32] K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, "Soft robotic fingertips part I: A comparison of construction materials," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 320–334, 1996.
- [33] T. Nishimura, Y. Fujihira, and T. Watanabe, "Microgripper-Embedded Fluid Fingertip-Enhancing Positioning and Holding Abilities for Versatile Grasping," *J. Mech. Robot.*, vol. 9, no. 6, p. 061017, Oct. 2017.
- [34] S. Hirose and Y. Umetani, "The development of soft gripper for the versatile robot hand," *Mech. Mach. Theory*, vol. 13, no. 3, pp. 351–359, 1978.
- [35] B. S. Kim and J. B. Song, "Object grasping using a 1 DOF variable stiffness gripper actuated by a hybrid variable stiffness actuator," *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4620–4625, 2011.
- [36] I. Schmidt, "Flexible moulding jaws for grippers," *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 24–26, Jan. 1978.
- [37] "How to Make an Origami Balloon." [Online]. Available:

- <https://www.youtube.com/watch?v=8hA1BKyx51A>.
- [38] K. B. Shimoga and a. a. Goldenberg, “Soft materials for robotic fingers,” *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, no. May, pp. 4–9, 1992.
 - [39] G. Grioli, M. Catalano, E. Silvestro, S. Tono, and A. Bicchi, “Adaptive synergies: An approach to the design of under-actuated robotic hands,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 1251–1256, 2012.
 - [40] L. Jiang, K. Low, J. Costa, R. J. Black, and Y. Park, “Fiber Optically Sensorized Multi-Fingered Robotic Hand,” pp. 1763–1768, 2015.
 - [41] S. Arimoto, P. T. A. Nguyen, H.-Y. Han, and Z. Doulgeri, “Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips,” *Robotica*, vol. 18, no. 1, pp. 71–80, 2000.
 - [42] K. Hosoda, Y. Tada, and M. Asada, “Anthropomorphic robotic soft fingertip with randomly distributed receptors,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 54, no. 2, pp. 104–109, 2006.
 - [43] N. Xydas, “Modeling of Contact Mechanics and Friction Limit Surfaces for Soft Fingers in Robotics, with Experimental Results,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 18, no. 9, pp. 941–950, 1999.
 - [44] 内田 真裕, 渡辺 哲陽, and 丸山 量志, “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,” *日本ロボット学会誌*, vol. 31, no. 8, pp. 747–754, 2013.
 - [45] Y. Fujihira, K. Harada, T. Tsuji, and T. Watanabe, “Experimental investigation of effect of fingertip stiffness on resistible force in grasping,” *Robot. Autom. (ICRA), 2015 IEEE Int. Conf.*, pp. 4334–4340, 2015.
 - [46] I. M. Bullock, C. Guertler, and A. M. Dollar, “Patterned compliance in robotic finger pads for versatile surface usage in dexterous manipulation,” *2015 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 2574–2579, 2015.
 - [47] R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Murakami, “Robotic Dexterity by Multi-fingered Hand with Soft Fingertip,” *Citeseer*, pp. 83–88.
 - [48] R. Ramadour, F. Chaumette, and J. P. Merlet, “Grasping objects with a cable-driven parallel robot designed for transfer operation by visual servoing,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4463–4468, 2014.
 - [49] Amazon, “Amazon Robotics Challenge.” [Online]. Available: <https://www.amazonrobotics.com/#/>.
 - [50] N. Correll, K. E. Bekris, D. Berenson, O. Brock, A. Causo, K. Hauser, K. Okada, A. Rodriguez, J. M. Romano, and P. R. Wurman, “Analysis and Observations From the First Amazon Picking Challenge,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol.

15, no. 1, pp. 172–188, Jan. 2018.

[51] “YCB Benchmarks – Object and Model Set.”

付録

実験装置

本稿で用いる 3 軸自動ステージ

下図に示すような 3 軸方向の自動ステージを本研究ではマニピュレータの代わりに用いる。短軸アクチュエータを直行する 3 方向に備えている。表 1 にこの自動ステージの性能を示す。本ステージはステッピングモータを用いており、速度制御、位置制御が可能である。

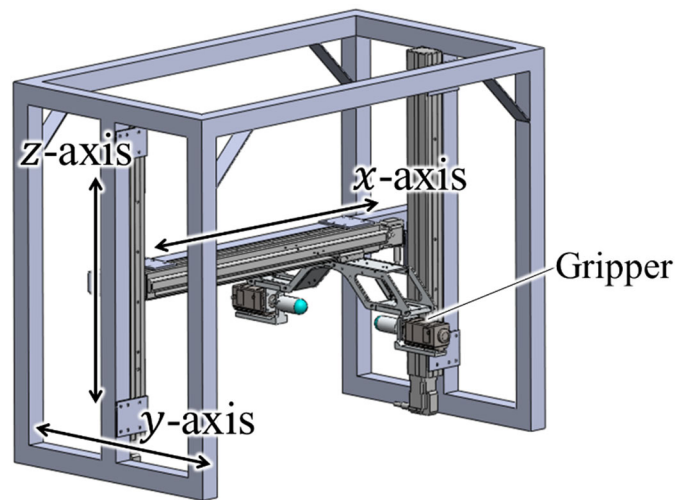


図 3 軸自動ステージ

表 自動ステージの仕様

	Number of actuator	Pushing force [N]	Stroke [mm]
x-axis	1	200	500
y-axis	2	400	500
z-axis	2	400	500

整式による回帰

データセット $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ が得られた場合、それにフィ

フィッティングする d 次元の整式は下記で表される.

$$f^{(d)}(x) = \sum_{j=0}^d a_j x_i^j \quad (1)$$

係数 $\mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_d]^T$ は下記の S を最小化することにより得られる.

$$\mathbf{a} = \underset{\mathbf{a}}{\operatorname{argmin}} S \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^N \left(y_i - \sum_{j=0}^d a_j x_i^j \right)^2 \quad (3)$$

S を最小化するためには, 下記の式を満たす必要がある.

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 0 \quad (4)$$

それにより下記が得られる.

$$\left[\sum_{i=1}^N x^j, \sum_{i=1}^N x^{j+1}, \dots, \sum_{i=1}^N x^{j+d} \right] \mathbf{a} = \sum_{i=1}^N y_i x_i^j \quad (5)$$

これらを計算すると下記となる.

$$\begin{bmatrix} s_0 & s_1 & \cdots & s_d \\ s_1 & s_2 & \cdots & s_{d+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_d & s_{d+1} & \cdots & s_{2d} \end{bmatrix} \mathbf{a} = \begin{bmatrix} t_0 \\ t_1 \\ \vdots \\ t_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで s_m と t_m は下記である.

$$s_m = \sum_{i=1}^N x_i^m, t_m = \sum_{i=1}^N y_i x_i^m \quad (7)$$

s_m と t_m はデータセットにより得られるため, \mathbf{a} は下記により得られる

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 & \cdots & s_d \\ s_1 & s_2 & \cdots & s_{d+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_d & s_{d+1} & \cdots & s_{2d} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} t_0 \\ t_1 \\ \vdots \\ t_d \end{bmatrix} \quad (8)$$