

博士論文

吸引着把握併用ハンドの動作構造同時設計論と
融合感覚把持制御に関する研究

令和3年12月3日提出

指導教員 岡田 慧 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科

知能機械情報学専攻 博士課程

長谷川 峻

目次

| | | |
|------------|-------------------------------|-----------|
| 第1章 | 序論 | 9 |
| 1.1 | 本研究の背景 | 11 |
| 1.2 | 本研究の目的 | 12 |
| 1.3 | 本論文の構成 | 12 |
| 第2章 | 吸引着把握併用マニピュレーション | 15 |
| 2.1 | 狭隘空間でのマニピュレーションにおける吸引着の活用 | 17 |
| 2.2 | 吸引着の有用性を示す事例 | 19 |
| 2.3 | 把握を用いたハンドの体系 | 23 |
| 2.4 | 吸引・吸着・把握を用いたハンドの体系 | 24 |
| 2.4.1 | 単指マニピュレーションの分類 | 27 |
| 2.4.2 | 単指把握切替マニピュレーションの分類 | 34 |
| 第3章 | 吸引着把握併用ハンドの把持動作安定指標 | 37 |
| 3.1 | 従来の把持理論における把持安定指標 | 39 |
| 3.1.1 | フォースクロージャ | 39 |
| 3.1.2 | フォースクロージャにおける把持安定余裕 | 42 |
| 3.2 | 吸引着力を考慮した把持安定余裕 | 47 |
| 3.3 | 吸引着力を考慮した把持安定余裕に基づく把持比較例 | 50 |
| 3.4 | 把持移行期安定指標としての把持移行期リスク | 50 |
| 第4章 | 吸引着把握併用ハンドの動作構造同時設計論 | 59 |
| 4.1 | 構造設計論と動作構造同時設計論 | 61 |
| 4.2 | 剛体近似に基づいた狭隘空間におけるピッキング | 62 |
| 4.2.1 | 把持移行期リスクを用いた動作構造同時設計論 | 62 |
| 4.2.2 | 吸引着力を考慮した把持安定余裕を用いた動作構造同時設計論 | 64 |
| 4.2.3 | 壁への押し付けによる吸引成立動作が常に機能する物体 | 67 |
| 4.2.4 | 狭隘空間におけるピッキングのための動作戦略 | 68 |
| 4.2.5 | ハンド構造実現 | 70 |
| 4.2.6 | 実現された構造の評価実験 | 75 |
| 4.3 | 剛体近似に基づいた狭隘空間におけるピッキング・ストーイング | 80 |

| | | |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.3.1 | 倉庫自動化において必要なタスク | 81 |
| 4.3.2 | 動作構造同時設計論の適用 | 83 |
| 4.4 | 非剛体物体への応用 | 91 |
| 4.4.1 | 可変形状物体の操作 | 91 |
| 4.4.2 | 薄く脆弱な物体を操作可能な吸着機構の構造実現 | 95 |
| 4.4.3 | 吸引機構と吸着機構の統合 | 107 |
| 第5章 | 吸引着把握併用ハンドの融合感覚把持制御 | 117 |
| 5.1 | 視覚に基づく到達動作の制御 | 120 |
| 5.1.1 | 物体クラス依存の把持動作代表点認識 | 121 |
| 5.1.2 | 物体クラス不問の把持動作要素点認識 | 127 |
| 5.2 | 効果器距離覚と近接覚に基づく到達動作の制御 | 144 |
| 5.2.1 | 効果器距離覚・近接覚による吸引位置補正動作 | 144 |
| 5.2.2 | 効果器距離覚による垂れ下がり面の状態認識 | 146 |
| 5.2.3 | 指先距離覚による認識 | 146 |
| 5.2.4 | 掌距離覚による認識 | 148 |
| 5.3 | 近接覚に基づく到達動作の制御 | 149 |
| 5.3.1 | 垂れ下がり部分の認識 | 149 |
| 5.4 | 近接覚に基づく把持動作の制御 | 154 |
| 5.4.1 | 把持切り替え制御 | 154 |
| 5.4.2 | 力キャップ式把持動作制御 | 155 |
| 5.5 | 効果器距離覚と近接覚の融合に基づく把持動作の制御 | 159 |
| 5.5.1 | カー一定化式把持動作制御 | 159 |
| 第6章 | 吸引着把握併用マニピュレーション実験 | 183 |
| 6.1 | 狭隘空間におけるピッキング実験 | 185 |
| 6.2 | 狭隘空間におけるピッキング・ストーイング実験 | 187 |
| 6.2.1 | ピッキング実験 | 187 |
| 6.2.2 | ストーイング実験 | 191 |
| 6.3 | 可変形状物体の把持操作実験 | 195 |
| 6.3.1 | 視覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験 | 195 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.3.2 | 視覚・効果器距離覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験 | 199 |
| 6.3.3 | 効果器距離覚の有無の比較 | 201 |
| 6.4 | 薄く脆弱な物体の把持操作実験 | 205 |
| 第7章 | 結論 | 207 |
| 7.1 | 本研究の結論 | 209 |
| 7.2 | 今後の展望 | 210 |
| | 謝辞 | 211 |
| | 付録 | 215 |
| A.1 | ロボットのハードウェア構成 | 217 |
| A.1.1 | 双腕ロボット Baxter | 217 |
| A.1.2 | 双腕ロボット HIRONXJSK | 219 |
| | 発表文献 | 221 |
| | 参考文献 | 227 |

第1章

序論

1.1 本研究の背景

ロボットによる物体マニピュレーションは、長年研究されているにも関わらず、新規の発見が絶えない興味深いテーマである。その要因の一つは、マニピュレーションを行う環境によってマニピュレーションの難易度が大きく変化することにある。例えば、物体 A を地点 B から地点 C に移動させるという点では同じマニピュレーションであっても、地点 B が障害物のない開けた平面上にあるのか、A 以外の物体も入った箱の中にあるのかによって、マニピュレーションの難しさは全く異なる。また、A が剛体なのか形状可変な物体なのかなどによっても、難易度が異なってくる。ロボットマニピュレーション研究が進展するにつれ、より困難な環境についての取り組みがなされ、マニピュレーション可能な範囲が広がっていった。具体的には、予めハンドに握らせておいた剛体の操作 [1] から始まって、テーブルや床のような開けた空間での剛体のマニピュレーション [2, 3] が行われ、箱にバラバラに入れられた剛体部品を持ち上げるばら積みピッキング [4, 5, 6] や、テーブル上の複数種類の物体からのピッキング [7, 8]、可変形状物体のマニピュレーション [9, 10] に発展していった。

近年、倉庫自動化が注目され [11]、倉庫における物品棚のような、環境に固定された壁によって物体が囲まれている狭隘空間におけるマニピュレーションへの取り組みが始まっている [12, 13, 14, 15]。マニピュレーションのためのエンドエフェクタは把握機構と吸引・吸着（以下、合わせて吸引着と呼ぶ）機構に分けられるが、把握機構の手先は物体サイズ以上の開き幅を必要とするのに対し、吸引着機構の手先は物体サイズより小さくても機能するため、狭隘空間における吸引着の有用性は明らかである。実際、産業用ロボットにおける普及率とは裏腹にロボット研究においてそこまで注目されてこなかった吸引グリッパが、狭隘空間におけるマニピュレーションへの取り組みが始まると脚光を浴びるようになった [16]。一方で、吸引着単体を用いていると、物体を把持してから運搬して置くまでの間に物体を落としたり潰したりしてしまうケースが散見されることが指摘されている [17]。この原因として考えられるのは、吸引着単体では十分な把持安定性を確保できておらず、把持後に可能な動作が大きく制約されていることである。ロボットの制御誤差や環境との僅かな干渉により、ロボットの動作が少し変化した結果として制約を破ってしまって物体を落としたり、環境と物体の干渉を回避するような動作が制約内では行えず、物体を潰したりしてしまうのである。しかし、従来の吸引グリッパには、吸引成立後にさらなる把持安定化を行える機構は搭載されていないことがほとんどであった [4, 14]。そこで、本研究では、吸引着による把持後に追加で

対向した指による把握を行うことで、把持安定性を高める吸引着把握併用という新たな概念を提案し、それを可能とするハンドの動作と構造を同時に設計する設計論を示す。さらに、複数の感覚器の出力を融合し、一つの感覚として扱えるようにした融合感覚による、把持動作の制御を提案する。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、物品棚などの狭隘空間における物体の把持と操作を対象として、吸引・吸着・把握という異なるモダリティを併用するロボットハンドの動作・構造の設計論と動作の制御法を明らかにすることである。本研究ではまず、狭隘空間におけるマニピュレーションに関する経験則を分析し、マニピュレーションの安定性を構成する要素を抽出する。その上で、それらの要素を評価するための把持動作安定指標を定義し、ハンド設計の基盤とする。設計に当たっては、狭隘空間で活用できるハンドの構造は安定な把持動作が可能かつ簡潔なものとして実現する必要があることから、ハンドの動作と構造を同時に設計する動作構造同時設計論を提案する。設計された動作の実行に当たっては、複数のセンサ情報を用いた複雑な制御を単純化するため、複数の感覚器の出力を融合した融合感覚を構成し、それを入力とした制御を行うことを提案する。

1.3 本論文の構成

本論文は全7章からなる。本論文の構成と各章の関係を Fig.1.1 に示す。以下に各章の概要を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章「吸引着把握併用マニピュレーション」では、狭隘空間におけるマニピュレーションを概観し、そのマニピュレーションにおいて考慮しなければならない安定性について述べ、その安定性をハンド構造の簡潔さとのバランスを取りながら考慮する設計論の有用性について述べる。さらに、狭隘空間だけでなく吸引着が有用な事例を整理し、把握を含めて体系化する上で、提案する設計論やその要素である安定性評価指標が従来不足していた部分を埋めることを述べる。

第3章「吸引着把握併用ハンドの把持動作安定指標」では、吸引着把握併用ハンドの把持動作の安定性を評価するための指標について述べる。従来の把持理論における把持安定指標を

拡張して吸引着力を考慮可能とした把持安定余裕と、ハンドが物体に順次接触していく期間である把持移行期の安定性を評価する把持移行期リスクについて述べる。

第4章「吸引着把握併用ハンドの動作構造同時設計論」では、把持動作安定指標を用いてハンドの動作と構造を同時に設計する設計論と、それに基づくハンド構造の実現について述べる。安定性が高い動作だけでなく、それが機能しない場合の代替動作やさらなる安定性の向上法まで含めて、ハンド構造の簡潔さと動作の安定性のバランスを取りながら考慮する設計論と、それに基づく狭隘空間に対応したハンド、可変形状物体や薄く脆弱な物体への応用を示す。

第5章「吸引着把握併用ハンドの融合感覚把持制御」では、複数の感覚器を融合した融合感覚による到達動作と把持動作の制御について述べる。タスクに応じて構成する実世界認識を用いた視覚由来の融合感覚に基づく制御と、末端効果器にあるセンサ由来の融合感覚に基づく精密な制御を示す。

第6章「吸引着把握併用マニピュレーション実験」では、動作構造同時設計論に基づき構築したハンドを融合感覚把持制御で動作させることにより、狭隘空間でのピッキング・ストーイングや可変形状物体の把持操作、薄く脆弱な物体の把持操作が実行可能であることを、実機実験を通じて示す。

第7章「結論」では、本研究の結論を述べる。

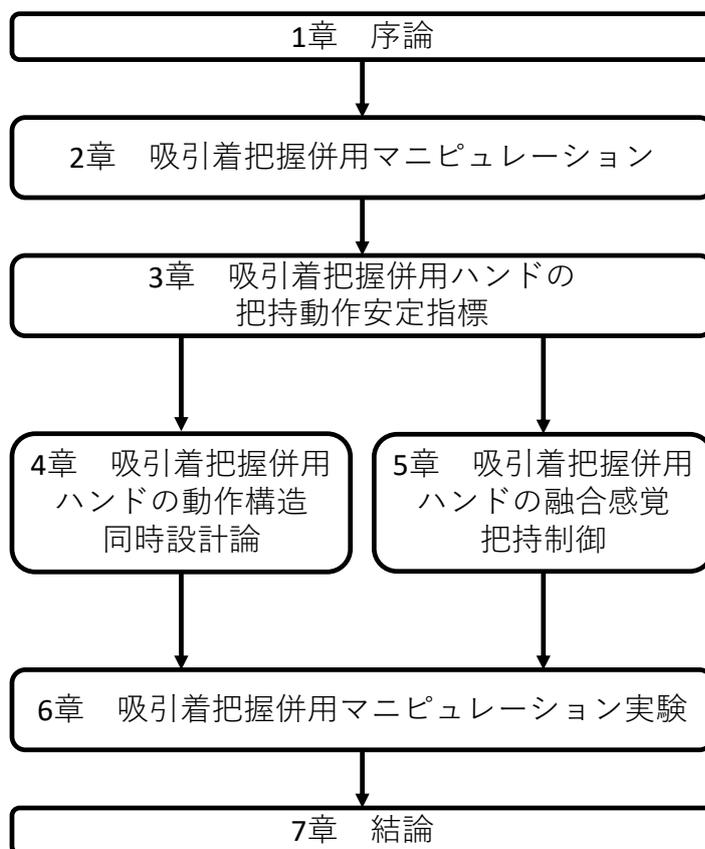


Fig. 1.1: 本論文の構成 .

第2章

吸引着把握併用マニピュレーション

本章ではまず，狹隘空間におけるマニピュレーションについて述べ，物体を壁に押し付けて吸引着することが有効であるとの経験則を分析する．そしてその原因が，到達動作と把持の間の，予定されている接触の一部しか実現されていないために実世界認識や動作制御の誤差によって物体が想定外に動いてハンド外に出てしまう可能性がある期間を安定化できることにあると指摘し，これを把持移行期と定義する．狹隘空間では，その期間の安定性が高い動作を行えるようにするべきであるだけでなく，その動作が行えない時の代替動作や，吸引着成立後に把持をより安定化できる把握の併用も含めて，ハンド構造の簡潔さと動作の安定性のバランスを取りながら考慮するべきであり，そのためにハンドの動作と構造を同時に設計する設計論があるべきであることを述べる．さらに，狹隘空間だけでなく吸引着が有用な事例を整理し，把握を含めて体系化する上で，提案する設計論やその要素である安定性評価指標が従来不足していた部分を埋めることを述べる．

なお，本研究では，吸引着による物体の拘束と対向した指による物体の拘束の両方が行われるが，両者とも物体の拘束という意味では同じである一方で，その実施形態は大きく異なっており，これらの同一性・異質性を表す用語が必要である．そこで，JIS B 8443:2000 [18] 及びその原文である ISO 14539:2000 [19] を参考にして，実施形態を問わずエンドエフェクタにより物体を拘束することを把持（グリップ）と呼び，その中でも複数の指により物体を拘束することを把握（グラスプ）と呼ぶ．すなわち，吸引着による物体の拘束は把持ではあるが，把握ではないとする．

2.1 狹隘空間でのマニピュレーションにおける吸引着の活用

倉庫における物品棚のような狹隘空間は，テーブルの上に物体が並んだ状態 [20, 21, 22] とは異なり，環境に固定された壁が存在する．その壁によって物体が囲まれているため，手先が物体サイズ以上の開き幅を必要とする把握機構よりも，手先が物体サイズより小さくても機能する吸引着機構に有用性がある．一般的な吸引の把持計画は，物体表面の平坦な領域を検出・選択し，そこに吸引部を揃えることで行われる [16]．一方で，狹隘空間においては，一般的には障害物という扱いになる壁（床も含む）を活用して，その壁に垂直に吸引着部を動かすことで，物体を壁に押し付けて向きを揃え，吸引着を成立させる動作が有効であることが経験的に知られている [12]．前者の手法によって計画された把持が実行可能となるための前提は，吸引着部が物体と接触した瞬間に密着して吸引着が成立することである．しかし，実際の把持過程においては，実世界認識や動作制御の誤差により，予定された全ての接触が

同時に達成されないことは多く、一部の接触しか実現していない期間が到達動作（リーチング）と把持の間に存在する。その期間においては、実世界認識や動作制御の誤差により過剰な接触力が発生すると、物体が想定外に動いてハンドから出てしまうリスクがあるため、不安定な期間と言える。特に、吸引着の成立には密着が必要であり、一部の接触しか実現していない期間では成立しないため、成立を前提とした動きの多くが機能せず、物体がハンドから出るリスクが高い。そこで、本研究では、その期間を把持移行期と定義して考慮する。従来のロボットマニピュレーション研究では、手を対象物まで到達させる到達動作（到達運動、リーチング）と把持するために手指を運動させる把持動作（把持運動）という区別が人間の運動 [23] を参考に行われている [24] もの、把持動作に関しては把持が完了した際のハンド姿勢や力の制御を扱うのが一般的であり、把持移行期には焦点が当たっておらず、センサを用いたオンラインでの局所的な安定化 [2, 25, 26, 27, 28] が行われるのみであった。しかし本来は、このようなオンラインでの安定化のみに頼るのではなく、動作を設計・選択する段階でより安定な動作を設計・選択することができるはずである。このような動作の例が、前述の、物体を壁に押し付けて吸引着を成立させる動作である。この動作における把持移行期について考えると、接触によって物体が動く方向には壁が存在するため、物体がハンドから出てしまうリスクは低くなっている。つまり、壁に物体を押し付ける動作は、把持移行期の安定性を考慮した動作であると言え、壁のある狭隘空間においては強力な動作である。

一方で、壁に物体を押し付ける動作が常時可能であるかということ、環境や物体によっては不可能な場合もある。例えば、Fig.2.1 のように物体が詰まった狭隘空間を考えると、対象物によっては、二本以上の指を届かせて把握を成立させることが困難である（Fig.2.2）だけでなく、壁に物体を押し付ける動作も難しい。この場合、Fig.2.3a のような、物体正面を吸引着する動作を行うことができる。この動作は、物体の後ろに壁がないため、把持移行期は不安定になってしまうが、物体が詰まった狭隘空間を考える上では有用な動作となる。また、Fig.2.3a では、吸引着を用いて物体を引き出した結果、物体の一部が柵から飛び出すことで把握可能となっており、Fig.2.3b のように把握すれば吸引着把握併用となる。すなわち、安定性の高い動作一個のみを用意すれば良いのではなく、その動作が行えない時の代替動作や、吸引着成立後に把持をより安定化するための把握の併用も含めて設計するべきである。その際には、ハンド構造の簡潔さと動作の安定性のバランスを取るべきであり、それを可能とする設計論が重要となる。本研究では、把持移行期の安定性はもちろんのこと、把握の併用による把持の安定化の度合いを評価するため、それらの評価指標を第3章において定

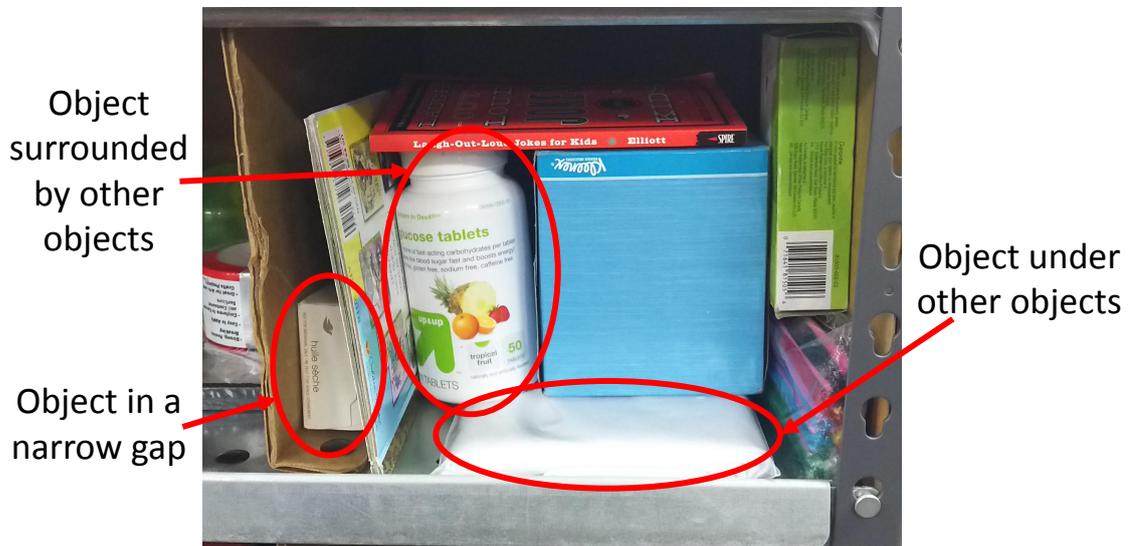


Fig. 2.1: 物体が詰まった狭隘空間の典型例 [29] .



(a) 狭い隙間にある対象物を把握できない . (b) 他物体に囲まれた対象物を把握できない . (c) 他物体の下にある対象物を把握できない .

Fig. 2.2: 物体が詰まった狭隘空間において把握を成立させることが困難な典型例 [29] .

義する . また , 第 4 章においてその指標に基づき , ハンドの動作群とそれが可能なハンド構造を同時に設計する .

2.2 吸引着の有用性を示す事例

前節では , 狭隘空間における吸引着の有用性に焦点を当てたが , 吸引着の有用性を示す事例は他にも数多く存在している . 産業界においては , 負圧を発生させることによる吸引が , ロボット実用化初期から用途によっては用いられており [30] , 今日では非常に一般的な技術



(a) 吸引を用いた対象物の引き出し .

(b) 棚から飛び出した部分の把握 .

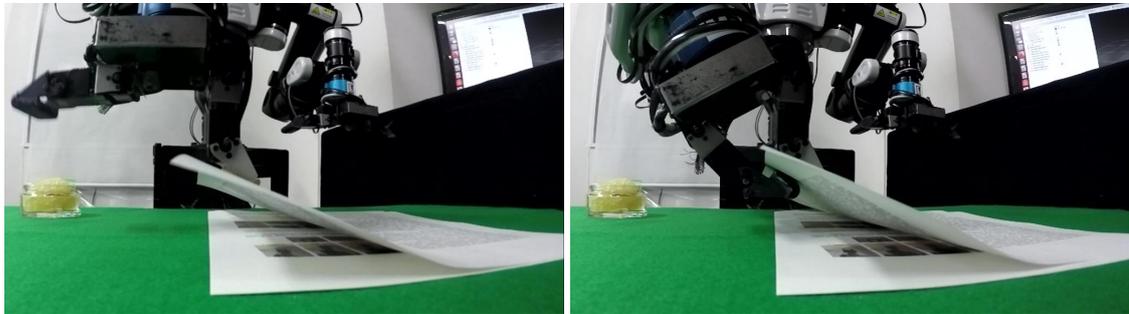
Fig. 2.3: 物体が詰まった狭隘空間からの対象物引き出しと把握 .

として物体搬送などに活用されている．実施形態も非常に多様であり，真空パッド一個のみでの吸引だけでなく，複数個の真空パッドを並べて平面を吸引できるようにしたものや，スポンジを用いて大量の真空パッドに相当する機能を実現するものなど，用途に合わせた様々なものが利用されている．また，ハンドに内蔵した電極に電圧を加えて静電気力を発生させることによる静電吸着を用いた物体把持も，特に半導体デバイス製造におけるウエハー固定のために広く用いられている [31] .

ロボット研究における事例を考えてみると，斜面・壁面移動を目的としたものが多く，ヤマモリの足を模倣した微細な剛毛によるファンデルワールス力を利用したもの [32] や合成ゴム系接着剤を用いたもの [33] ，粘着テープを用いたもの [34] ，粘着性エラストマーを用いたもの [35] ，空気吸引を用いたもの [36] ，磁力を用いたもの [37] ，液体の表面張力を用いたもの [38] ，静電気力を用いたもの [39] など，多様な方式が知られている．一方で，マニピュレーションを目的とした事例を考えてみると，空気吸引が用いられることが多い．狭隘空間におけるマニピュレーションの研究 [12, 13, 14, 15] や，空気吸引を用いた薄い物体（鍵・USBメモリ）の持ち上げ [40] がその例に当たる．特に後者は，形状自体が側面からの把握に適さない物体に対して有効な把持方法とみなせる．このような物体の例として，以下を挙げることができる．

薄い物体

机の上に置かれた紙などの薄い物体を考えると，高さがいないために物体側面の把握は困難であり，物体裏面が机で覆われているために表面と裏面の把握も困難である．このような物体に対する吸引着を用いない操作としては，指先に回転円盤を持った平行グリッパで机上の



(a) 吸引着を用いた対象物の持ち上げ． (b) 対象物裏面に指を当てることによる把握．

Fig. 2.4: 薄い物体の持ち上げと把握．吸引着を用いると，薄い物体が複数積み重なっていても一枚のみを持ち上げられる．

紙を押さえつけ，円盤を回転させて紙の姿勢を変える操作 [41] や，机上の CD や薄いプラスチック板を滑らせて机からはみ出させ，はみ出た部分を把握する操作 [42, 43] が挙げられる．しかし，このような操作を薄い物体が複数積み重なっている状況で行うと，擦った一番上の物体だけでなく下の物体も滑ってしまい，操作結果が制御困難になることがある．このような状況においては，Fig.2.4a のように吸引着で物体を持ち上げることで，一番上の物体から下の物体にかかる力を減らすことができ，下の物体の滑りを防止することができると考えられる．また，このような持ち上げを行うと，物体裏面に指が届くようになって把握可能となり，Fig.2.4b のように把握すれば吸引着把握併用になる．

可変形状物体

机の上に置かれた本などの折り畳まれた物体を考えると，高さは物体側面を把握するのに十分であったとしても，実際に把握してみると Fig.2.5b のように一部分が把握されずに垂れ下がってしまうことがある．垂れ下がる部分は，把握された部分と変形可能部分を介して繋がっている部分である．把握が全くできないというわけではないものの，このように把握が不十分な状況では，Fig.2.5c のように，垂れ下がった部分が邪魔になってプレイスが失敗することがあり，ピックアンドプレイスのための把握という意味では失敗していると言える．このような物体に対する吸引着を用いない操作としては，薄い指を物体と床の間に滑り込ませて床の上の物体を持ち上げる操作 [45] や，本棚に入った本同士の間隙に薄い指を挿入して本の表紙と裏表紙を直接把握する操作 [46, 47]，本棚や床にある本の背表紙に指を引っ掛けて傾ける操作 [48, 49]，薄い物体と同様に，机上の本を滑らせて机からはみ出させ，はみ

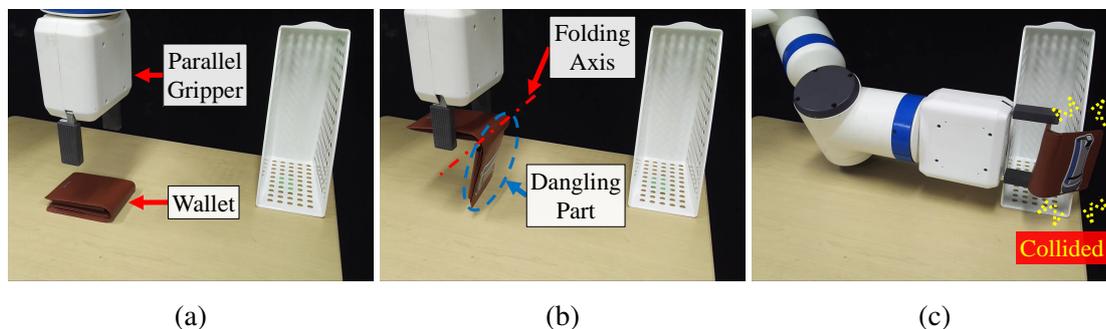


Fig. 2.5: 折り畳まれた物体を平行グリッパで把持した場合に発生する垂れ下がり現象 [44]. (a) は初期状態を示す. (b) はグリッパが物体を持ち上げた後の状態を示す. 財布の把持できていない部分が垂れ下がっている. (c) は垂れ下がった部分が邪魔になってファイルスタンドに物体を収納できなかった様子を示す.

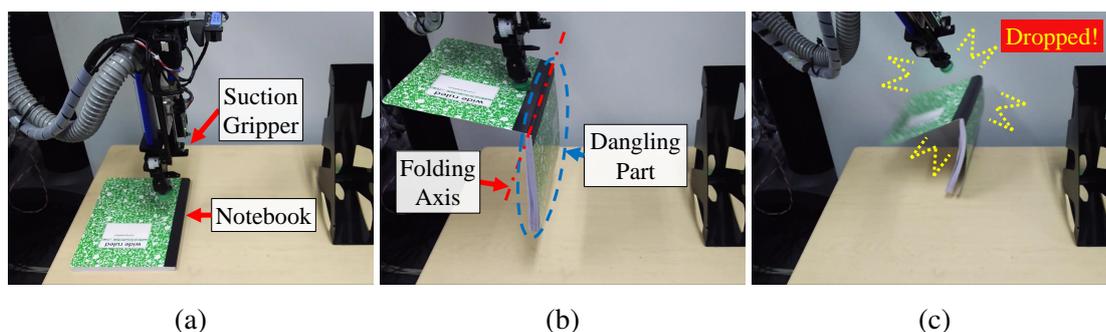


Fig. 2.6: 折り畳まれた物体を吸着グリッパで把持した場合に発生する垂れ下がり現象 [44]. (a) は初期状態を示す. (b) はグリッパが物体を持ち上げた後の状態を示す. 把持している表紙以外の部分が垂れ下がっている. (c) は把持が不安定化して物体を落とした瞬間を示す.

出た部分を把握する操作 [50] などが挙げられる. しかし, 薄い物体と同様に, 複数積み重なった状況については考慮されてこなかった. この場合も, 薄い物体と同様に, Fig.2.6b のように吸引着で物体を持ち上げることで, 一番上の物体から下の物体への影響を小さくすることができる. この状態のまま操作を続けようとしても, Fig.2.6c のように物体を落してしまう可能性がある. 垂れ下がった部分を含めて Fig.2.7 のように把握して吸引着把握併用にするべきであると考えられる.

以上のように, 吸引着の有用性を示す様々な事例が既に存在し, また新たに考えることができる. すなわち, 吸引着の有用性は明らかであるが, その論理的理解には体系化が必要である.

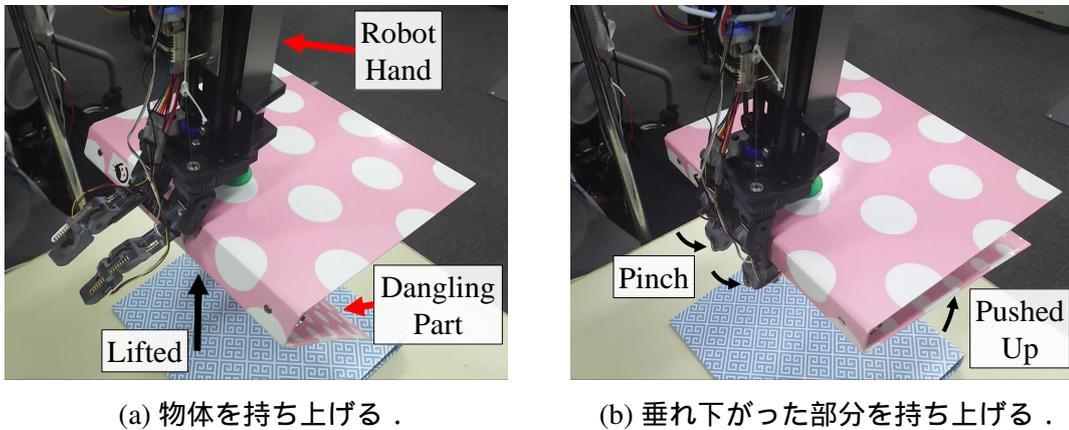


Fig. 2.7: 折り畳まれた物体の垂れ下がる部分を含めて把握する動作 [44] . (b) で垂れ下がりが解消されている .

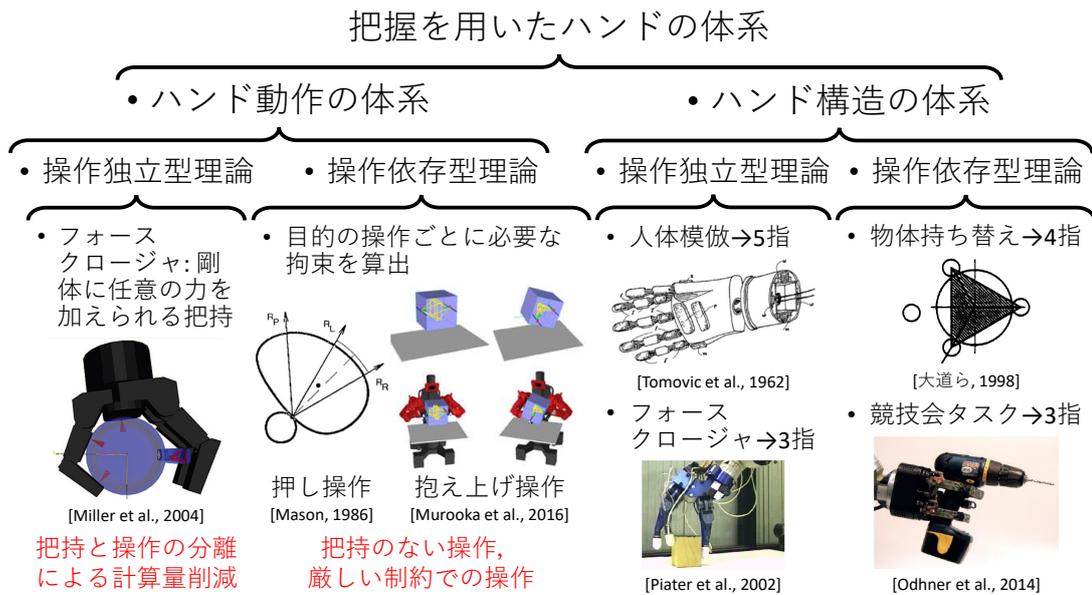


Fig. 2.8: 把握を用いたハンドの体系 .

2.3 把握を用いたハンドの体系

吸引着の体系化を考えるに当たり, まずは従来のロボット研究において一般的であった把握を用いたハンドの体系について整理する. 整理した結果を Fig.2.8 にまとめる. 体系には, ハンド動作の体系とハンド構造の体系が含まれており, それぞれ操作から独立した理論と操作に依存する理論とで構成されている. 以下で, この体系が成立した歴史的経緯を述べる.

ロボットの实用化に当たって最初に注目されたマニピュレーションは、物体をエンドエフェクタで把持して持ち上げ、移動させて配置するピックアンドプレイスである [51]。汎用的な把持方法としては指の対向による把握が採用された [52]。この把握を剛体に対して行うことを前提とすれば、安定な把握を完了した後であれば対象物とロボットアームが一体として扱えるため、ロボットアームの動作計画のみを行えば良く [53]、計算量が削減されて比較的容易にマニピュレーションが実現できる。このため、いかにして安定な把握を実現するかということが長く研究されてきた。代表的なものとしては、フォームクロージャとフォースクロージャという機構学で提案された概念 [54] を持ち込んだもの [55] が挙げられる。これらの概念については、第3章で詳しく述べる。ハンド研究においても、人間のような把握を行えることが目指され、当初の二本指ハンドから発展して、三本指ハンド [1]、四本指ハンド [56]、五本指ハンド [57] など、様々なハンドが開発されてきた。また、別の方向性として、人間の把握に学ぶだけでなく、フォースクロージャのような機構学的な安定性を基盤としてハンドを設計する試み [58, 59] が行われてきている。近年注目されたジャミンググリッパ [60] は、粉体を詰めた球体を物体に押し付け、球体内の空気を抜くことにより粉粒ジャミングを起こして物体を把持するものであり、無限大の数の指に相当する機能が実現されている。

このような把握に関する研究とそれを用いたピックアンドプレイスが盛んに行われる一方で、人間が大きい物や重い物を運ぶ際には押したり転がしたりして運んでいることに着目し、そのようなマニピュレーションをロボットにも行わせようという試みがなされるようになってきた。最初は押し操作の計画が行われ [61]、後にグラスプレス・マニピュレーション [3] あるいは nonprehensile manipulation [62] と呼ばれるようになった。この手法においては、把握を前提とせず、目的の操作ごとに必要な拘束を接触点単位で算出して実行することになる。これらが発展したものとして、全身接触による抱え上げ操作 [63] が行われている。また、ハンド設計においても、操作全体に依存した設計論が考えられ、物体の持ち替えを考えた四本指ハンド [64] やロボット競技会用に作られた三本指ハンド [65] が挙げられる。

2.4 吸引・吸着・把握を用いたハンドの体系

前節で整理した把握を用いたハンドの体系を基に、吸引着を用いたハンドの体系を整理すると、Fig.2.9 のようになる。産業応用が先行したため、操作依存型理論に焦点が当たっており、操作から独立した理論に関しては取り組まれていない。ハンド動作に関しては、把握の

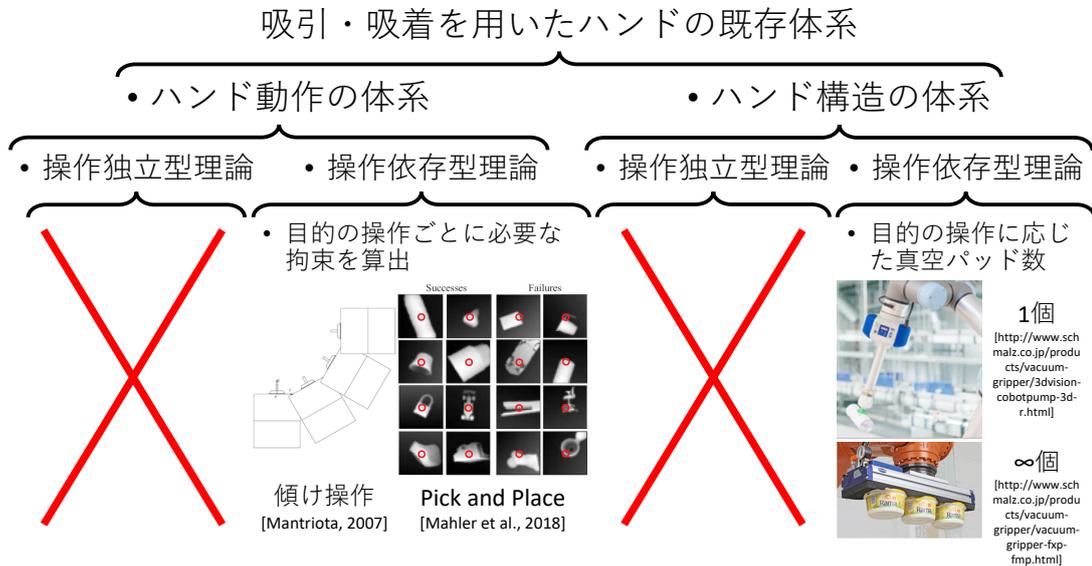


Fig. 2.9: 吸引着を用いたハンドの既存体系 .

場合と同様に，目的の操作ごとに必要な拘束が算出されている．例えば，傾け操作 [66] などが考えられてきた．複数の動作を準静的にシミュレーションして把持の安定性を得る手法 [67] もあるが，シミュレーションできる動作数は有限であるため，任意の場合に適用可能な把持安定性を得たとは言えない．ハンド構造に関しては，目的の操作に応じた真空パッド数の選択が行われてきている．

そこで，本研究では，体系に吸引着・吸着・把握の併用まで含めた上で，操作独立型理論を構築し，操作依存型理論にも新規の理論を加える．従来，吸引着・吸着・把握を併用するマニピュレーションはほとんど行われておらず，各指先に真空パッドを持つ三本指ハンド [40] の把持性能の計測 [68] や，重力よりも静電気力が支配的になる小さな物体のマニピュレーション [69] があるのみであり，従来の多指ハンドによる把持との比較や，吸引着と多指ハンドとの融合における設計指針については，未だ明らかになっていない．本研究では，これらを明らかにする．Fig.2.10 に，本研究の結果作られる体系を示す．ハンド動作の操作独立型理論としては，従来は把握力のみを考慮していたフォースクロージャにおける把持安定余裕を，吸引着力も考慮できるように拡張することで，吸引着と把握の統一的考慮を行う．ハンド動作の操作依存型理論としては，これまで述べてきた狭隘空間での把持操作，可変形状物体の変形抑止，薄い物体の単離を行う．ハンド構造の操作独立型理論としては，拡張した把持安



Fig. 2.10: 吸引・吸着・把握を用いたハンドの体系 .

定余裕を基に，吸引着指に加えて普通指を加えることで把持が安定化することを示す．ハンド構造の操作依存型理論としては，狭隘空間での把持操作において，狭隘空間に入り込むための伸展可能な細い吸引着指の設計を行う．

ここまでは，ハンド動作とハンド構造に共通した体系化を行うため，それらの目標に沿った体系化を行ってきたが，ハンド構造のみを考えると，ハンドの形状に基づいた体系化が行えるはずである．ここで，吸引グリッパの把持においては，最低一個の真空パッド全体が物体と接触しなければ，密閉が成立せずに把持ができないことに着目する．この接触点集合が吸引グリッパの最小単位となるが，本研究ではこれを一本の指と解釈する．このように解釈すれば，把握のみのハンドと合わせて，Fig.2.11 に示すような統一的分類を行うことができる．また，把持動作の設計において，物体モデル表面上に指モデルを配置し，指単位で接触点を設定するという概念が生まれる．接触点設定の際に，指モデルの接触成立条件として，真空パッド全体が接触するかという条件を与えることができ，それを満たさない把持は弾く，というパイプラインを構成することができる．

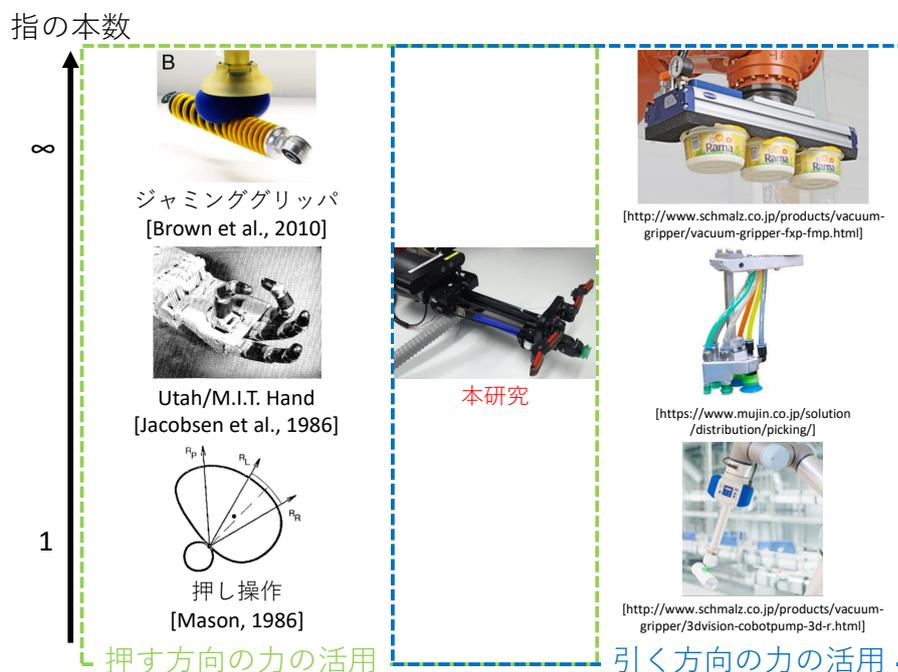


Fig. 2.11: 指の本数と使用している力の方向に着目した統一的なハンドの分類 .

2.4.1 単指マニピュレーションの分類

特に狭隘空間において吸引を利用する場合，真空パッドは一個となることが多い．このような一本の指によるマニピュレーションを単指マニピュレーションと定義し，その後把握への遷移を行うようなマニピュレーションを単指把握切替マニピュレーションと定義する．まず，単指マニピュレーションに関して，操作に用いる指に対する対象物の動作方向に着目して，Fig.2.12 のように分類を行う．指と対象物の接触面に平行に対象物が動く場合を擦り操作，垂直かつ指方向に動く場合を引き操作，垂直かつ指とは逆方向に動く場合を押し操作と分類する．これらのうちの複数種類が混合した操作も考えられる．

擦り操作

擦り操作は，指と対象物との間の摩擦力で対象物を駆動する操作である．吸引着を用いない擦り操作は，薄い物体や可変形状物体の操作において取り組まれてきている [41, 42, 43, 48, 49, 50]．この操作が，吸引着を用いることで成功しやすくなることを以下で示す．

吸引着を用いない擦り操作の最も簡単なモデルを Fig.2.13 に示す．指が対象物に垂直にか

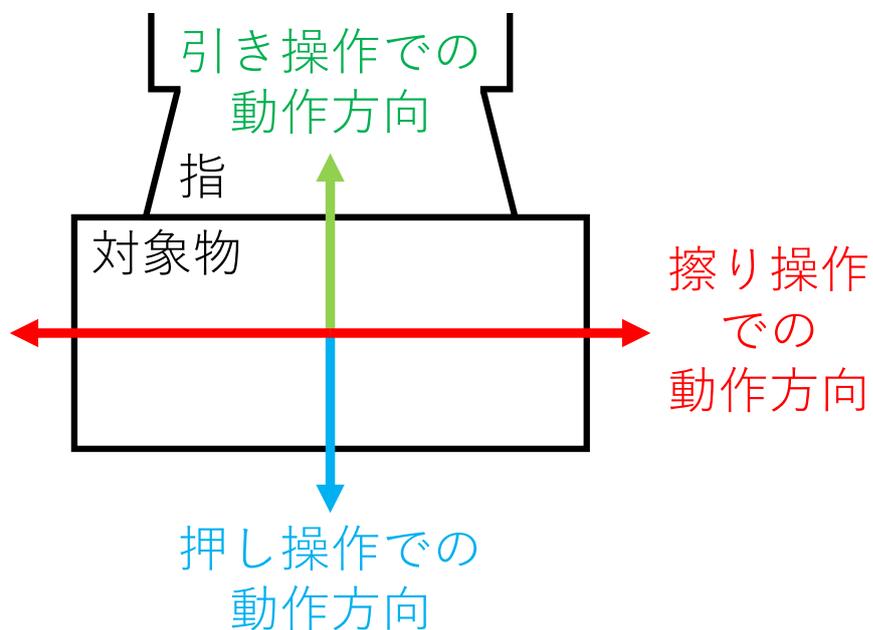


Fig. 2.12: 単指マニピュレーションの分類 .

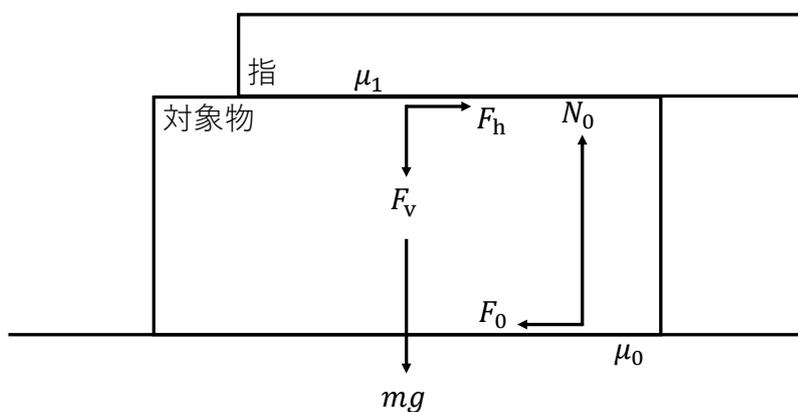


Fig. 2.13: 吸引着を用いない擦り操作の最も簡単なモデル .

ける力を F_v [N], 水平にかける力を F_h [N], 対象物の質量を m [kg], 重力加速度を g [m/s²], 対象物が床から受ける垂直抗力を N_0 [N], 摩擦力を F_0 [N] とすれば, 力の釣り合いは以下

のように表せる．

$$N_0 = F_v + mg \quad (2.1)$$

$$F_0 = F_h \quad (2.2)$$

ここで，対象物が倒れない (N_0 及び F_0 の作用点が接地面から出ない) と仮定すると，擦り操作が成功するのは，指と対象物は滑らないが対象物と床は滑る時である．対象物と床の間の静止摩擦係数を μ_0 ，指と対象物の間の静止摩擦係数を μ_1 とすれば，この条件は以下のよ
うに表せる．

$$F_h \leq \mu_1 F_v \quad (2.3)$$

$$\mu_0 N_0 < F_0 \quad (2.4)$$

以上を整理すると，以下が導ける．

$$\frac{\mu_1}{\mu_0} > 1 + \frac{mg}{F_v} \quad (2.5)$$

((2.5) の右辺) > 1 なので， μ_1 が μ_0 より小さいと操作は必ず失敗することがわかる．また， F_v が大きくなるほど (2.5) の右辺は 1 に近づき操作が成功しやすくなる，つまり指を対象物に強く押し付けるほど操作が成功しやすくなることもわかる．

次に，吸引着を用いた擦り操作の最も簡単なモデルを Fig.2.14 に示す．Fig.2.13 とは異なり，吸引着力 S [N] が存在し，指が能動的に対象物を押さなくとも指と対象物の間に垂直抗力 N_1 [N] が発生するため，この垂直抗力を指が能動的にかける力 F_v として捉えるのは適切ではない．そこで，指が対象物にかかる重力を支えなくてよい時，つまり $N_0 = mg$ の時を F_v の原点とする．すなわち，

$$N_0 = mg + F_v \quad (2.6)$$

$$N_1 = S + F_v \quad (2.7)$$

力の釣り合いは以下のように表せる．

$$N_0 + S = N_1 + mg \quad (2.8)$$

$$F_0 = F_h \quad (2.9)$$

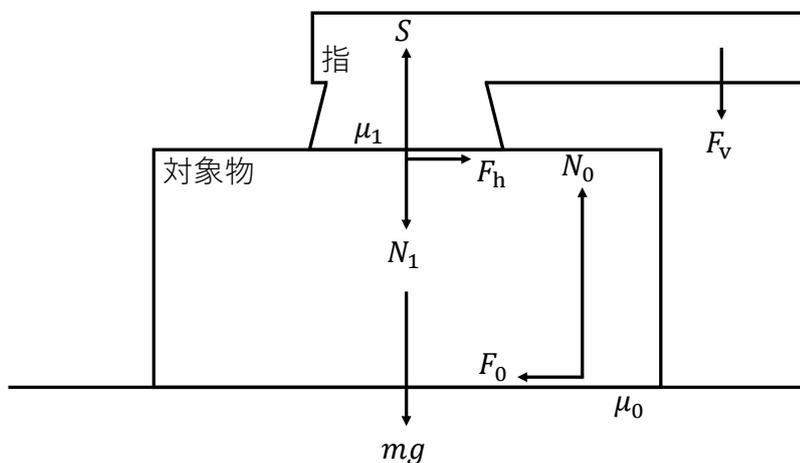


Fig. 2.14: 吸引着を用いた擦り操作の最も簡単なモデル.

擦り操作が成功する条件は以下のように表せる.

$$F_h \leq \mu_1 N_1 \quad (2.10)$$

$$\mu_0 N_0 < F_0 \quad (2.11)$$

以上を整理すると, 以下が導ける.

$$\frac{\mu_1}{\mu_0} > 1 + \frac{mg - S}{F_v + S} \quad (2.12)$$

$0 < F_v < F_v + S$ より, $mg > mg - S > 0$ であっても $mg > 0 \geq mg - S$ であっても $\frac{mg}{F_v} > \frac{mg-S}{F_v+S}$ が成立することから, (2.5) と (2.12) を比較すると, 吸引着を用いた場合の方が $\frac{\mu_1}{\mu_0}$ が小さくても操作が成功する, つまり成功しやすくなっていることがわかる. また, 吸引着を用いた場合, $mg - S > 0$ の時は吸引着を用いない場合と同様, F_v が大きくなるほど操作が成功しやすくなるのに対し, $mg - S < 0$ の時は逆に F_v が小さくなるほど操作が成功しやすくなることがわかる. これらの性質から, 指を強く押し付けなくとも操作が可能となり, 物体が複数積み重なっている状況においても下の物体の滑りを防止できることがわかる.

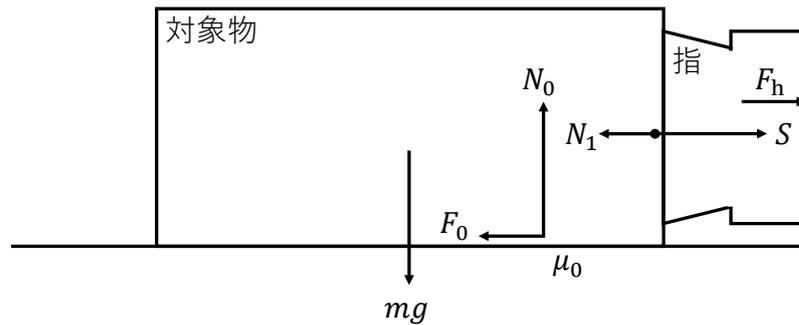


Fig. 2.15: 引き操作の最も簡単なモデル．

引き操作

引き操作は、指と対象物間の引力で対象物を駆動する操作であり、吸引着があって初めて実現可能となる．重力方向上向きに対象物を引くことによる持ち上げが産業用ロボットなどで広く行われている一方で、対象物を床と平行に引くことによって滑らせる操作は行われてこなかったが、倉庫におけるピッキングに関する近年の研究により、この操作の有効性がわかってきた [13, 14]．この操作の最も簡単なモデルを Fig.2.15 に示す．対象物の質量を m [kg]，重力加速度を g [m/s²]，対象物が床から受ける垂直抗力を N_0 [N]，摩擦力を F_0 [N]，対象物が指から受ける垂直抗力を N_1 [N]，吸引着力を S [N] とすれば，対象物に関する力の釣り合いは以下のように表せる．

$$N_0 = mg \quad (2.13)$$

$$F_0 + N_1 = S \quad (2.14)$$

また、ハンドが指を水平方向に引く力を F_h [N] とすると、指に関する水平方向の力の釣り合いは以下ようになる．

$$F_h + N_1 = S \quad (2.15)$$

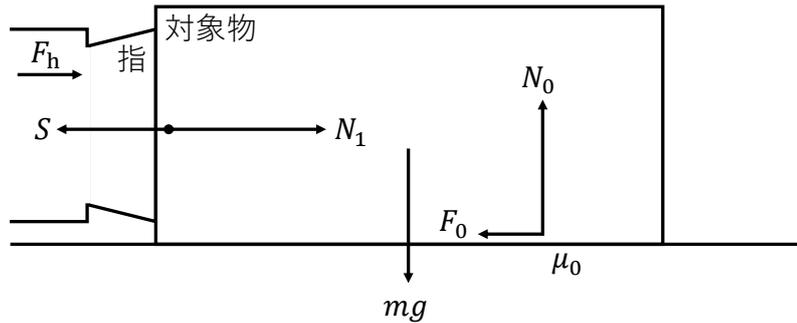


Fig. 2.16: 吸引着を用いた押し操作の最も簡単なモデル.

ここで，対象物が倒れない (N_0 及び F_0 の作用点が接地面から出ない) と仮定すると，引き操作が成功するのは，指と対象物は離れないが対象物と床は滑る時である．対象物と床の間の静止摩擦係数を μ_0 とすれば，この条件は以下のように表せる．

$$N_1 > 0 \quad (2.16)$$

$$F_0 > \mu_0 N_0 \quad (2.17)$$

以上を整理すると，以下が導ける．

$$S > F_h > \mu_0 mg \quad (2.18)$$

持ち上げを成功させるために必要な条件は明らかに $S > mg$ なので，持ち上げと滑らせのどちらが成功しやすいかは， μ_0 の値によって決まることがわかる．

押し操作

吸引着を用いた押し操作の最も簡単なモデルを Fig.2.16 に示す．対象物の質量を m [kg]，重力加速度を g [m/s^2]，対象物が床から受ける垂直抗力を N_0 [N]，摩擦力を F_0 [N]，対象物が指から受ける垂直抗力を N_1 [N]，吸引着力を S [N] とすれば，対象物に関する力の釣り合

いは以下のように表せる．

$$N_0 = mg \quad (2.19)$$

$$N_1 = F_0 + S \quad (2.20)$$

また，ハンドが指を水平方向に押す力を F_h [N] とすると，指に関する水平方向の力の釣り合いは以下ようになる．

$$F_h + S = N_1 \quad (2.21)$$

ここで，対象物が倒れない (N_0 及び F_0 の作用点が接地面から出ない) と仮定すると，押し操作が成功するのは，対象物と床が滑る時である．対象物と床の間の静止摩擦係数を μ_0 とすれば，この条件は以下のように表せる．

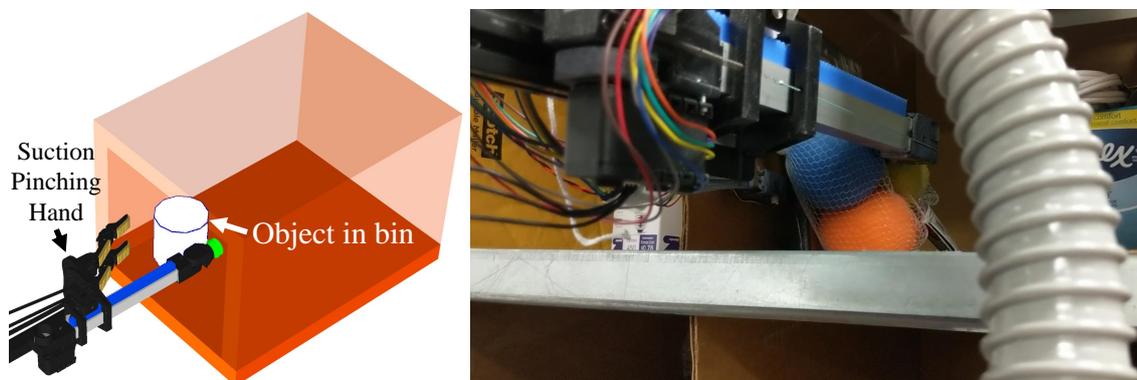
$$F_0 > \mu_0 N_0 \quad (2.22)$$

以上を整理すると，以下が導ける．

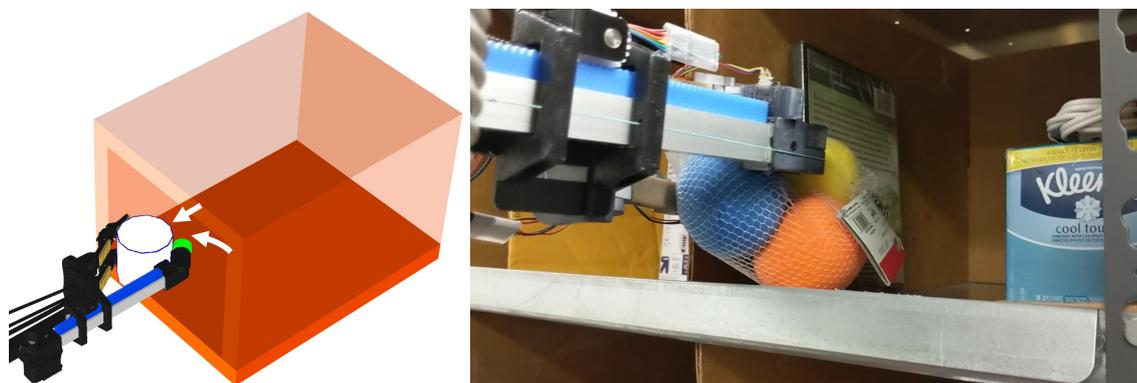
$$F_h > \mu_0 mg \quad (2.23)$$

S が消えたことからわかるように，この条件は吸引着を用いない押し操作の場合と同一である．吸引着のあるなしによって条件に差が出るのは，対象物が倒れる可能性がある場合や，Fig.2.16 のような一次元の操作ではなく二次元以上の操作を考えた場合である．これらの場合で吸引着を用いると，指表面全体が対象物と接している状態を維持するような力のモーメントが，上限付きではあるが自動的に指から対象物に働くため，対象物を指の動きに追従させやすい．逆に，吸引着を用いないと，指の押し付け方によっては指表面全体が対象物と接している状態を維持できなくなるため，対象物の重心や床の摩擦係数分布を考慮しながら押す必要がある．

一方で，単指把握切替マニピュレーションの第一段階として行う押し操作に限定して考えた場合，対象物をハンド掌方向に押し動かさないといけないため，Fig.2.17 のように対象物裏面まで指が回り込まないといけない．この時，対象物と指は長距離に渡り近接することになるため，対象物側面の中で指と近接していない部分は比較的少なくなる．この比較的少ない非近接部分を環境で囲ってしまえば，環境を利用したケーシング [71] 状態となり，物体をある程度拘束しながら動かせるようになるため，吸引着を用いない場合における不利が緩和される．このような操作は，空気吸引におけるメッシュ状物体のような，吸引着が機能しない物体に対して特に有効である．



(a) 指が対象物裏面まで回り込めるように指を伸ばす．指の反対側に環境があれば，対象物は指と環境で囲われた形になり，ある程度拘束される．



(b) 指で押し操作を行って対象物をハンドに収める．

Fig. 2.17: 押し操作による把握への切替マニピュレーション [70]．

2.4.2 単指把握切替マニピュレーションの分類

前節で述べた三種類の単指マニピュレーション，あるいはそれらの混合したマニピュレーションからは様々な把握様式への切り替えが考えられるが，単指マニピュレーションに用いられた単指と，把握への切り替え時に使われるようになった他の指との関係性に注目すると，把握様式は二種類に大別できる．一種類目は単指と他の指が対向して対象物を挟み込む様式であり，二種類目は単指と他の指が対向せず，他の指の間のみで対向関係が成立して対象物を挟み込む様式である．前者を単指他指対向型把握，後者を単指他指非対向型把握と定義する．ここまでの分類を踏まえた単指把握切替マニピュレーションの全体像を Fig.2.18 に示す．押し操作に関しては，掌，もしくは他指の掌に近い部分に対向するような位置の単指が対象物を押してくるため，そこから単指他指対向型把握に切り替えるのが自然である．

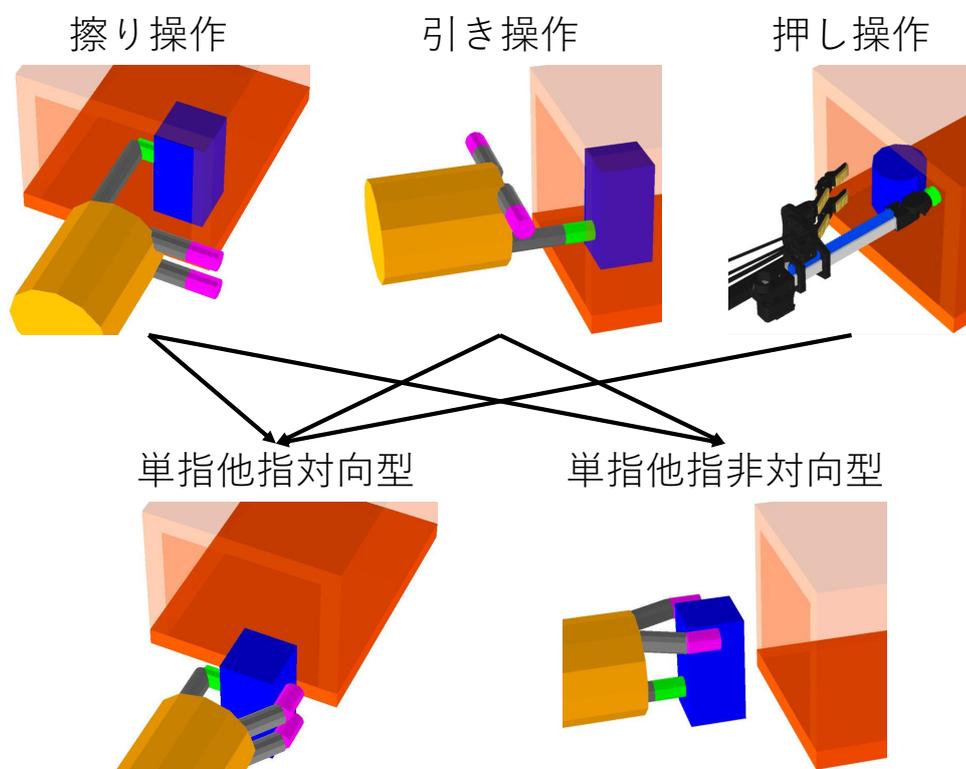


Fig. 2.18: 单指把握切替マニピュレーションの分類 .

第3章

吸引着把握併用ハンドの把持動作安定指標

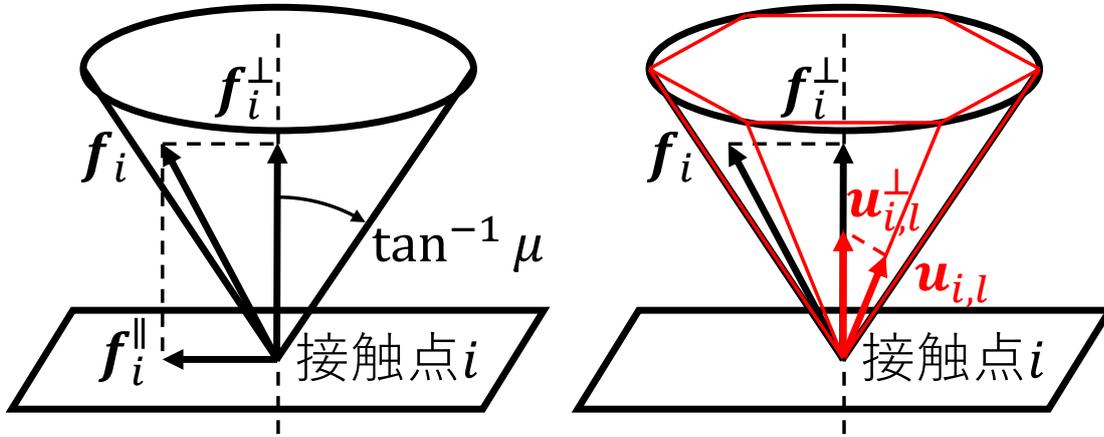
本章では，吸引着把握併用ハンドの把持動作の安定性を評価するための指標について述べる．この指標は，従来は把握力のみを考慮した把持安定指標であったフォースクロージャにおける把持安定余裕を，吸引着力も統一的に考慮できるように拡張したものと，ハンドが物体に順次接触していく期間である把持移行期の安定性を評価する指標によって構成されている．後者は，各接触点が単独で接触した場合に物体がハンドの動作予定範囲から出て把持が失敗してしまうリスクを評価した時のリスクのある接触点の割合として定義される把持移行期リスクである．これらの指標に基づいて把持動作を比較していくことで，目的のマニピュレーションタスクをより安定に実行できる把持動作を選別でき，その把持動作を実行可能な構造として，ハンドを設計することが可能となる．

3.1 従来の把持理論における把持安定指標

3.1.1 フォースクロージャ

ロボットによる物体把持の安定性に関する代表的な概念として，フォームクロージャとフォースクロージャが挙げられる．これらは元々，機構学で提案された概念であり [54]，後にロボットによる物体（剛体）把持に導入された [55]．フォームクロージャとは，摩擦を仮定することなく幾何学的な拘束により，対象物がどのような運動もできない状態にすることである [72]．一方で，フォースクロージャとは，対象物に任意の力・モーメントを加えることができる拘束を与えることであり，拘束には摩擦を用いたものが含まれていてもよい [72]．一般に，三次元空間におけるフォームクロージャを成立させるために必要な接触点の最小点数は7点であるのに対し，フォースクロージャの場合は3点である [72] ため，フォースクロージャが成立すれば安定な把持であるとみなすことで，接触点数を削減することができる．ロボットによる物体把持においては，ハンドと物体の間に摩擦が働く場合が多いため，フォースクロージャが成立しているかどうかを代表的な把持安定指標となってきた．

フォースクロージャの判定において重要となるのが，ハンドと物体との接触点が物体に加えることのできる接触力の範囲を表した摩擦錐である．いま，接触点 i を原点とし，物体表面に平行に x 軸と y 軸を，物体内部向きに z 軸をとった接触座標系で接触力 $f_i = (f_1, f_2, f_3)$ を表すとする．接触点に吸引着性がないとすると，接触点から物体への力は押す方向に限定され， $f_3 \geq 0$ となる．接触力 f_i を物体表面に平行な力 f_i^{\parallel} と垂直な力 f_i^{\perp} に分解すると， $f_i^{\parallel} = (f_1, f_2, 0)$ ， $f_i^{\perp} = (0, 0, f_3)$ と表せるので，クーロン摩擦としてモデル化した摩擦の制約は



(a) 接触点 i における接触力 f_i を制約する静摩擦係数 μ の摩擦錐． f_i は物体表面に平行な錐の頂点を始点とし稜線に沿うベクトル $u_{i,l}$ 力 f_i^{\parallel} と垂直な力 f_i^{\perp} に分解できる． (b) 摩擦錐を近似する正凸多面錐（赤線）．多面錐の頂点を始点とし稜線に沿うベクトル $u_{i,l}$ の錐結合で f_i を表すことができる（(3.3)）．

Fig. 3.1: 摩擦錐とその近似．

以下のようになる．

$$\|f_i^{\parallel}\| \leq \mu \|f_i^{\perp}\| \Leftrightarrow \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3 \quad (3.1)$$

これは、 f_i^{\parallel} が摩擦力であるために成立する関係であり、 μ は静摩擦係数である．以上から、接触力 f_i のとりうるベクトルの集合は以下のように表せる．

$$FC = \left\{ f_i = (f_1, f_2, f_3) \mid \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3, f_3 \geq 0 \right\} \quad (3.2)$$

この式は、接触力 f_i が Fig.3.1a に示すような法線周りの円錐の境界もしくは内部にあることを示している．この円錐が摩擦錐である．ハンドと物体との接触が点接触でモデル化できると仮定すると、フォースクロージャの判定とは、摩擦錐で表される非線形不等式制約を満たす接触力を用いて、対象物に任意の力・モーメントを加えることができるかを判定することになる．ここで、制約が非線形であることが問題となるため、摩擦錐を Fig.3.1b に示すような L 面の正凸多面錐で近似する [73, 74]．多面錐の頂点を始点とし稜線に沿う L 個のベクトルを接触座標系で表したものを $u_{i,1}, u_{i,2}, \dots, u_{i,L}$ とすると、接触座標系で表した接触力 f_i は以下のように表せる．

$$f_i = \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} u_{i,l} \quad (3.3)$$

ただし, $\lambda_{i,l}$ は非負の定数 ($\lambda_{i,l} \geq 0$) である.

ここで, 力 f とモーメント n を一つにまとめたベクトル $w = (f^T, n^T)^T$ をレンチと呼ぶとすると, 接触力 f_i によって対象物座標系原点に生じるレンチを対象物座標系で表した w_i は, 以下のように表せる [75, 72].

$$w_i = G_i f_i = \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} w_{i,l} \quad (3.4)$$

G_i は, 接触座標系で表された接触力 f_i を対象物座標系で表されたレンチ w_i に変換する写像であり, 接触写像 (contact map) と呼ばれる. また, $w_{i,l} = G_i u_{i,l}$ である. なお, 全ての接触点の G_i を並べた行列 $G = (G_1, G_2, \dots, G_I)$ が表す写像は把握写像 (grasp map) と呼ばれ, こちらの方が有名であるが, 本研究では表記の都合上, 接触写像を主に用いる. ハンドが物体に加えられる力・モーメントとは, w_i を全ての接触点について足し合わせた合レンチのことであり, 以下のように表せる.

$$w = \sum_{i=1}^I w_i = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} w_{i,l} \quad (3.5)$$

また, 合レンチ w のとりうるベクトルの集合は以下のように表せる.

$$W = \left\{ w = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} w_{i,l} \mid \lambda_{i,l} \geq 0 \right\} \quad (3.6)$$

W の各要素に負号をつけた集合は把持が耐えられる外力・外モーメント (外レンチ) の集合を表し, 許容外力空間 [74] や許容力集合 [76] などと呼ばれる. フォースクロージャが成立するのは W に任意のレンチが含まれる時, すなわち $W = \mathbb{R}^6$ の時である. これが成立する必要十分条件の中で最も簡単なものは, W の厳密な内部 (境界を含まない内部) にレンチ空間の原点が含まれることであり, 以下のように証明できる.

証明. (必要条件) $W = \mathbb{R}^6$ ならば W の厳密な内部にレンチ空間の原点が含まれることは自明.

(十分条件) W の厳密な内部にレンチ空間の原点が含まれる時, $W \neq \mathbb{R}^6$ と仮定する. 仮定より, W に含まれないベクトル x が存在する. これは, 原点から座標値 x までの有向線分とみなせる. 原点は W の厳密な内部に存在するので, 前述の線分の一部は必ず W 内に存在する. すなわち, $\alpha x \in W$ を満たす α ($0 < \alpha < 1$) が存在する. ここで, (3.6) から,

$$\alpha x = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} w_{i,l} \Leftrightarrow x = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \frac{\lambda_{i,l}}{\alpha} w_{i,l} = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda'_{i,l} w_{i,l} \in W \because \alpha > 0 \quad (3.7)$$

と書ける．よって， x も W に含まれることになって矛盾が生じたので，仮定は誤りであり， $W = \mathbb{R}^6$ である． \square

他の必要十分条件として， W の極が原点のみを含むこと [76] や，把握写像が全射かつ零でない厳密な内力が存在すること [77, 78, 72] など，様々な条件が知られており，フォースクロージャの判定に利用されてきた．

以上の説明は，ハンドと物体との接触が全て点接触であると仮定して行ってきたが，より複雑な接触に関しても，有限個の点接触で代表させられる場合には同じ論理が適用できる．例えば，線接触は両端の二点における点接触で代表させられ，面接触は面の各頂点における点接触の凸和で代表させられる [55]．また，指先が柔軟で押付力によって接触面の形状が変化し，代表させるべき接触点を限定できない場合であっても，接触面によって接触法線周りの摩擦モーメントが働くという特徴を捉え，接触全体として三次元の力と一次元のモーメントが働くと近似するソフトフィンガー接触 [55, 75, 72] も考えられている．この場合，接触力 f_i を，接触法線周りのモーメントも含んだ四次元ベクトルと考え，モーメントに対する制約条件に応じて摩擦錐を拡張すれば，上記と同じ論理が適用できる．

3.1.2 フォースクロージャにおける把持安定余裕

前項の内容により，フォースクロージャな把持を判定してフォースクロージャでない把持より高く評価することは可能になったが，フォースクロージャな把持同士を比較することはできない．一方で，フォースクロージャな把持の中でも，ある外力・外モーメント（外レンチ）に耐えるためには大きな力を物体に加える必要がある把持と，小さな力を加えるだけでよい把持が存在することが多い．なぜなら，フォースクロージャを考える際には，接触力の物体表面に垂直な方向の成分 $\|f_i^\perp\|$ は無限に大きくできるという暗黙の前提を置くことで，問題を単純化していたからである．しかし，実ロボットによる把持においては，関節トルク上限などの制約により，接触力を無限に大きくすることはほぼ不可能であるため，フォースクロージャな把持の評価値を算出・比較し，より良いものを採用することが重要になる．そこで，把持がフォースクロージャかどうかを判定すると同時に，その把持の安定余裕を算出する手法が考案された [79]．

この手法においては，接触力の物体表面垂直方向成分 $\|f_i^\perp\|$ を一定の基準に基づいて正規化することで，異なる把持を比較可能とする．垂直方向成分を対象とするのは，それが把持

の現在状態を維持するために働く力ではなく、ハンドが動こうとしている結果として加わる力、すなわちハンドが能動的に加える力であることが多いからである。この力を揃えると、把持におけるハンドの能動的な作用は同一となり、把持の公平な比較が可能となる。正規化の方法として、二種類の方法が考案された。一つ目は、全接触点における垂直方向成分の和で全ての垂直方向成分を割ることによる正規化である。この正規化に基づく比較は、垂直方向成分の和を一定にした時の比較に相当することを後ほど明らかにする。これは、ハンドが能動的に加える力の和を一定にするということなので、ハンドのモータが消費する総電力に関係した制約である。二つ目は、全接触点における垂直方向成分の最大値で全ての垂直方向成分を割ることによる正規化である。この正規化に基づく比較は、垂直方向成分の最大値を一定にした時の比較に相当することを後ほど明らかにする。これは、ハンドが能動的に加える力を接触点ごとに独立して制約するという事なので、ハンドの各指が独立に全力を出すという条件を表現したものである。全ての垂直方向成分を並べたベクトル $g = (\|f_1^\perp\|, \|f_2^\perp\|, \dots, \|f_I^\perp\|)^\top$ を考えると、一つ目の正規化は g の L_1 ノルムを1にすることであり、二つ目の正規化は g の L_∞ ノルムを1にすることである。そのため、前者は L_1 ノルムの正規化、後者は L_∞ ノルムの正規化と呼べる。

まず、 L_1 ノルムの正規化について考える。Fig.3.1b に示したように、(3.3) における $u_{i,l}$ の物体表面に垂直な成分を $u_{i,l}^\perp$ と置き、 $\|u_{i,l}^\perp\| = 1$ となるように $u_{i,l}$ を取り直す。すると、正規化の結果と (3.3) から、以下が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^I \|f_i^\perp\| = 1 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} = 1 \quad (3.8)$$

この条件を (3.6) に加えて、対象物座標系原点に生じる合レンチの集合は以下のように表せる。

$$W_{L_1} = \left\{ \boldsymbol{w} = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \boldsymbol{w}_{i,l} \mid \lambda_{i,l} \geq 0, \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} = 1 \right\} \quad (3.9)$$

なお、 $\|u_{i,l}^\perp\| = 1$ とした時の $\boldsymbol{w}_{i,l} = \boldsymbol{G}_i \boldsymbol{u}_{i,l}$ は、基本接触レンチ (primitive contact wrench) と呼ばれる [80]。凸包 (convex hull) の定義から、(3.9) は以下のように書き直せる。

$$W_{L_1} = \text{ConvexHull}(\{\boldsymbol{w}_{1,1}, \boldsymbol{w}_{1,2}, \dots, \boldsymbol{w}_{I,L}\}) \quad (3.10)$$

一般的には、 $\{\boldsymbol{w}_{1,1}, \boldsymbol{w}_{1,2}, \dots, \boldsymbol{w}_{I,L}\}$ を、接触点ごとの基本接触レンチ集合の和集合と捉えて、

$$W_{L_1} = \text{ConvexHull} \left(\bigcup_{i=1}^I \{\boldsymbol{w}_{i,1}, \boldsymbol{w}_{i,2}, \dots, \boldsymbol{w}_{i,L}\} \right) \quad (3.11)$$

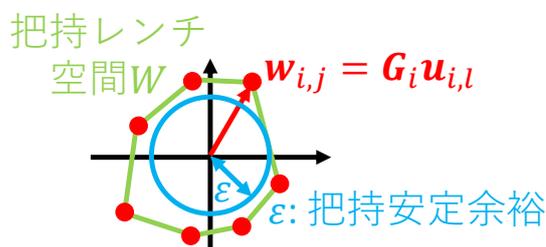


Fig. 3.2: 把持レンチ空間 W とそれに対応する把持安定余裕 ε . W は全ての基本接触レンチ $w_{i,l}$ によって張られる凸包である . W に含まれる原点中心の球の最大半径が ε とみなせる .

と書かれることが多い . 以上のようにして求められた W_{L_1} を , L_1 ノルムの把持レンチ空間 (grasp wrench space) と呼ぶ [81, 82] . フォースクロージャの判定に関しては , 把持がフォースクロージャであることと W_{L_1} の厳密な内部にレンチ空間の原点が含まれることが同値である [77, 79] ことから判定できる . それと同時に , W_{L_1} を用いて把持安定余裕を算出することができる . 対象物座標系原点に加わる一定の大きさの外レンチの集合は , レンチ空間における原点中心の 6 次元球面で表せる . これが W_{L_1} に含まれる時 , その大きさのレンチであればどの方向から加わっても把持は耐えられる . つまり , W_{L_1} に含まれる原点中心の 6 次元球面の中で最大のものが , どの方向から加わっても把持が耐えられるという条件を満たす大きさのレンチの中で最大のものを表し , 球面の半径 ε がその時のレンチの大きさに対応するため , ε を把持安定余裕と定義することができる (Fig.3.2) . また , W_{L_1} の境界と半径 ε の球の接点が表すレンチに負号をつけたものは , 最小の大きさで把持を破壊できるレンチであり , 最悪の外レンチ (worst-case disturbance wrench) と呼ばれる [81] . ここで , ε はレンチのノルム (L_2 ノルム) であるため , 力の数値とモーメントの数値を同様に扱って計算することになるが , この二つは異なる単位を持ち , 大きさが著しく異なる場合があるため , そのまま扱うと一方を過小評価してしまう場合がある . そこで , モーメント側に適当な係数 β ($\beta > 0$) を掛けて単位を力に揃えた上で , 同様に扱う . すなわち , (3.11) における $w_{i,l} = (f^T, n^T)^T$ に対して $w'_{i,l} = (f^T, \beta n^T)^T$ を定義し , $w'_{i,l}$ を $w_{i,l}$ として扱う . このようにしても , W_{L_1} は原点を中心として変形されるのみであり , フォースクロージャの判定に関しては一般性を失わない . β としては , 対象物の各頂点と対象物座標系原点との最大距離 r の逆数が採用される ($\beta = 1/r$) ことが多い [81] . 実装上は , 凸包を計算するためのソフトウェアとして qhull [83] を用いると , 凸包の境界として出力される超平面のオフセットが全て負であればフォースクロージャである . この時 , オフセットの絶対値の最小値が把持安定余裕 ε , 超平面の法線ベ

クトルに負号をつけたものが最悪の外レンチである。

ここで、接触力の物体表面垂直方向成分の和を α 倍 ($\alpha > 0$) することを考える。この時、対象物座標原点に生じる合レンチの集合は、(3.9) を変形して、以下のように表せる。

$$W = \left\{ \mathbf{w} = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \frac{\lambda_{i,l}}{\alpha} \alpha \mathbf{w}_{i,l} \mid \frac{\lambda_{i,l}}{\alpha} \geq 0, \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \frac{\lambda_{i,l}}{\alpha} = 1 \right\} = \text{ConvexHull}(\{\alpha \mathbf{w}_{1,1}, \dots, \alpha \mathbf{w}_{I,L}\}) \quad (3.12)$$

つまり、把持安定余裕 ε も α 倍されるということになるので、任意の二つの把持において、 ε の大小関係は変化しない。よって、垂直方向成分の和を一定にした時の比較結果は、任意の場合において、垂直方向成分の和を正規化した時の比較結果に等しく、和の値に応じた処理は必要ないことがわかる。

次に、 L_∞ ノルムの正規化について考える。 L_1 ノルムの場合と同様、 $\|\mathbf{u}_{i,l}^\perp\| = 1$ となるように $\mathbf{u}_{i,l}$ を取り直す。すると、正規化の結果と (3.3) から、以下が成り立つ。

$$\max_i \|\mathbf{f}_i^\perp\| = 1 \Leftrightarrow \max_i \left(\sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \right) = 1 \quad (3.13)$$

ここで、(3.12) において示したように、合レンチの集合 W には線形性があるため、全ての $\|\mathbf{f}_i^\perp\|$ を小さくすると W は原点を中心として縮小し、元の $\|\mathbf{f}_i^\perp\|$ において発生されたレンチの方向全てに関して、元よりも小さなレンチしか発生させられなくなる。よって、 L_1 ノルムの場合と同様に最悪の外レンチの大きさを評価指標とする場合、全ての $\|\mathbf{f}_i^\perp\|$ が 1 よりも小さい場合を含めても、評価指標に影響はない。したがって、(3.13) を以下の条件に変更しても、一般性を失わない。

$$\|\mathbf{f}_i^\perp\| \leq 1 \Leftrightarrow \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \leq 1 \quad (3.14)$$

この条件を (3.6) に加えて、対象物座標系原点に生じる合レンチの集合は以下のように表せる。

$$W_{L_\infty} = \left\{ \mathbf{w} = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \mathbf{w}_{i,l} \mid \lambda_{i,l} \geq 0, \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \leq 1 \right\} \quad (3.15)$$

ここで、零ベクトル $\mathbf{0}$ と適当な係数 $\lambda_{i,0}$ を導入すると、(3.15) は以下のように書き直せる。

$$W_{L_\infty} = \left\{ \mathbf{w} = \sum_{i=1}^I \left(\lambda_{i,0} \mathbf{0} + \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \mathbf{w}_{i,l} \right) \mid \lambda_{i,l} \geq 0, \sum_{l=0}^L \lambda_{i,l} = 1 \right\} \quad (3.16)$$

凸包とミンコフスキー和 \oplus の定義及びミンコフスキー和と凸包の可換性 [84] から，(3.16) は以下のように書き直せる．

$$W_{L_\infty} = \bigoplus_{i=1}^I \text{ConvexHull}(\{\mathbf{0}, \mathbf{w}_{i,1}, \dots, \mathbf{w}_{i,L}\}) = \text{ConvexHull} \left(\bigoplus_{i=1}^I \{\mathbf{0}, \mathbf{w}_{i,1}, \dots, \mathbf{w}_{i,L}\} \right) \quad (3.17)$$

W_{L_∞} の厳密な内部にレンチ空間の原点が含まれる場合， $\mathbf{0}$ を集合の要素から抜いても W_{L_∞} は変化しないため，以下のように書ける．

$$W_{L_\infty} = \text{ConvexHull} \left(\bigoplus_{i=1}^I \{\mathbf{w}_{i,1}, \dots, \mathbf{w}_{i,L}\} \right) \quad (3.18)$$

(3.17) における W_{L_∞} の厳密な内部にレンチ空間の原点が含まれない場合には，(3.17) の W_{L_∞} と (3.18) の W_{L_∞} は異なってくるが，フォースクロージャの判定に用いる上では違いがなく，一般的には後者の W_{L_∞} が採用されることが多い．以上のようにして求められた W_{L_∞} を， L_∞ ノルムの把持レンチ空間と呼ぶ [81, 82]． $W_{L_1} \subset W_{L_\infty}$ であり，フォースクロージャの判定は W_{L_1} と同様に行うことができる [79]．把持安定余裕 ε も同様に計算でき，その値は L_1 ノルムの場合より大きくなる [79]．また， L_1 ノルムの場合と同様の証明を行うと，垂直方向成分の最大値を一定にした時の比較結果は，任意の場合において，垂直方向成分の最大値を正規化した時の比較結果に等しく，最大値に応じた処理は必要ないことがわかる．

以上で， L_1 ノルムの把持レンチ空間 W_{L_1} と L_∞ ノルムの把持レンチ空間 W_{L_∞} が導入できた．前者の方が算出に必要な計算量が少なく，把持の比較基準（正規化方法）に制約がない場合は前者が採用されてきた． W_{L_1} を主に用いる GraspIt! [81] や OpenRAVE [85] は，非常に広く使われてきた把持計画ソフトウェアである [86]．一方で，実ロボットによる把持における代表的な制約は各関節で独立したトルク上限であり，これとの整合性が高いのは L_∞ ノルムの正規化であるため， W_{L_∞} の計算を高速化するための手法が考えられてきた． W_{L_∞} の部分空間を逐次的に拡張する手法 [87] や摩擦円錐を楕円体で近似する手法 [82] などが挙げられる．さらに正確性を上げるためには，関節トルク空間やハンド構造を陽に考慮して許容外力空間を求める手法 [74] などが必要となり，フォースクロージャの概念からは遠ざかっていく．本研究においては，吸引着把握併用ハンドという新たなハンドを考える上で，その設計指針を与えるような評価指標を構築することを目指す．この場合，具体的なハンドの仕様が決定される前であっても算出可能な指標が望ましい．この観点で考えると，関節トルク空間やハンド構造など，ハンドの詳細な仕様に依存するものを前提とする指標は望ましくないということになる．その点，フォースクロージャにおける把持安定余裕 ε であれば，指モデ

ルのみを物体モデル上に自由に配置することで算出可能であり，安定余裕の高い指配置に基づいてハンドを設計することが可能となる．よって，本研究では，フォースクロージャにおける把持安定余裕 ε を吸引着がある場合にも拡張することを考える．その際，計算量の観点から， L_1 ノルムの正規化を拡張することにする．

3.2 吸引着力を考慮した把持安定余裕

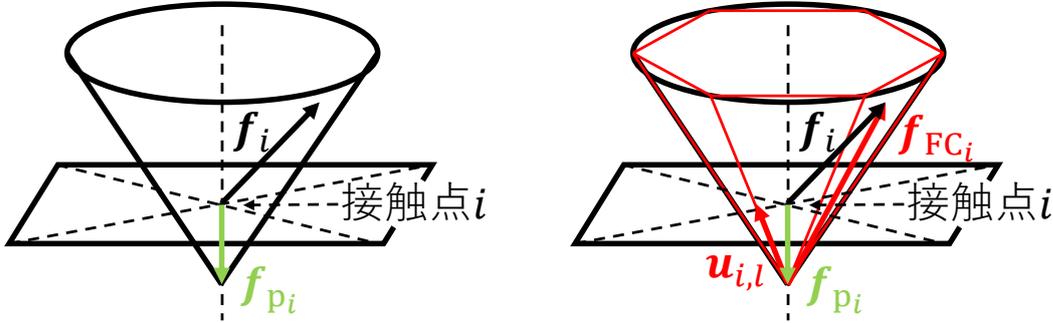
フォースクロージャにおける把持安定余裕を吸引着力がある場合に拡張する上で，最初に変更しなければならないのは摩擦錐のモデリングである．いま，ハンドと物体との接触が点接触でモデル化できると仮定し，接触点の中に吸引着力（pull-off force と呼ばれる [69]）が発生している点が含まれるとする．この場合，接触力の物体表面に垂直な方向の成分が零であっても，それは吸引着力と垂直抗力が釣り合って合力が零となった結果である．摩擦力の上限が比例するのは合力ではなく垂直抗力であるため，接触力の物体表面垂直方向成分が零の時にも摩擦力は発生させられ，その時の上限は垂直抗力の大きさ，すなわち吸引着力の大きさに比例する．これが，吸引着力を考慮しない場合との大きな違いである．吸引着力が発生している接触点 i における吸引着力の大きさを f_p と置き，(3.2) を踏まえると，吸引着力がある場合に接触力 f_i のとりうるベクトルの集合は以下のように表せる．

$$FC = \left\{ f_i = (f_1, f_2, f_3) \mid \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu(f_3 + f_p), f_3 \geq -f_p \right\} \quad (3.19)$$

なお，これは $f_p = 0$ とすれば (3.2) に一致するので，(3.2) を含んだ式である．(3.19) より， f_i の集合は，Fig.3.3a に示すような，摩擦錐の頂点を移動させた円錐として表せる [68, 69]．本研究では，この円錐を頂点転位型摩擦錐と呼ぶ．この円錐も，元の摩擦錐と同様に，Fig.3.3b に示すような L 面の多面錐で近似する．接触力 f_i は吸引着力 f_{p_i} と錐の頂点から伸ばしたベクトル f_{FC_i} に分割することができ，(3.3) と同様にして以下のように表すことができる．

$$f_i = f_{FC_i} + f_{p_i} = \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \mathbf{u}_{i,l} + \lambda_{p_i} \mathbf{u}_{p_i} \quad (3.20)$$

ただし， $\lambda_{i,l}$ と λ_{p_i} は非負の定数 ($\lambda_{i,l} \geq 0, \lambda_{p_i} \geq 0$)， $\mathbf{u}_{i,l}$ は摩擦錐の稜線ベクトル， \mathbf{u}_{p_i} は f_{p_i} と同じ方向に取った単位ベクトルである．(3.20) を (3.4) と同様に対象物座標系原点に生じるレンチに変換し，吸引着力が発生していない接触点もあることを考慮しながら全ての接触点についてレンチを足し合わせると，ハンドが物体に加えられるレンチの集合は以下のよ



(a) 接触点 i において吸引着力 f_{p_i} が発生して (b) 摩擦錐を近似する多面錐 (赤線) . f_i がある場合に, 接触力 f_i を制約する摩擦錐. 接 f_{p_i} と f_{FC_i} に分割でき, f_{FC_i} は $u_{i,l}$ の錐結合触点を内部に含んだ円錐として表せる. で表される ((3.20)).

Fig. 3.3: 頂点転位型摩擦錐とその近似 .

うに表せる .

$$W = \left\{ w = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} w_{i,l} + \sum_{i=1}^R \lambda_{p_i} w_{p_i} \mid \lambda_{i,l} \geq 0, \lambda_{p_i} \geq 0 \right\} \quad (3.21)$$

ただし, 吸引着力が発生している接触点を $i = 1, 2, \dots, R$ ($1 \leq R \leq I$) とした . また, $w_{p_i} = G_i u_{p_i}$ であり, これは吸引着力に関する基本接触レンチである .

以上の説明は, 各接触点において吸引着力が発生すると仮定して行ってきたが, この仮定に沿わない吸引着も存在する . 例えば空気吸引では, 対象物に接触した真空パッド内部の空洞を減圧することによって吸引力を発生させるが, この時吸引力が発生するのは空洞に隣接する (つまりパッドには接触していない) 部分であり, パッドのリップに接触する部分では垂直抗力のみが発生する [88] . しかし, 一般に吸引着力は摩擦力や垂直抗力とは異なり, 力やモーメントの釣り合いに応じて自動的に変化するものではないため, 力やモーメントの釣り合いに関して等価となるように, 予め各接触点に分配した上で考えることができる . 吸引着力以外の力に関しては, 点接触で多くの接触を代表させられることは前述した通りなので, 接触を代表する点に吸引着力を分配することで, 吸引着力の働く複雑な接触に関しても, 上記と同じ論理が適用できる . なお, 本研究ではリップが丸い真空パッドを頻繁に使用するが, この円は正 N 角形で近似することとし, 吸引力 f_{pall} を各頂点に均等に割り振る (f_{pall}/N) こととする .

次に, 吸引着力が働く場合の把持安定余裕を考えるため, ハンドが能動的に加える力の正

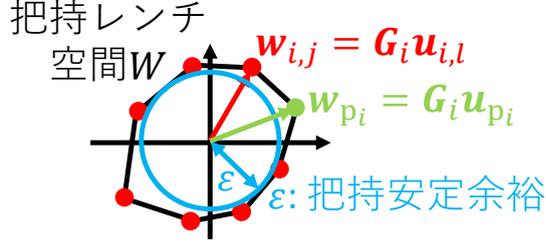


Fig. 3.4: 吸引着力が発生している場合の把持レンチ空間 W とそれに対応する把持安定余裕 ε . W は, 吸引着力がない場合の全ての基本接触レンチ $w_{i,l}$ と吸引着力に関する全ての基本接触レンチ w_{p_i} によって張られる凸包である . W に含まれる原点中心の球の最大半径が ε とみなせる .

規化を考える . この時 , 吸引着力もハンドが能動的に加える力であるため , これを含めて正規化する必要がある . ここで , L_1 ノルムの正規化に相当するもの考えると , 吸引着力の大きさ $\|f_{p_i}\|$ と , 接触力 f_i から f_{p_i} を引いた f_{FC_i} の物体表面垂直方向成分 $\|f_{FC_i}^\perp\|$ の和を 1 とするものが相当するとみなせる . 前節と同様に , $\|u_{i,l}^\perp\| = 1$ となるように $u_{i,l}$ を取り直すと , 正規化の結果と (3.3) , (3.20) , u_{p_i} の定義及び (3.21) における R の定義から , 以下が成り立つ .

$$\sum_{i=1}^I \|f_{FC_i}^\perp\| + \sum_{i=1}^R \|f_{p_i}\| = 1 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} + \sum_{i=1}^R \lambda_{p_i} = 1 \quad (3.22)$$

この条件を (3.21) に加えて , 対象物座標系原点に生じる合レンチの集合は以下のように表せる .

$$W_{L_1} = \left\{ \mathbf{w} = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} \mathbf{w}_{i,l} + \sum_{i=1}^R \lambda_{p_i} \mathbf{w}_{p_i} \mid \lambda_{i,l} \geq 0, \lambda_{p_i} \geq 0, \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} + \sum_{i=1}^R \lambda_{p_i} = 1 \right\} \quad (3.23)$$

凸包の定義から , (3.23) は以下のように書き直せる .

$$W_{L_1} = \text{ConvexHull}(\{\mathbf{w}_{1,1}, \mathbf{w}_{1,2}, \dots, \mathbf{w}_{I,L}, \mathbf{w}_{p_1}, \mathbf{w}_{p_2}, \dots, \mathbf{w}_{p_R}\}) \quad (3.24)$$

以上から , L_1 ノルムの把持レンチ空間 W_{L_1} が構築でき , 吸引着力が働かない場合と同様に , W_{L_1} に収まる原点中心の球の最大半径 ε が把持安定余裕と定義できる (Fig.3.4) . 最終的には , 吸引着力が働く場合の W_{L_1} とは , 吸引着力が働かない場合の W_{L_1} の生成元に , 吸引着力由来の生成元を加えて生成されたものに帰着された .

3.3 吸引着力を考慮した把持安定余裕に基づく把持比較例

前節で導入した把持安定余裕 ε を用い、物体モデルに指モデルを配置することで表現した把持例の比較を行う。力の単位は N、モーメントの単位は Nm とした。摩擦錐を近似する多面錐の面数は、GraspIt! [81] に倣って $L = 8$ とした。真空パッドのリップの円の直径は 30 mm とし、正 8 角形で近似した。摩擦係数は $\mu = 0.5$ とした。これは、ゴムとゴムの間の摩擦係数として知られる値である [72]。吸引着性のない指の表面は 20 mm 四方の正方形とし、その四つの頂点で接触を代表させた。ここで、ソフトフィンガー接触を用いなかったのは、摩擦モーメントの計算に必要なねじり摩擦係数が接触面の形状に強く依存しており [89]、確からしい値が見つからなかったからである。以上の条件の下で、一辺 100 mm の立方体に対して構成した把持を比較した。

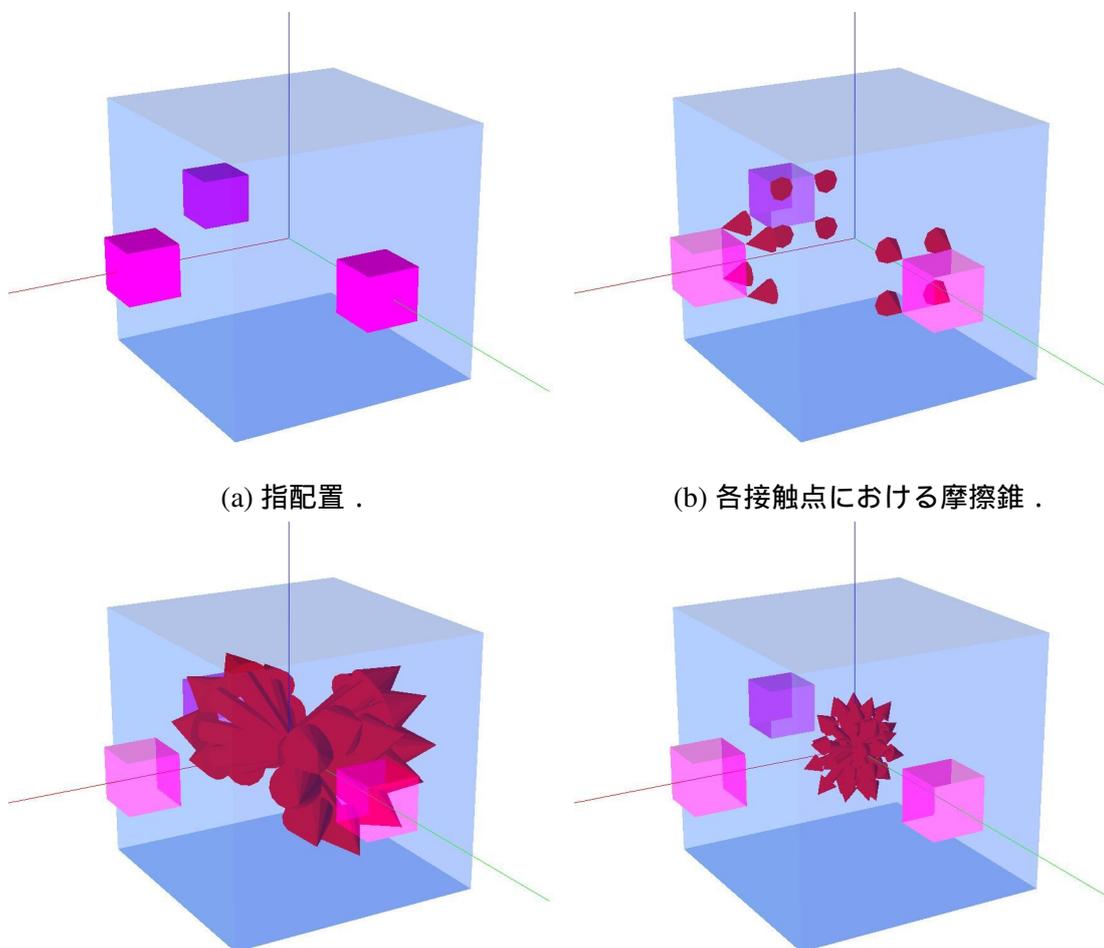
把持の例として、以下を用意した。

1. 吸引着性のない指三本を対向する面を含んだ別々の面の中央に配置した場合
2. 例 1 における中央の指を真空パッドに置き換えた場合
3. 吸引着性のない指三本を二本と一本に分けて対向する面に配置した場合
4. 例 3 における孤立した指を真空パッドに置き換えた場合

Figs.3.5-3.8 に、各例における指配置・摩擦錐・把持レンチ空間を力の三次元空間に射影したもの・モーメントの三次元空間に射影したものを示す。計算の結果、例 1 では $\varepsilon = 0.16501$ 、例 2 では $\varepsilon = 0.217797$ 、例 3 では $\varepsilon = 0.184178$ 、例 4 では $\varepsilon = 0.186688$ となった。吸引着が加わることによって安定余裕が上昇することがわかり、例 1 から 2 への変化のように上昇度が高い把持がある一方で、例 3 から 4 への変化のように上昇度が非常に小さい把持もあることがわかる。すなわち、把持によって吸引着の必要性は変わってくることがわかる。

3.4 把持移行期安定指標としての把持移行期リスク

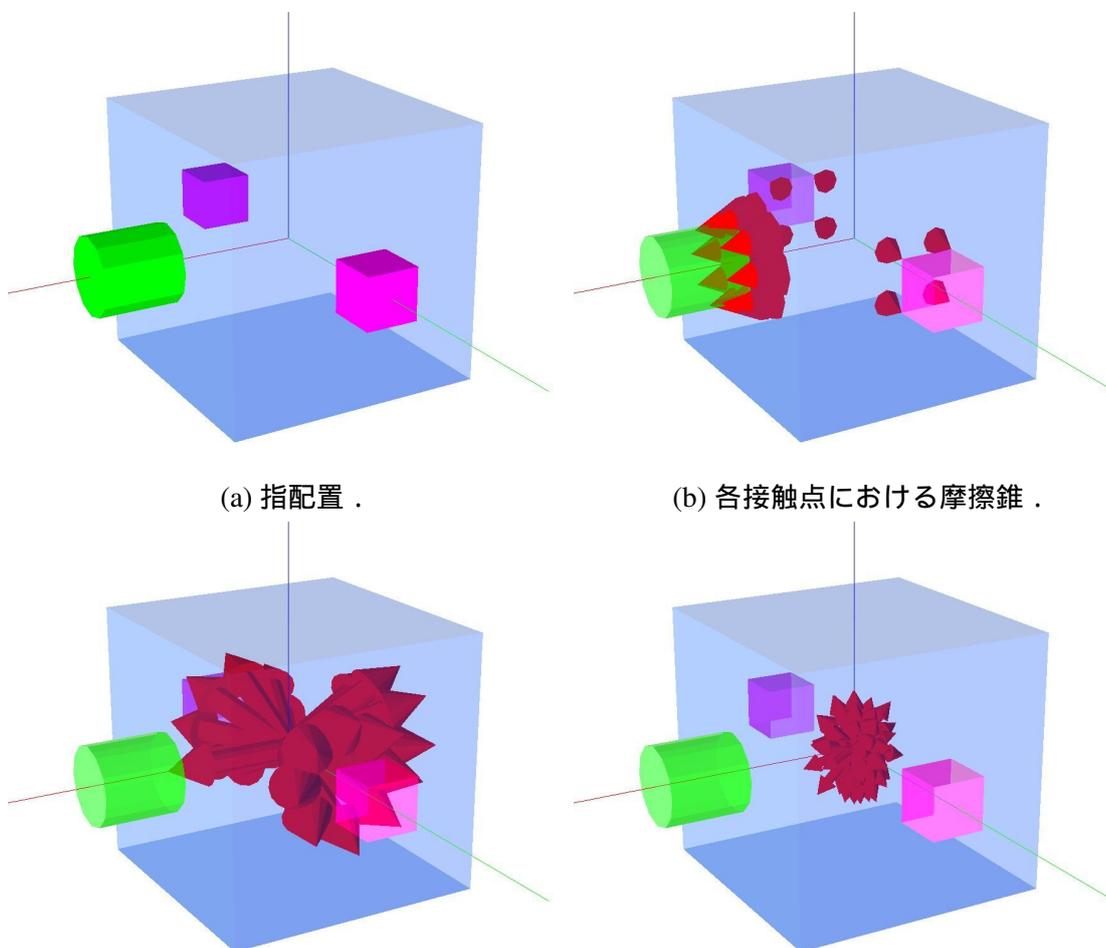
前節における把持比較においては、Fig.3.8 の把持よりも Fig.3.6 の把持の方が安定していることがわかったが、把持を成立させるまでの過程に関しても同様のことが言えるかということ、必ずしもそうとは言い切れない。Fig.3.8 の把持においては、全ての指が対向しているため、把持動作において先に接触した指があったとしても、その接触によって物体が動きうる



(a) 指配置 . (b) 各接触点における摩擦錐 . (c) 基本接触レンチを力の三次元空間に射影 (d) 基本接触レンチをモーメントの三次元空間に射影したベクトル . これらの凸包が把持レンチ空間に射影したベクトル . これらの凸包が把持間の射影となる .

Fig. 3.5: 吸引着性のない指三本を対向する面を含んだ別々の面の中央に配置した場合 ($\varepsilon = 0.16501$) . 青い立方体が物体を, マゼンタの立方体が吸引着性のない指を, 赤い錐が摩擦錐を, 赤い矢印がベクトルを表す .

方向は他の指の方向であり, 把持に大きな影響はない . 一方で, Fig.3.6 の把持においては, 把持動作において真空パッドが先に接触し, 接触した瞬間に吸引が成立しなかった場合, その接触によって物体が動きうる方向には指はなく, 実世界認識や動作制御の誤差によって物体が大きく動いてしまった場合, 物体はハンド内から出てしまう . 特に吸引着を用いている場合は, その物体を挟んで向かい側に指を配置していないことが多く, 吸引着が失敗した時



(a) 指配置 . (b) 各接触点における摩擦錐 .
 (c) 基本接触レンチを力の三次元空間に射影 (d) 基本接触レンチをモーメントの三次元空間に射影したベクトル . これらの凸包が把持レンチ空間に射影したベクトル . これらの凸包が把持間の射影となる .

Fig. 3.6: Fig.3.5 における中央の指を真空パッドに置き換えた場合 ($\varepsilon = 0.217797$) . 青い立方体が物体を, マゼンタの立方体が吸引着性のない指を, 緑の円柱が真空パッドを, 赤い錐が摩擦錐を, 赤い矢印がベクトルを表す .

のリスクは高い . つまり, 前節までは把持が成功した時の評価指標を考えてきたのに対し, 把持が成立するまでの間には, 第2章で述べたように, 予定されている接触の一部しか実現していない把持移行期が存在し, その期間におけるリスク評価も考える必要がある . 本研究では, これを把持移行期リスクと呼び, 把持安定余裕と合わせて把持動作安定指標を形成するものとする .

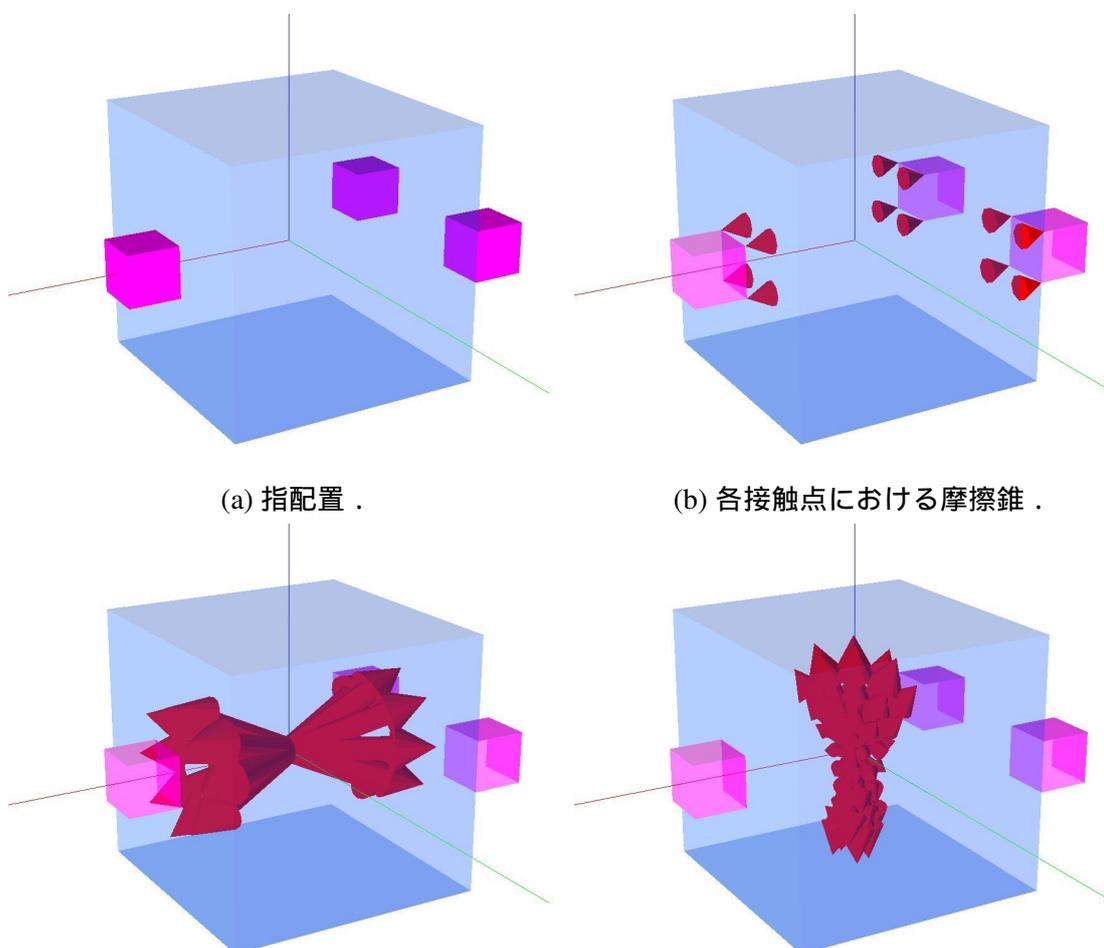
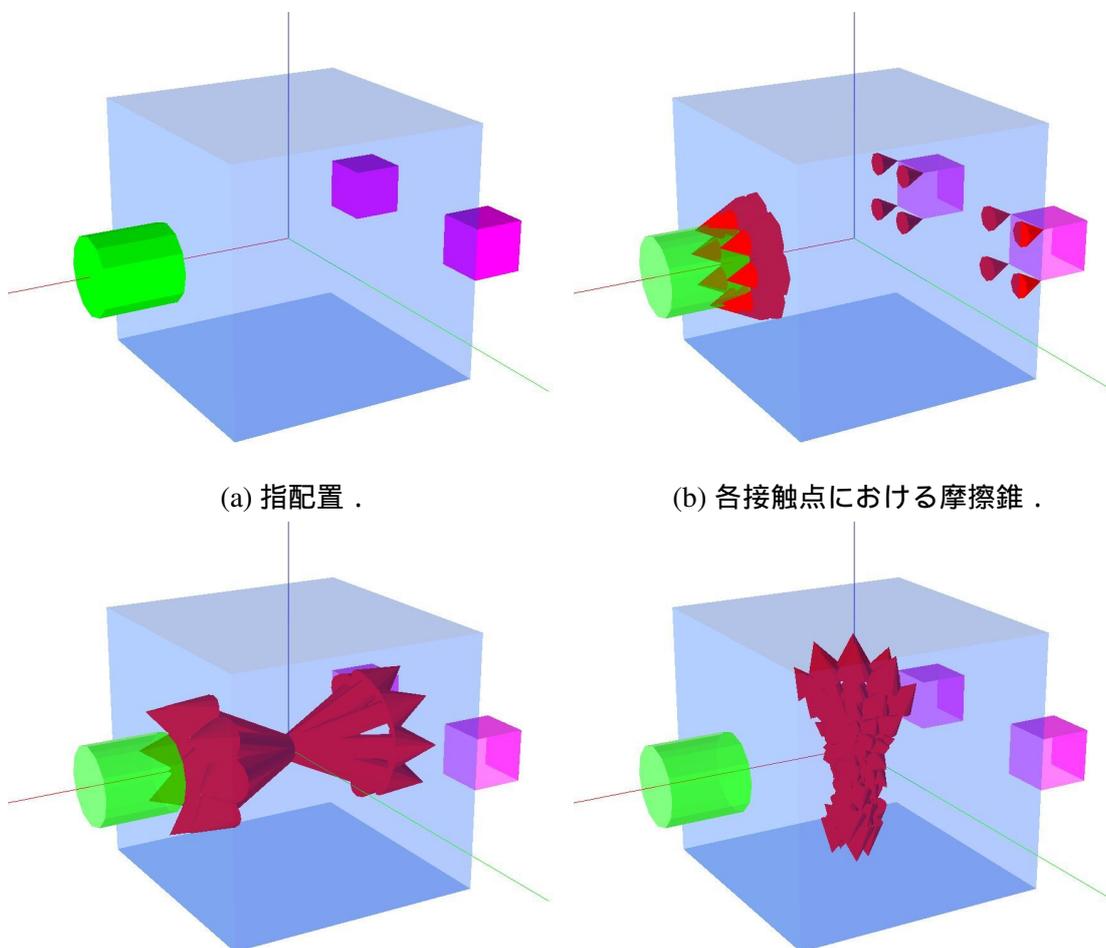


Fig. 3.7: 吸引着性のない指三本を二本と一本に分けて対向する面に配置した場合 ($\varepsilon = 0.184178$) . 青い立方体が物体を, マゼンタの立方体が吸引着性のない指を, 赤い錐が摩擦錐を, 赤い矢印がベクトルを表す .

従来, このような把持移行期リスクに対しては, 把持失敗の兆候を把持動作中にオンラインで検出して動作を修正することで, リスクが高い動作でも実行可能とする方向で対処がなされてきた. 把持失敗の兆候としては, 指と物体の間の距離が指によって異なること [26] や, 指の腹ではなく背や側面が接触していること [2, 28], 指一本のみが接触していること [2, 25, 27, 28], 接触点が指の腹の中央にないこと [28], 物体を握った時の指の姿勢同士



(a) 指配置 . (b) 各接触点における摩擦錐 .
 (c) 基本接触レンチを力の三次元空間に射影 (d) 基本接触レンチをモーメントの三次元空間に射影したベクトル . これらの凸包が把持レンチ空間に射影したベクトル . これらの凸包が把持間の射影となる .

Fig. 3.8: Fig.3.7 における孤立した指を真空パッドに置き換えた場合 ($\varepsilon = 0.186688$) . 青い立方体が物体を , マゼンタの立方体が吸引着性のない指を , 緑の円柱が真空パッドを , 赤い錐が摩擦錐を , 赤い矢印がベクトルを表す .

が対称的でないこと [25] , 接触面同士が平行でないこと [25] などが考慮されてきた . 把持失敗の兆候を検出するセンサとしては , 近接覚センサ [26] や力覚センサ [25] , 接触センサ [2, 25, 27, 28] が用いられてきた . しかし本来は , このようなオンライン動作修正のみに頼るのではなく , 把持動作を設計・選択する段階において把持移行期リスクを考慮し , リスクの高い把持動作を判定して回避することで , 把持動作の安定性をより高めることができるは

ずであり，本研究はその概念を具体化したものである．また，特に吸引着を用いる場合，オンライン動作修正には問題がある．オンライン動作修正の基本は，指と物体の接触状態が意図したものでない場合に過剰な指の押し付けを回避することであるが，その指が吸引着をすることになっていた場合，吸引着が成立していない状態で押し付けが止まると吸引着は機能しないままとなり，計画した把持状態が実現されないままになってしまう．ゆえに，そのような危険がある把持を回避するため，動作前に把持移行期リスクを考慮することが一層重要となる．

把持移行期リスクを定式化する上で，環境を利用したケーシングの理論 [71] を参照する．ケーシングとは，物体を一定領域内に幾何学的に閉じ込め，物体の移動可能な領域を制限することであり [90, 71]，閉じ込めにロボットの体だけでなく環境も使うのが，環境を利用したケーシングである．把持移行期に物体がハンド内から出ないようにすることは，把持移行期における物体の動きを一定領域内に収めるということであり，ケーシングを成立させる必要までではないものの，ケーシングに近い概念である．また，Fig.3.6 の把持において真空パッドの反対側に壁があれば，物体を押しつけてしまっても壁に押し付けられるだけであり，物体がハンド内から出ることがなくなることからわかるように，環境の利用まで考えることが重要である．

まず，環境を利用したケーシングの成立条件 [71] を，ハンドの場合に書き直して述べる．物体のコンフィギュレーション空間を C ，物体の実空間での占有領域を A_{obj} ，ハンドの実空間での占有領域を A_{hand} ，物体の現在のコンフィギュレーションを q_{obj} ，ハンドの現在のコンフィギュレーションを q_{hand} とおくと，物体がハンドと干渉するために進入することのできない領域であるコンフィギュレーション障害物領域 $C_{\text{cls_hand}}$ は，以下のように表せる．

$$C_{\text{cls_hand}} = \{q \in C \mid A_{\text{obj}}(q) \cap A_{\text{hand}}(q_{\text{hand}}) \neq \emptyset\} \quad (3.25)$$

環境の実空間での占有領域を E とおくと，環境についてもコンフィギュレーション障害物領域 $C_{\text{cls_env}}$ が考えられる．

$$C_{\text{cls_env}} = \{q \in C \mid A_{\text{obj}}(q) \cap E \neq \emptyset\} \quad (3.26)$$

全体としてのコンフィギュレーション障害物領域 C_{cls} は以下のようになる．

$$C_{\text{cls}} = C_{\text{cls_hand}} \cup C_{\text{cls_env}} \quad (3.27)$$

物体がハンドや環境と干渉することなく取りうるコンフィギュレーション自由領域 C_{free} は、 C_{cls} の補集合として以下ようになる。

$$C_{\text{free}} = C \setminus C_{\text{cls}} = (C \setminus C_{\text{cls_hand}}) \setminus C_{\text{cls_env}} \quad (3.28)$$

ここで、物体のコンフィギュレーション q_A と q_B が C_{free} 内の経路で接続できる時のみ真、それ以外は偽を返す関数 $\text{connected}(q_A, q_B)$ を定義する。 C_{free} の内、物体が現在のコンフィギュレーション q_{obj} から移動しうるコンフィギュレーションの集合 $C_{\text{free_obj}}$ は以下ようになる。

$$C_{\text{free_obj}} = \{q \in C_{\text{free}} \mid \text{connected}(q, q_{\text{obj}})\} \quad (3.29)$$

また、 C における無限遠点の集合を Q_{inf} とすると、物体が無限遠方に逃げることができてケージングが成立しないコンフィギュレーションの集合 $C_{\text{free_inf}}$ は以下ようになる。

$$C_{\text{free_inf}} = \{q \in C_{\text{free}} \mid \exists q_{\text{inf}} \in Q_{\text{inf}}, \text{connected}(q, q_{\text{inf}})\} \quad (3.30)$$

物体のケージングが成立する条件は以下ようになる。

$$\begin{cases} C_{\text{free_obj}} \neq \emptyset \\ C_{\text{free_obj}} \cap C_{\text{free_inf}} = \emptyset \end{cases} \quad (3.31)$$

以上を把持移行期リスクの評価に拡張するために必要なのが、 $C_{\text{free_obj}}$ の変更である。いま、ハンドと物体との接触点 i が、他の接触点に先駆けて物体に接触した場合を考え、この時の把持移行期リスクを評価することを考える。この時、接触を原因とする物体の動きによる失敗を考えるため、その動きの範囲内において、物体が現在のコンフィギュレーションから移動しうるコンフィギュレーションを考えればよい。これを表現するため、 connected 関数に着目する。新たな関数として、物体のコンフィギュレーション q_A と q_B が C_{free} 内の経路で接続でき、かつその経路が接触を原因とする動きの範囲内にある時のみ真を返す関数 $\text{connected_contact}(q_A, q_B)$ を定義する。これを用いて、物体が現在のコンフィギュレーション q_{obj} から接触を原因として移動しうるコンフィギュレーションの集合 $C_{\text{free_obj_contact}}$ は以下ようになる。

$$C_{\text{free_obj_contact}} = \{q \in C_{\text{free}} \mid \text{connected_contact}(q, q_{\text{obj}})\} \quad (3.32)$$

(3.31) は以下のように書き直せる。

$$\begin{cases} C_{\text{free_obj_contact}} \neq \emptyset \\ C_{\text{free_obj_contact}} \cap C_{\text{free_inf}} = \emptyset \end{cases} \quad (3.33)$$

これは、把持移行期のリスクがないことの必要条件であり、この条件が満たされない場合、リスクがあると速やかに判定できる。例えば、障害物のない床の上の物体を水平に押した場合、床と物体との動摩擦力を不確実なため無視すれば、これは押した方向に無限に動くことになり、その方向に別の指がなければ、把持移行期のリスクがあると判定できる。一方で、この条件を満たしていても、把持移行期のリスクがある場合もある。例えば、物体が床に倒れてハンド内から出てしまった場合、物体は無限遠までは動かないため $C_{\text{free_obj_contact}} \cap C_{\text{free_inf}} = \emptyset$ である。この場合は、接触後に物体が静止した時のコンフィギュレーションを $q_{\text{obj_rest}}$ とし、その後の把持動作においてハンドが取るコンフィギュレーションの集合を $Q_{\text{hand_future}}$ とし、以下の条件を満たせばリスクがないと判断できる。

$$A_{\text{obj}}(q_{\text{obj_rest}}) \cap \left(\bigcup_{q \in Q_{\text{hand_future}}} A_{\text{hand}}(q) \right) \neq \emptyset \quad (3.34)$$

本研究では、接触点における物体表面の法線方向に物体が押されるとし、床と物体との動摩擦力を不確実なため無視して、以上のリスク評価を全ての接触点に対して行う。その上で、リスクがあると評価された接触点の数を接触点の総数で割った数値を把持移行期リスク r とし、把持過程の安定指標とする。この値が大きいほどリスクが高く、安定性が低いと評価されていることを意味する。

第4章

吸引着把握併用ハンドの動作構造同時設計論

本章では、狭隘空間で活用できるハンドの構造は簡潔かつ安定な把持動作が可能なものとして実現する必要があることから、物体を壁に押し付けて吸引着する動作のような安定な動作を把持移行期リスクに基づいて判定し、それが機能しない場合の代替動作や吸引着成立後の把持安定余裕に基づく把握の併用による安定性強化法まで含めて考慮して、望ましいハンド動作群とそれらが可能なハンド構造を同時に設計する設計論を、具体的な狭隘空間タスクである倉庫物品棚ピッキング・ストーイングを題材に提案する。提案した設計論に基づき、倉庫物品棚ピッキング・ストーイングのためのハンドの動作と構造を導出するとともに、壁に押し付けて吸引着する動作とその後の把握による把持安定化という提案手法が壁との相対姿勢によらず機能する物体の条件を求め、提案する設計論の有用性を示す。また、狭隘空間だけでなく非剛体物体への応用として、本のような可変形状物体に対して、少数の剛体の連結体とみなして把持移行期リスクを適用することによる把持動作選定法を示し、変形を矯正可能で収納まで実現しやすい把持を可能とするハンドの動作と構造の設計に繋げる。さらに、少数の剛体の連結体とはみなせない実態を持つ物体として、紙のような薄く脆弱な物体に対して、引き込みによる損傷を発生させうる吸引に代わって力が均一な吸着を活用するハンドの構造を示す。

4.1 構造設計論と動作構造同時設計論

これまでのハンド研究において、汎用的な設計論として捉えられる概念の中で頻りに用いられるものは、人間の構造や動作を模倣してハンドを設計するというものである。この設計論においては、ハンドが行うべき動作は人間の構造を模倣した結果自然と出てくるものであるか、既に決まっているために設計の必要がない。このような設計論を、動作構造同時設計論と対比して構造設計論と定義する。人間の構造を模倣する設計としては、指の本数を同じにするもの [57] から始まり、拇指の動きと配置・指のリンク長の比・掌の形状を人間に似せるもの [91] や、各指根本の二関節の回転軸を直交させるもの [92]、人工筋肉を用いるもの [93]、背側骨間筋を模倣するもの [94] などが行われてきた。人間の動作を模倣する設計としては、把握姿勢の主成分をコンプライアンス付きで再現するもの [95] などが行われてきた。これらの設計においては人間が規範となるため、人間の動作のみを再現可能である。ここで、人間の皮膚は汗や水で適度に湿ると吸着力を生じ [96]、人間はこれを紙めくりなどに活用しているため、接触と吸着のみが用いられる動作であれば原理的には構造設計論で対

応可能である。しかし、人間の手には吸引機能まではないため、吸引を含めようとする構造設計論では対応困難となる。そのため、動作構造同時設計論が必要となる。

これまでのハンド研究の中で動作構造同時設計論と同種の設計論が取られていると考えられるものとしては、DARPA Autonomous Robotic Manipulation (ARM) Program [97] の ARM-H 用に作られたハンド [65] が挙げられる。このハンドの設計においては、ARM-H において要求されたタスクを全て実行することが目的とされ、そのために必要な複数の把握プリミティブとそれが可能なハンドが考え出された。各プリミティブには人間の把握の分類にある名称が使われているが、これはハンドと把握対象物との接触点の位置及び数を明示することが主な目的であり、人間の動作を再現しようとするものではないと述べられている。しかし、どのようにして必要な把握プリミティブとそれに対応したハンドを設計したのかということについては、最低限の指数として三指に設定したということ以外述べられていない。本研究は、このようにこれまで曖昧にされてきた設計論について説明を試みるものでもある。

4.2 剛体近似に基づいた狭隘空間におけるピッキング

4.2.1 把持移行期リスクを用いた動作構造同時設計論

倉庫における物品棚では、物品が棚のピンという狭隘空間に置かれており、その物品の取り出しの自動化が求められている [16]。この環境を、Fig.4.1 のようにモデル化し、この環境において、吸引着を用いた物体の把持動作を考える。第2章で述べたように、一般的な吸引着は物体表面の平坦な領域に対して実行されるため、Fig.4.2 (a) のような物体側面を吸引着する把持動作と Fig.4.2 (c) のような物体正面を吸引着する把持動作が同等のものとして扱われる。これらの把持動作に対して、前章で定義した把持移行期リスク r を考える。ピンの奥行きが深く、床と物体との動摩擦力を不確実なため無視するとすると、物体正面からの接触によって物体は奥に無限に動きうるが、これを阻止できる障害物も指もない。つまり、(3.33) が満たされず、その接触点はリスクがあると判定される。吸引着性のある指を真空パッドだとして正8角形で近似すると接触点は8個であるため、Fig.4.2 (c) のような把持動作の把持移行期リスクは $r = 8/8 = 1$ となる。これに対し、Fig.4.2 (a) のように物体側面から接触すると、接触による物体の動きは壁までに制限されるため、物体を壁に押し付けるような把持動作とすることで、全接触点において (3.33) と (3.34) が満たされ、把持移行期リスクは $r = 0/8 = 0$ となる。よって、把持移行期リスクの観点からは、可能な限り Fig.4.2 (a) の動作

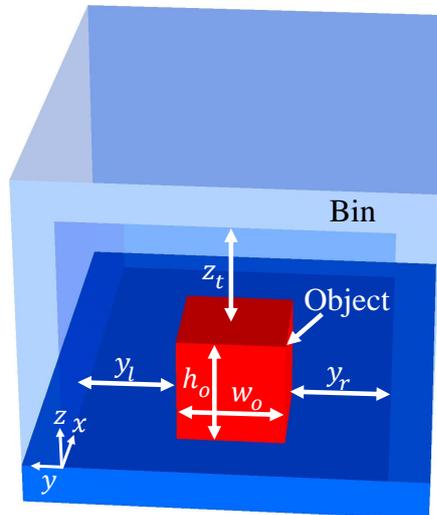


Fig. 4.1: ビン内に対象物が入っている様子 [98].

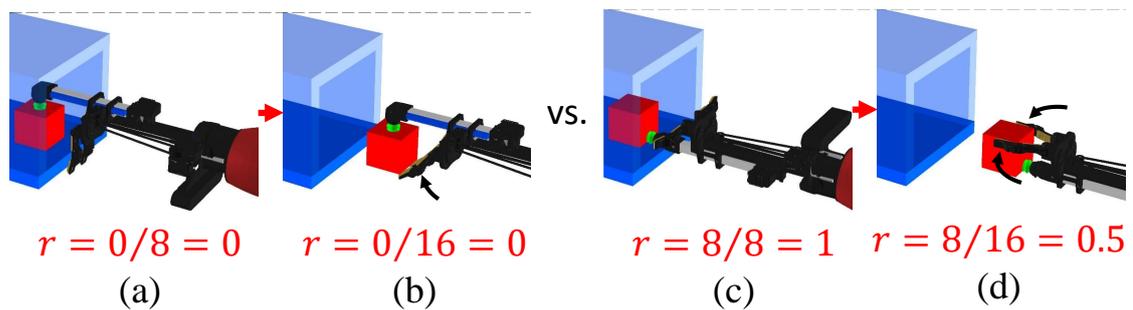


Fig. 4.2: 狭隘空間における吸引着把持動作とその後の把握における把持移行期リスク r

を実行すべきであることがわかる．一方で，Fig.4.2 (a) では吸引着性のある指を壁と物体の間に差し込まねばならないが，物体が大きい場合は差し込めないと考えられる．このような場合のために，Fig.4.2 (c) のような動作も行えるよう，ハンド構造を設計しなければならないという指針が得られる．

また，吸引着後に物体の一部を狭隘空間から引き出した上で把握を併用する動作についても考えると，Fig.4.2 (a) の動作の後であれば Fig.4.2 (b) のように，物体を吸引着した指とその他の指が対向するような把持動作を，指が壁と接触しないように狭隘空間から引き出した物体部分にのみ接触させたとしても実行することができる．把握を行う指として，吸引着性のない指二本を想定し，それぞれの接触面を四角形とすると，それぞれの接触点は4個とで

きるため、その把持動作の把持移行期リスクは $r = 0/(8 + 4 + 4) = 0$ となり、リスクの観点からは望ましい把持動作となる。このように、把持移行期が安定な吸引着把握併用を行える点も、Fig.4.2 (a) の動作の優れた点であることがわかる。一方で、Fig.4.2 (c) の動作の後では、同様の接触制限の下だと、Fig.4.2 (d) のような、物体を吸引着した指とその他の指が対向しない把持動作しか行えない。この場合、把持移行期リスクは $r = 8/(8 + 4 + 4) = 0.5$ となり、リスクの観点からは Fig.4.2 (b) の動作に劣ることになる。

4.2.2 吸引着力を考慮した把持安定余裕を用いた動作構造同時設計論

前章で述べた、吸引着力を考慮した把持安定余裕を用いて、吸引着後の把握の併用に関する動作構造同時設計を行う。ここでは、3.3 節で用いたパラメータと対象物を再び用い、様々な把持を比較することで、設計指針を構築する。総当たりによる比較・分析を可能とするため、対象物である立方体の各面に配置できる指の数を一個に制限し、その位置を面中央に限定する。この条件の下では、Fig.4.3 に示す9種類の指配置が考えられ、各指を真空パッドにするかしないかに応じて、さらに把持が分化する。それぞれの指配置に対して、全ての指を吸引着性のない指にした場合と真空パッドにした場合の把持安定余裕 ε を算出した。また、指との接触がある面の数（接触面数）が三面以下の時は、二本の指のみ真空パッドにした場合と一本の指のみ真空パッドにした場合の ε も求めた。以上の結果を接触面数ごとに集計し、各場合における ε の最大値を求めた。

結果を Fig.4.4 に示す。真空パッド一個のみの場合の ε が最小値であったため、どの面にどの指が追加されても把持が安定化されることがわかった。これは、追加された接触点が真空パッドの内側でない限り、その点由来の基本接触レンチは真空パッド由来のレンチと重複せず、把持レンチ空間を拡大させることに寄与するからである。よって、接触が成立しさえすれば、把握の併用は有効であることが確かめられた。

接触面数が4以上になると、 ε の最大値はあまり変化しないため、可能であれば4面の接触を行うべきであることがわかった。接触面数が4の時、真空パッドがない場合と真空パッドのみの場合の両方において、 ε が最大値となったのは Fig.4.3f の時である。この接触様態を Fig.4.2 (c) の後で実現しようとする、前項で述べたように、指が壁と接触しないように狭隘空間から引き出した物体部分にのみ接触させる場合では、奥の一面に指が接触できず、実現不可能である。一方で、Fig.4.2 (a) の後では、物体を吸引着して引き出す指以外の指が三本あれば実現可能である。これを実現する四本指ハンドの場合、Fig.4.2 (c) から Fig.4.2 (d)

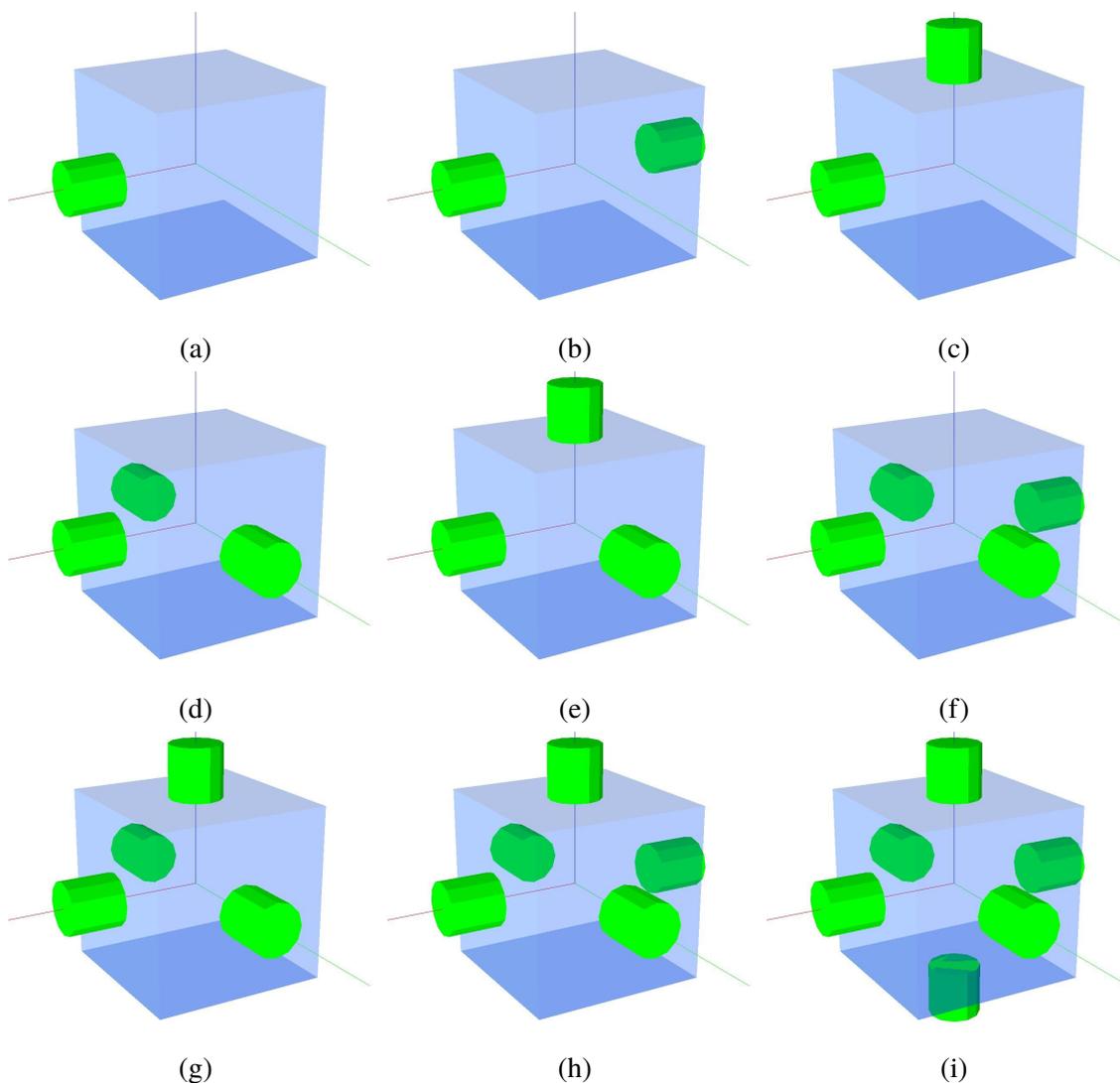


Fig. 4.3: 比較・分析対象とした把持の指配置．図では真空パッドのモデルを用いているが，同じ場所に吸引着性のない指のモデルを配置することもある．

への遷移を行おうとすると，指が一本余ることになる．この時，指を全て連動させていると，余った指も物体に接触し，対向する指はないため，把持移行期リスク r が悪化することになる．これを避けるためには，指を独立制御する必要があり，モータ数を増やすことが必要になる．そのため，接触面数が少ない場合から発想されるハンドについても検討を行う．

接触面数が3の時，真空パッドのみの場合の ε が真空パッドがない場合の ε を大きく上回っており（1.50倍），吸引着の必要性が生じている．しかし，全ての指を真空パッドにせ

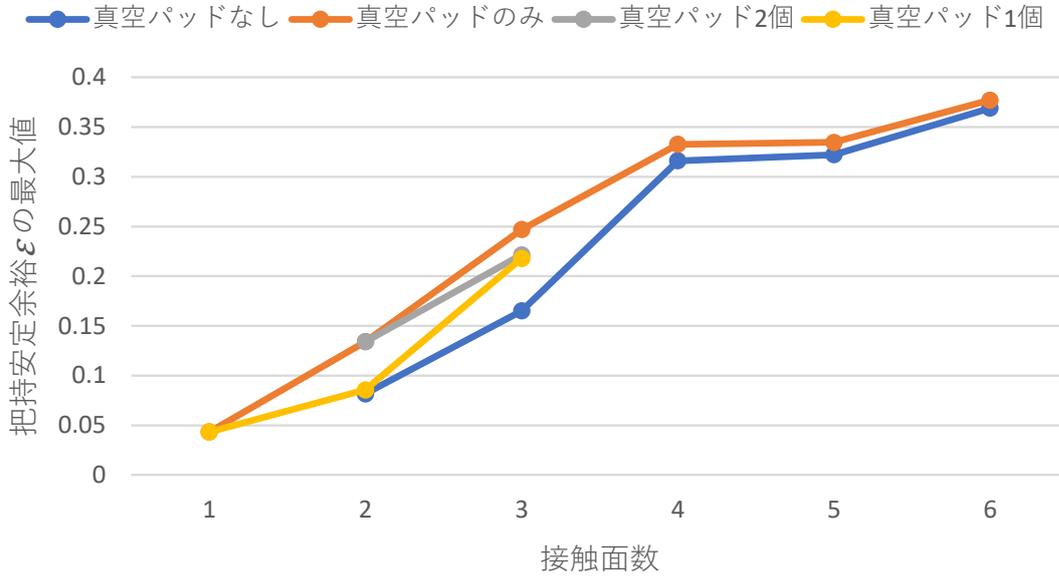


Fig. 4.4: 立方体に対する把持の比較結果．

ずとも，指一本を真空パッドにただけで ε は大きく向上している（1.32倍）．十分な空気吸引に必要な大型のポンプや指先までの太い配管などを考えると，吸引が少ない方が構造の巨大化・複雑化を防げるため，本研究では機構の簡潔さと動作の安定性のバランスを取る観点から，指一本を真空パッドにするだけで十分であると考えた．接触面数が3で指一本が真空パッドの場合， ε が最大となるのは Fig.3.6 の場合であり，真空パッド一つと指二本で実現できる．真空パッドが一つだけの場合，接触面数が2の時は，全ての指を真空パッドにした時に比べて ε が大きく低下してしまう．しかしこの時，真空パッドではない指が二本あれば，Fig.3.8 のように配置することで， ε を十分に大きくすることができる．このような三本指ハンドであれば，吸引を行う指以外の指が連動していても，Fig.4.2 (a) から Fig.4.2 (b) への遷移及び Fig.4.2 (c) から Fig.4.2 (d) への遷移が可能である．

以上から，四本指ハンドと三本指ハンドの可能性が示された．四本指ハンドの場合，吸引単体から把握併用状態に遷移した時の ε の変化の最大値は，四本全て吸引にした時で7.69倍となる．これに対し，三本指ハンドの場合の変化の最大値は，5.03倍となる．本研究では，機構の簡潔さと動作の安定性のバランスを取る観点から，5倍でも十分な安定化であるとみなし，三本指ハンドを採用した．

4.2.3 壁への押し付けによる吸引成立動作が常に機能する物体

これまで述べてきた壁への押し付けを基本とした吸引動作は、この動作が壁との相対姿勢によらず機能する物体に対しては、狹隘空間の壁と物体との間に吸引機構が入り込む隙間があれば、必ず成功すると考えられる。このような物体の十分条件を求める。物体が剛体であるとし、壁に押し付けられた際には点や線ではなく、面で壁に接触すると仮定する。点接触や線接触が維持されるのは、その点や線を押付力のベクトルが通る場合のみであるため、後者の仮定は十分自然なものであると考えられる。この時、物体と壁との界面は、物体の凸包を構成する面のいずれかとなる。そして、押付力のベクトルが界面内を通らないとモーメントは釣り合わず、押付力は壁に垂直であることから、物体に押し付けられている真空パッドの軸は、界面内に足を持つ界面の垂線である。ここで、吸引が成立する条件は、物体のモデルに対して真空パッドの密閉が成立する条件 [67] が満たされることである。この条件とは、真空パッドをばねの集合体として近似し、それを物体モデルに押し付けた時に、各ばねの長さの変形が 10% 以内に収まることである。押し付けは、パッドのリップ形状をモデル表面に投影することで表現する。この条件を用いると、壁に押し付けられた際に必ず吸引が成立する物体とは、物体の凸包を構成する各面の内部を十分に細かくサンプリングし、各サンプリング点を通るその面の垂線に軸を揃えた真空パッドに対して密閉成立条件を確認すると、必ず満たされている物体と表現できる。このような物体に対しては、壁への押し付けによる吸引成立動作が機能する。例えば、球状物体に対しては、密閉が成立しないほど半径が小さくなければ機能する。この時、壁に向かって押し付けるという制約がない一般的な把持計画では、任意の方向から接触する可能性があり、物体が転がってハンドから離れてしまう可能性があるが、壁を活用した吸引成立動作では、床もしくは側壁に押し付けるため、物体が転がるリスクは低い。さらに、前項で述べたように、吸引着成立後の把握時に把握用の指が物体の任意の場所に接触できれば、把持安定余裕 ε は大きくなることから、壁への押し付けによる吸引成立動作が機能する物体かつ、どの部分を吸引しても把握の併用時に把握用の指と接触できる寸法の物体であれば、提案手法により設計される吸引動作と把握動作が常に有効に機能することがわかる。なお、その他の物体に関しては、物体・壁・真空パッドの位置関係と物体寸法によって、機能するかないかが変化する。

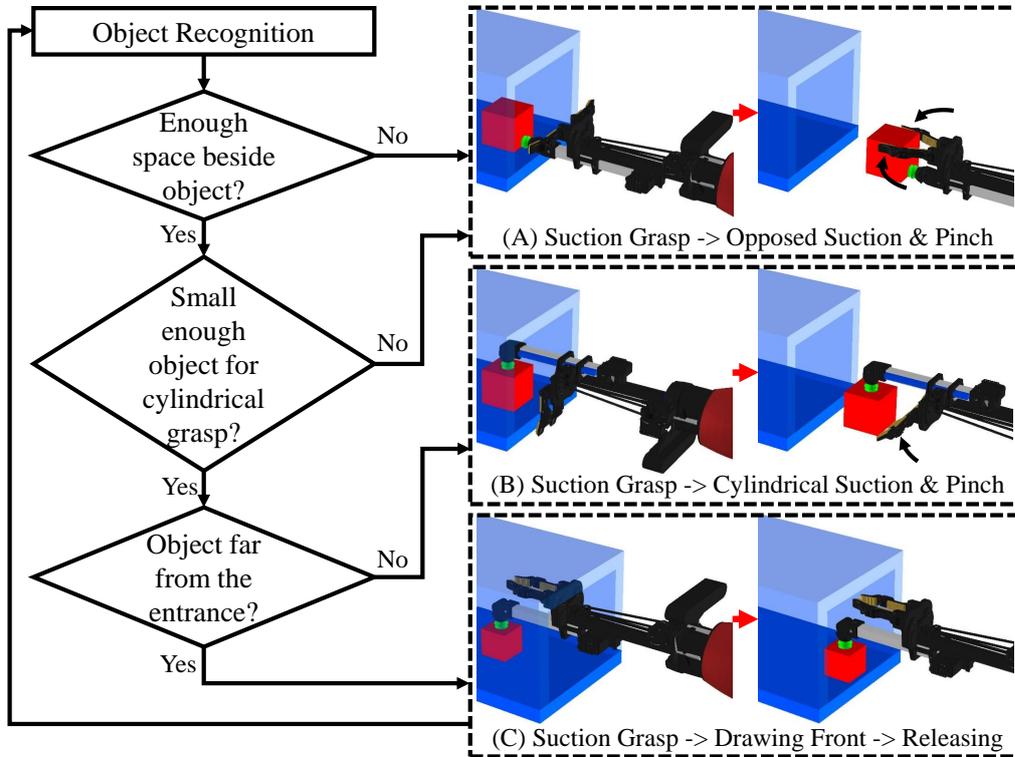


Fig. 4.5: 狭隘空間におけるピッキングのための動作戦略 [98].

4.2.4 狭隘空間におけるピッキングのための動作戦略

最終的に設計された動作と、実世界の現在の状態がどのタスクに当たるのかを認識結果から判別するアルゴリズムを組み合わせ、ピッキング動作戦略として再構成したものを Fig.4.5 に示す。また、この戦略を核とするピッキングの流れを Fig.4.6 に示す。認識結果の形式としては、操作対象物のバウンディングボックスとそのピン内での位置を想定している。

まず、対象物のバウンディングボックスとピンの間の空間を代表する以下の三つの距離を確認する。

1. ピン天井とボックス上面の間の距離 (Fig.4.1 における z_t)
2. ピンの右側の壁とボックス右側面の間の距離 (Fig.4.1 における y_r)
3. ピンの左側の壁とボックス左側面の間の距離 (Fig.4.1 における y_l)

これら全ての距離が小さくて単指が入り込めない場合、単指他指非対向型把握を行うしかな

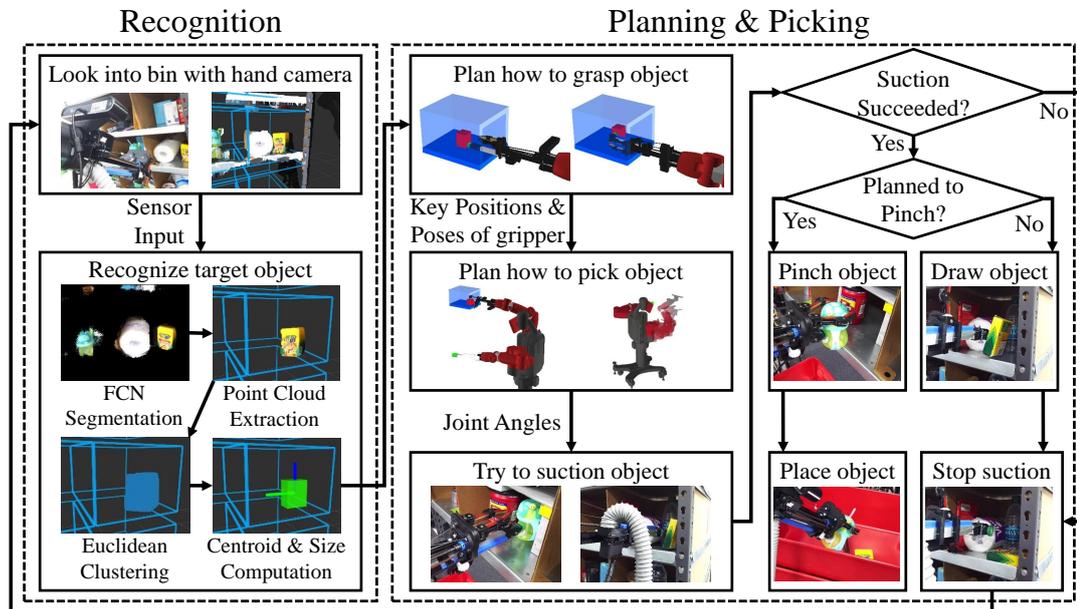


Fig. 4.6: 狭隘空間におけるピッキングの流れ [98].

く, Fig.4.5 の (A) に示した動作が行われる。これは, 対象物の正面を吸引して対象物を引き出した後で, 把握に切り替える動作である。ここに当てはまらなければ, 次の確認に移る。

次に, ボックスの寸法を確認する。単指他指対向型把握を行うためには, 単指が接するボックス表面の反対側のボックス表面に他指が届かなければならない。よって, z_t が大きく単指が入り込める場合はボックスの高さ (Fig.4.1 における h_o) を, y_r もしくは y_l が大きい場合はボックスの幅 (Fig.4.1 における w_o) を, それぞれ確認する。もし確認した長さが単指他指対向型把握ができないほど長ければ, Fig.4.5 の (A) に示した動作が行われる。ここにも当てはまらなければ, 次の確認に移る。

次に, ボックスの位置を確認する。ボックスがピンの入口から離れた位置にある場合, Fig.4.5 の (B) に示した動作を行おうとすると, 指がピンの床と衝突してしまう。この場合, Fig.4.5 の (C) に示した動作が行われる。この動作では, 単指マニピュレーションを用いてピンの入口近くまで物体を引き出すことのみが行われる。物体を手放した後で物体認識を再度行くと, 物体はピンの入口近くに移動しているため, (B) の動作が行えるようになっている。

最後に, これまでの全ての確認でどの条件にも当てはまらなかった場合, (B) の動作を行う。

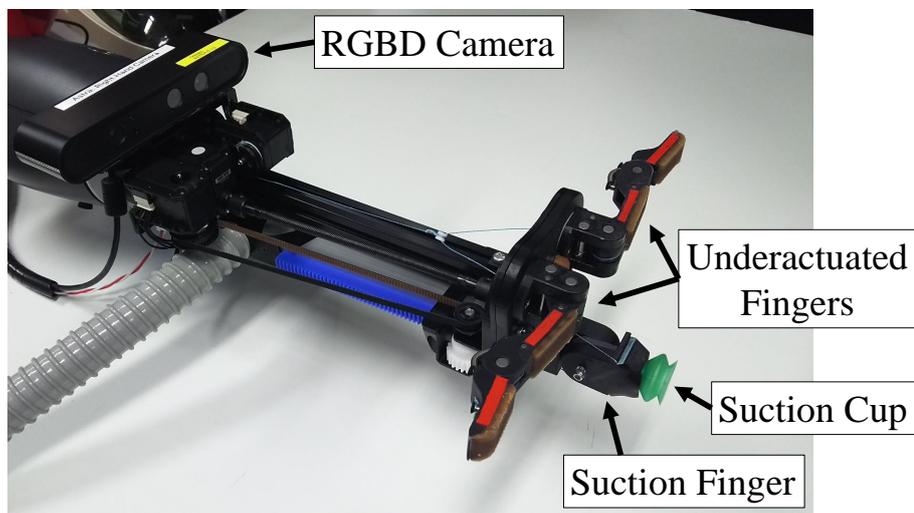


Fig. 4.7: 狭隘空間におけるピッキングが可能な吸引挟み込みハンド [98] .

4.2.5 ハンド構造実現

前項で述べた構造を具現化したものが、Fig.4.7 に示す吸引挟み込みハンドである。指にセンサを入れたもの (Fig.4.8) も構成した。このハンドは三本指であり、そのうち一本が、伸展と屈曲が可能かつ先端に真空パッドを備えた吸引指となっている。伸展と屈曲により、狭隘空間に入り込んで様々なサイズの物体を把持することができる。残りの二本はそれら同士で対向もしくは吸引指と対向でき、把握機構を構成している。この吸引挟み込みハンドを含んだロボットシステムの全体像を Fig.4.9 に示す。また、センサについては、第5章で述べる。

把持様式

吸引挟み込みハンドの各関節の動き (Fig.4.10) により可能となるハンドの把持様式を Fig.4.11 に示す。これらの把持様式は、どの機構を使用するかによって、吸引機構のみを用いた把持・把握機構のみを用いた把握・吸引機構と把握機構を同時に用いた把握の三種類に分類することができる。吸引のみを用いた把持は、小さな吸着指のみを狭隘空間に差し込んで、様々な寸法の物体を把持する場合に利用される (Fig.4.12) 。把握機構のみを用いた把握には、円筒把握・球状把握・対向把握の三通りがあり、多様な物体を把持できる。円筒把握は円筒状物体や薄い物体に適した把握である。球状把握は球状物体に最適な把握である。対

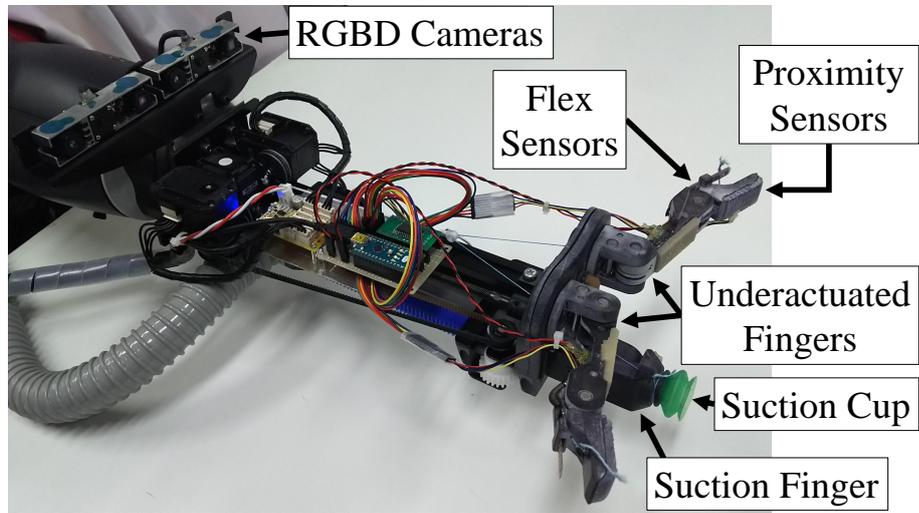


Fig. 4.8: 指にセンサを搭載した吸引挟み込みハンド [70].

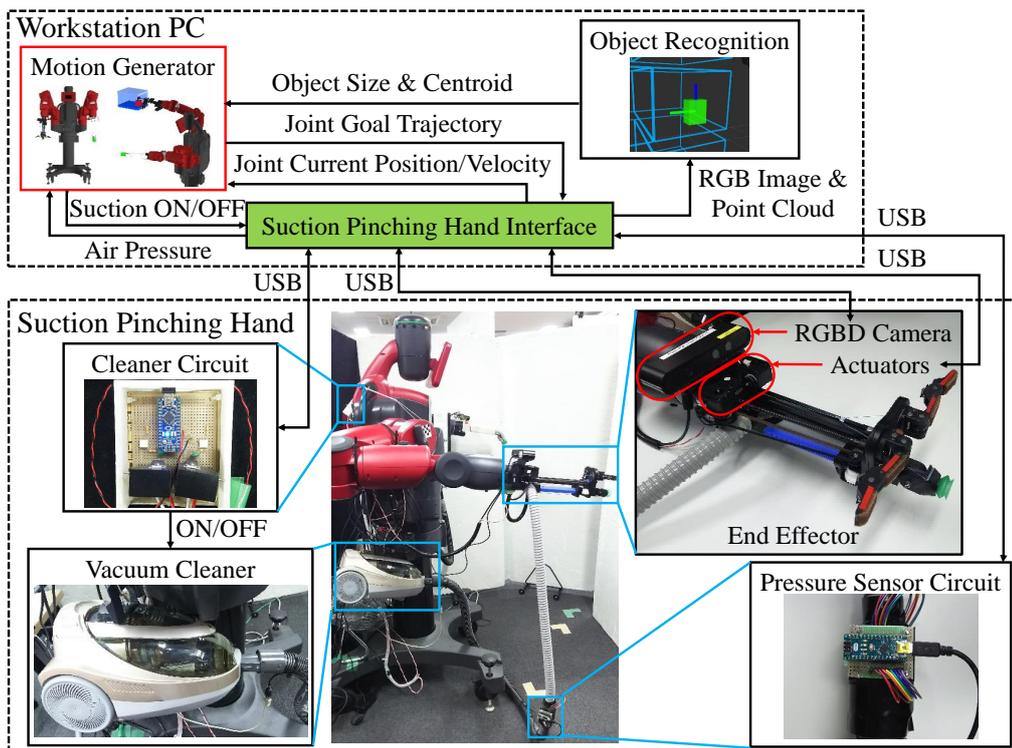


Fig. 4.9: 吸引挟み込みハンドを含んだロボットシステムの全体像 [98].

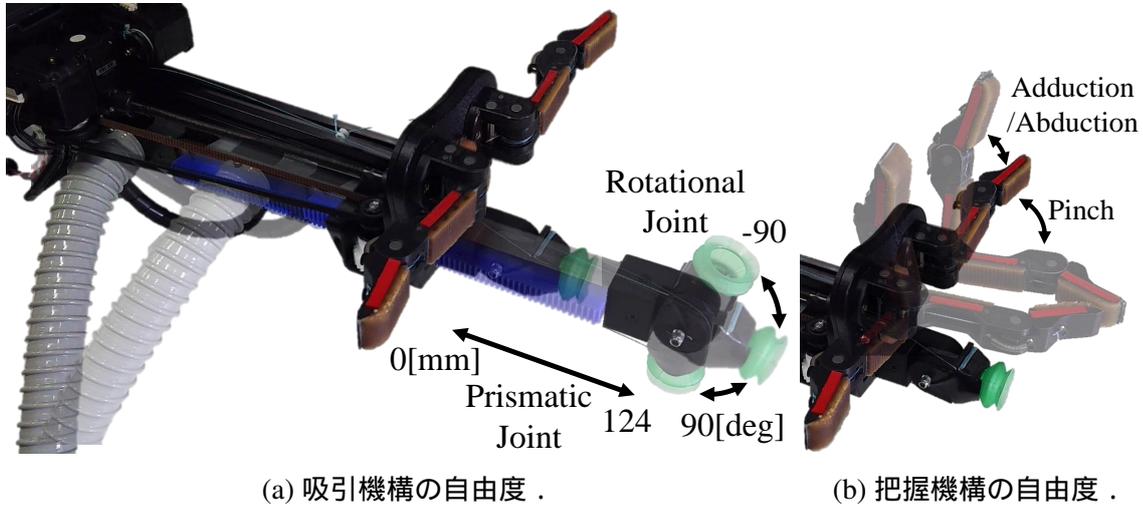


Fig. 4.10: 吸引挟み込みハンドの自由度 [98] .

向把握は高さのある物体や幅の広い物体の把握に利用できる．吸引はこれらの把握と併用することが可能となっており，吸引を用いて狭隘空間から開けた空間へと引き出してきた物体を把握し，目的地まで安定に運搬することができるようになっている．これにより，吸引で持ち上げると落としてしまう可能性がある対象物が把握動作困難な狭隘空間にある場合でも対処できる．

吸引機構

吸引機構は把握機構が入り込めない狭隘空間においても吸引把持が行える必要がある．また，様々な形状や姿勢の物体を把持できるように，吸引指先端が屈曲しなければならない．これらの目標を達成するため，124 mm まで伸展し，180 度回転する吸引指を開発した．吸引指指先の高さ (Fig.4.12a の h_s) と真空パッドの直径 (Fig.4.12b の d_c) が小さいため，吸引指指先は狭隘空間に入り込むことができる．Fig.4.13 に吸引指の回転関節の模式図を示す．指先リンクを可能な限り小さくするため，吸引管の最後部にアクチュエータを配置し，そこから伸びた腱でリンクを回転させる構造になっている．

多様な物体を吸引把持するためには，空気漏れに耐性があるような吸引機構を構築するのが望ましい．本研究では，吸引管最後部から伸ばしたホースに接続するポンプとして掃除機を用い，把持動作中は吸引機構内の空気を常に大流量で排出し続けることで空気漏れへの耐性を達成した．これは，倉庫におけるピッキングにおいて広く使われるようになった手段で

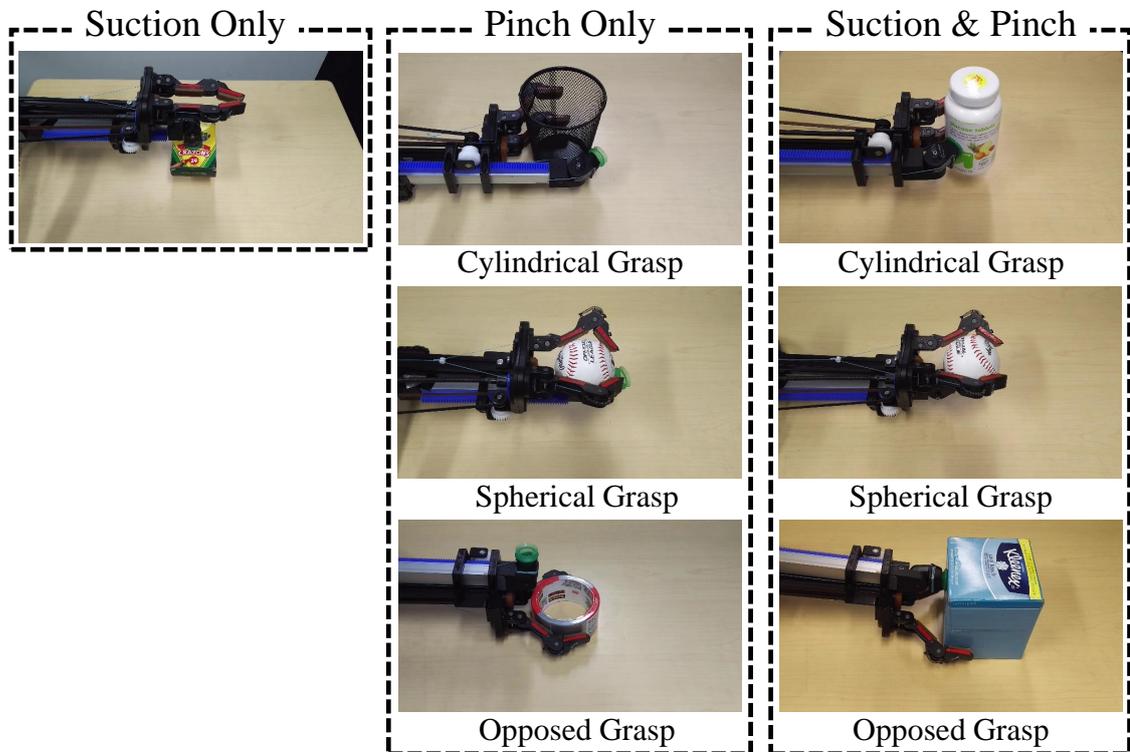


Fig. 4.11: 吸引挟み込みハンドの把持様式 [98] .

ある [99] . 本研究では，2000W の掃除機をハンドにつないで吸引を行った .

ピッキングを継続的に行うためには，対象物の把持が失敗した際にロボットがそれを検出し，把持を再試行することが求められる . これを達成するため，空気流路内に気圧センサを設置した . 対象物が吸引把持された場合，真空パッドが対象物で塞がれて空気流路内への気体流入量が減少するため，空気流路内の気圧が降下する . この降下を気圧センサで検出し，吸引把持が成功したことを確認している .

把握機構

把握機構は対象物の位置姿勢や表面形状に関係なく対象物を把握できる必要がある . また，把握動作は吸引と併用できなくてはならない . 吸引されている物体を真空パッドへ押し付ける向き以外の向きに押ししてしまうと吸引が剥がれる危険があるため，把握と吸引の併用のためには，吸引されている物体の位置姿勢に適応した把握を行う必要がある . これらの目

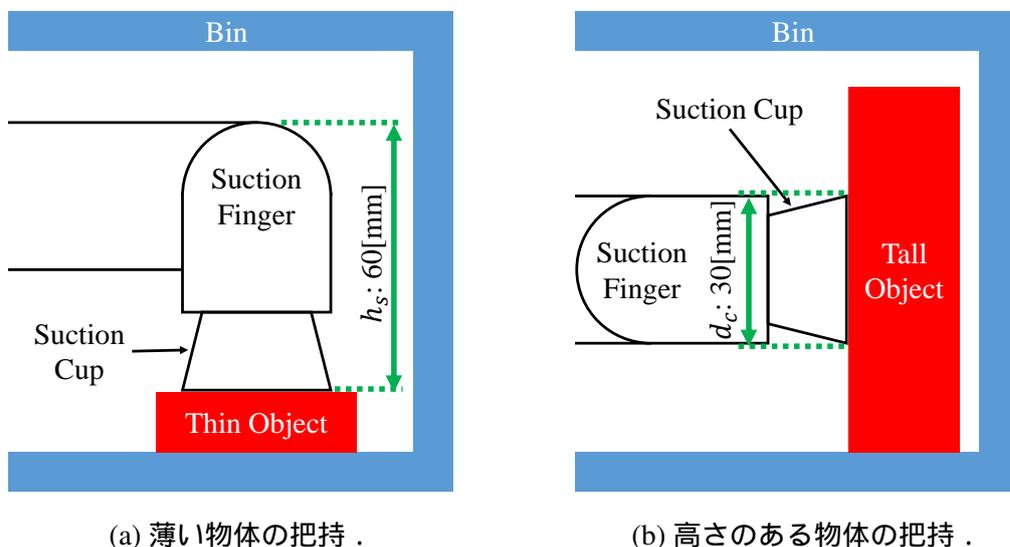


Fig. 4.12: 吸引指が狭隘空間において様々な寸法の物体を把持する模式図 [98] .

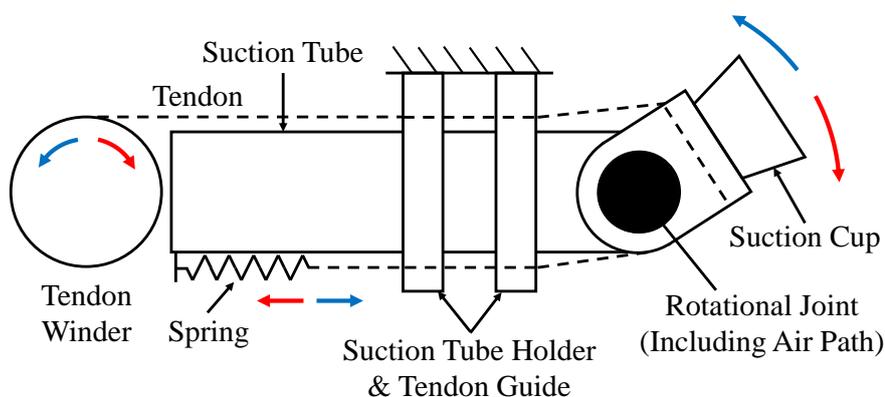


Fig. 4.13: 吸引指の回転関節の模式図 [98] . 指先リンクには二本の腱が結わえられており、一本はアクチュエータに、もう一本は吸引管の最後部に固定されたバネに引かれている．関節と吸引管の内部には、真空パッドから吸引管反対側までを繋ぐ空気流路が通っている．

標を達成するため、二本の劣駆動の指と腱連結器を用いた把握機構を開発した．

Fig.4.10b に劣駆動の指の動きが示されている．この劣駆動の指は、iRobot-Harvard-Yale Hand [65] のオープンソース版である Yale OpenHand Project Model O [100] の指 (Pivot-Pivot) である．各指には内部に一本の腱が通っており、それが引かれることで屈曲する．ま



Fig. 4.14: 腱連結器 [98] .

た、二本の指が左右対称に内転/外転することで、把握様式を円筒把握・球状把握・対向把握のいずれかに切り替えることができる。二本の指を一つのアクチュエータで駆動するため、劣駆動人間型ロボットハンドの開発 [101] で用いられたワイヤ連結法を改良したものをを用いた。Fig.4.14 に示すように、アクチュエータで引かれる腱につながった腱連結器を導入し、中心部の穴に二本の指を繋ぐ腱を通した。腱連結器は指を繋ぐ腱の上を滑って移動できるため、一つのアクチュエータのみで適応的把握が実現される。以上の把握機構構成要素の働きにより、対象物の位置や表面形状に関係なく対象物を把握できるようになる。Fig.4.15 に適応的把握の様子を示す。Fig.4.15a の状態においてアクチュエータが腱を引き始めると、二本の指はほぼ左右対称に閉じていく。しかし、Fig.4.15b のように片方の指が対象物に接触した後は、腱連結器が腱の上を滑るため、接触していない指が主に屈曲するようになる。最終的には、Fig.4.15c のように、対象物の位置や表面形状に適応しつつ安定した把握状態となる。このような適応的把握により、多様な物体を安定に把握できる。

4.2.6 実現された構造の評価実験

実現されたハンドそのものの把持能力を評価するための実験を行った。把持対象物品として、Amazon Picking Challenge 2016 において使用された 39 個の物品 (Fig.4.16) を用いた。Fig.4.16 において各物品に振られた ID 番号を、物品識別のために以後用いる。

吸引力評価実験

まず最初に、吸引指の吸引力を計測し、吸引指で把持可能な物品の範囲を確認する。この実験では、吸引指に電子天秤上のダンベル (ID: 35) を吸引させ、吸引が剥がれるまでハンドを引き上げる。Fig.4.17 に実験環境を示す。電子天秤が記録した重量から吸引指が発生

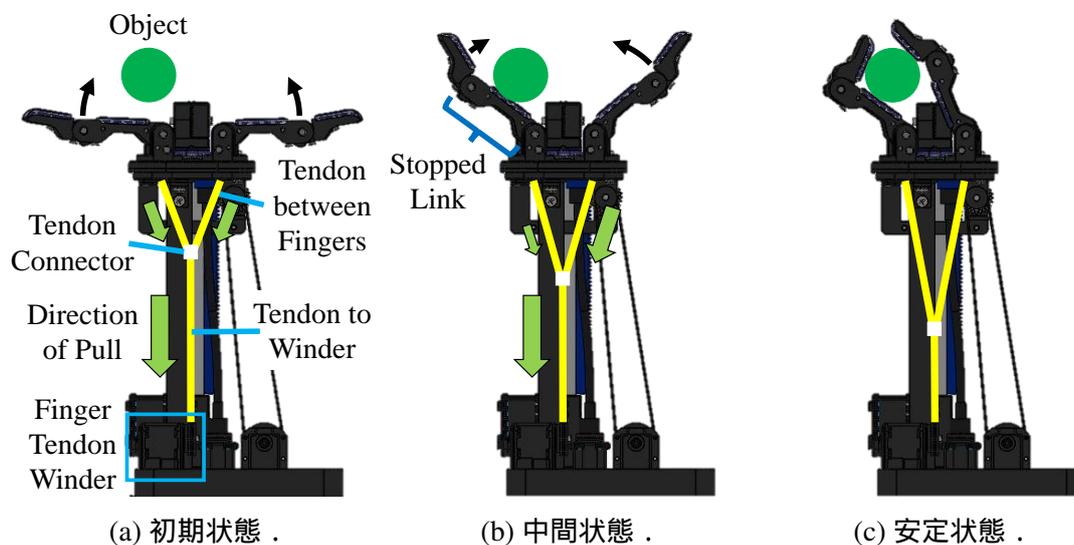


Fig. 4.15: 二本の劣駆動指による適応的把握の様子 [98] .

させた力を計算する．Fig.4.18 に実験結果を示す．実験結果から，電子天秤が記録した最小重量は 663 g であった．ダンベルの重量は 1379 g なので，吸引指が発生させた力の最大値は $1379 \text{ g 重} - 663 \text{ g 重} = 716 \text{ g 重}$ である．実験で使用する物品の中で，この最大値より大きな重量を持つ物品はダンベルのみである．

把持性能評価実験

実現されたハンドが空気漏れする物体やダンベルのような重い物体を含む多様な物体を把持できるか検証するため，テーブルトップでの実験を行った．実験では，Fig.4.19 のように，ハンドを装着したロボットがテーブル上の物体を事前に定めた一定の試行動作でピックアップし，成功するかを確認した．Motion 1 と 2 は吸引と把握の併用動作であり，実現されたハンド特有の動作である．Motion 3 と 4 は把握動作のみである．各動作について以下で詳述する．

- Motion 1 では，ハンドは物体上面を吸引し，物体を持ち上げ，円筒把握を併用する
- Motion 2 では，ハンドは物体側面を吸引し，対向把握を併用した後に，物体を持ち上げる
- Motion 3 では，ハンドは物体側面から近づき，物体を対向把握した後に，物体を持ち上げる



Fig. 4.16: Amazon Picking Challenge 2016 において使用された物品 [98] . 各物品の ID 番号と重量も記載されている .

- Motion 4 では、ハンドは物体上面から近づき、物体を円筒把握した後に、物体を持ち上げる

テーブル上の物体のピッキングに成功するまで、Motion 1 から 4 を順番に試みる . ピッキングが成功した場合は、把持が安定しているかを検証するため、ロボットの腕を振る動作を行わせる . 腕振り動作は振幅 20 度、周期 0.4 秒で 7.5 周期行う . 腕振り動作後も物体を落とさなかった時のみ、ピッキング試行成功と記録する .

以上の動作に加え、Motion 1 との比較のため、Motion 1 から把握動作を抜いた Motion 0 も用意した . Motion 0 が成功する場合、この実験条件では吸引のみでも安定であったことが示され、Motion 0 が失敗して Motion 1 が成功する場合、把握により安定性が向上したことが示される .

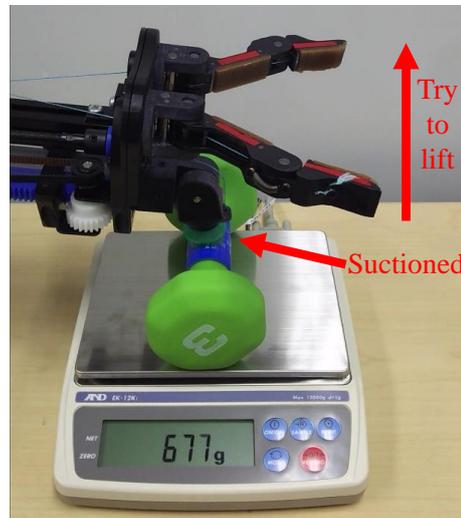


Fig. 4.17: 吸引力評価実験の環境 [98] .

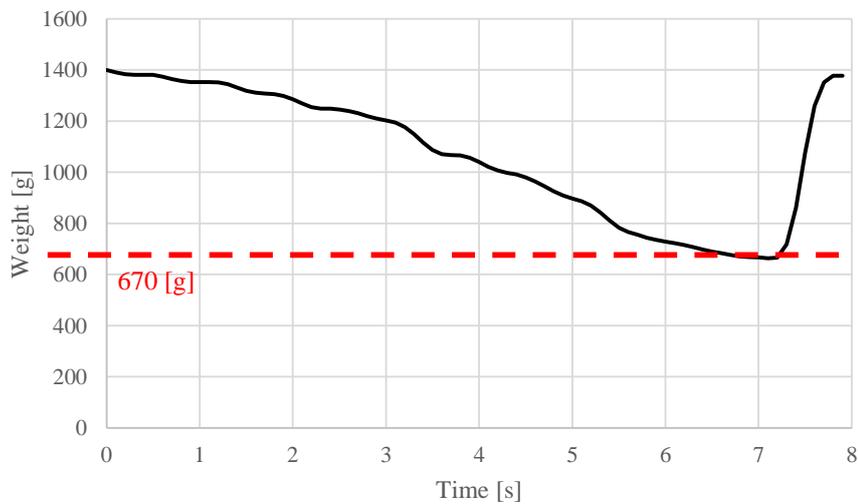


Fig. 4.18: 吸引力評価実験の結果 [98] . 電子天秤の重量計測値は、ダンベルから吸引が剥がれるまで減少し続けている .

実験結果を Table 4.1 に示す . Table 4.1 から、ハンドは用意された 39 物品全てを用意された試行動作のいずれかで安定に把持可能であることがわかった . この汎用的な把持能力は、似た物品と似た環境で評価された他のグリッパ [102, 103] に比べて優れている . 前者の研究では、吸引不可能な物体 (ID: 12 と ID: 27) があることが示された . 加えて、どちらの研究

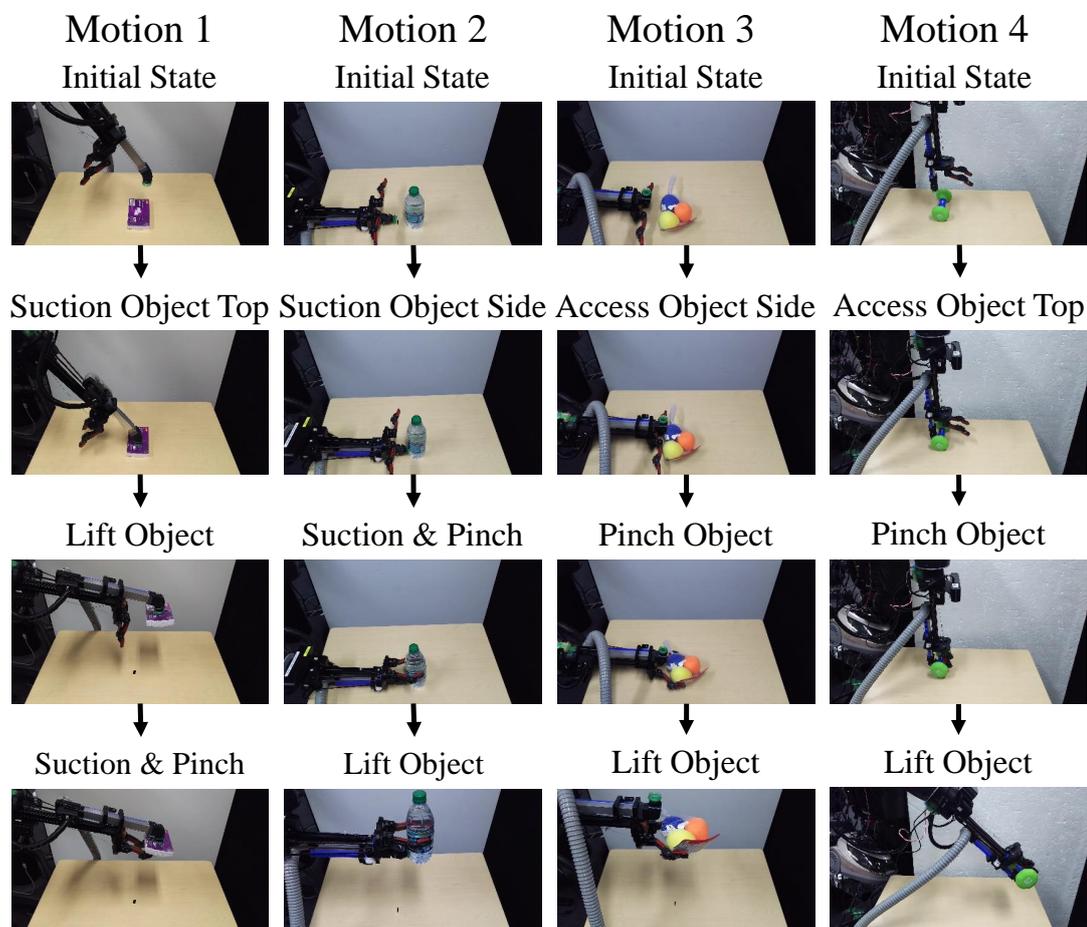


Fig. 4.19: 把持性能評価実験における試行動作 [98] . これらの動作に加え , Motion 1 から把握動作を抜いた Motion 0 も用意した .

でも , 薄くて硬い物体が把握できなかったことが述べられている . 39 物品の中では , 封筒 (ID: 16) と絵本 (ID: 23) が典型例である .

39 個中 37 個が Motion 1 と 2 で把持できたことから , 吸引と把握の併用動作が安定であることが確かめられた . 31 個が Motion 0 で安定に把持でき , Motion 1 で新たに 2 個が安定して把持できるようになった . Motion 1 で安定把持可能な物品数が増えたことから , 把握により把持安定性が向上することが示された . 増えた物品は , ボトルブラシ (ID: 4) と鉛筆セット (ID: 28) である . これらの物品は吸引により持ち上がってはいたが , 把握せずに腕振り動作を行うと落下してしまった . この原因は二つ考えられる . 第一に , それらの物体の表面

は凹凸があって硬く、真空パッドが十分に馴染まなかったためであると考えられる。それらの物体の実験においては、空気漏れの音が観測された。第二に、両物体とも比較的長く（ブラシ：307 mm, 鉛筆セット：214 mm）、腕振りの軸周りの慣性モーメントが比較的大きかったためであると考えられる。これにより、空気漏れした吸引では発生させられないほどの力のモーメントが腕振りに追従するために必要となり、結果として吸引が剥がれてしまったものと推測される。空気漏れの音はハサミ（ID: 32）においても観測されたが、ハサミの慣性モーメントは小さかったために落とすことはなかった。

残りの6物品は3種類に分類できる。ペットボトルの水（ID: 5）とのり（ID: 20）、テープ（ID: 14）は上面からの吸引が難しい形状である。具体的には、ペットボトルとのりの容器の蓋は真空パッドより小さく、テープ中央には穴が開いている。これらの物品は、側面からの吸引なら可能であるため、Motion 2によりピックアップできた。特にペットボトルの水は重く、吸引のみで持ち上げようとすると重力によって傾き、吸引が剥がれてしまう危険性が高いため、Motion 2の対向把握が必要である。

鉛筆立て（ID: 27）とボールパック（ID: 12）は過度な空気漏れが発生するため吸引できない物品である。鉛筆立ては高さがあったため、Motion 2の対向把握で把持できた。ボールパックはMotion 2の対向把握では高さが足りなかったが、Motion 3の対向把握で把持できた。

ダンベル（ID: 35）は吸引指の吸引力よりも大きな重量を持つことが吸引力評価実験によって示されているが、円筒形の持ち手があるため、Motion 4の円筒把握によってピックアップできた。

以上から、吸引力が物体質量を上回っていて十分に見えたとしても、安定な把持のためには吸引と把握の併用が必要な場合があることがわかった。

4.3 剛体近似に基づいた狭隘空間におけるピックアップ・ストーイング

本節では、前節で考えたピックアップ動作を発展させてより倉庫自動化に役立つものにすべく、倉庫自動化において必要なタスクを整理し、それらを実行可能な動作を動作構造同時設計論に基づいて設計する。

Table 4.1: 把持性能評価実験の結果 [70].

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Object ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Motion 0 | ✓ | ✓ | ✓ | × | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ |
| Motion 1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ |
| Motion 2 | | | | | ✓ | | | | | | | × | |
| Motion 3 | | | | | | | | | | | | ✓ | |
| Motion 4 | | | | | | | | | | | | | |
| Object ID | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| Motion 0 | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Motion 1 | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Motion 2 | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | |
| Motion 3 | | | | | | | | | | | | | |
| Motion 4 | | | | | | | | | | | | | |
| Object ID | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| Motion 0 | × | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Motion 1 | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Motion 2 | ✓ | | | | | | | | × | | | | |
| Motion 3 | | | | | | | | | × | | | | |
| Motion 4 | | | | | | | | | ✓ | | | | |

Object ID と動作の番号は、Fig.4.16 と Fig.4.19 で定義されたものに対応している。✓ がピッキング試行成功を意味し、× はその逆を意味する。

4.3.1 倉庫自動化において必要なタスク

近年倉庫自動化に注目が集まった結果、倉庫内の物品棚を自動で運搬するロボット [104] が開発・導入された。これにより、メーカーから到着した物品を収納したり注文された物品を取り出したりするために労働者が倉庫内を移動する必要がなくなり、倉庫における生産性は飛躍的に向上した。更に、これらのロボットにより、コンベアのような移動させにくい設備を削減でき、倉庫の拡張性も向上した。

このような変革の後、Fig.4.20 に示すように、倉庫において人手で物品を扱う工程は以下の四段階に分けられるようになった。

1. メーカーから到着したパレットから物品を取り出す
2. 物品を棚に収納する
3. 棚から注文された物品を取り出す
4. 注文された物品を出荷用段ボール箱に収納する

段階1と2の間及び段階3と4の間では、物品を収納したコンテナ (Tote) が運ばれている。前節で考えたピッキングは段階3 (ピッキング段階) に対応するが、これと対になるものと

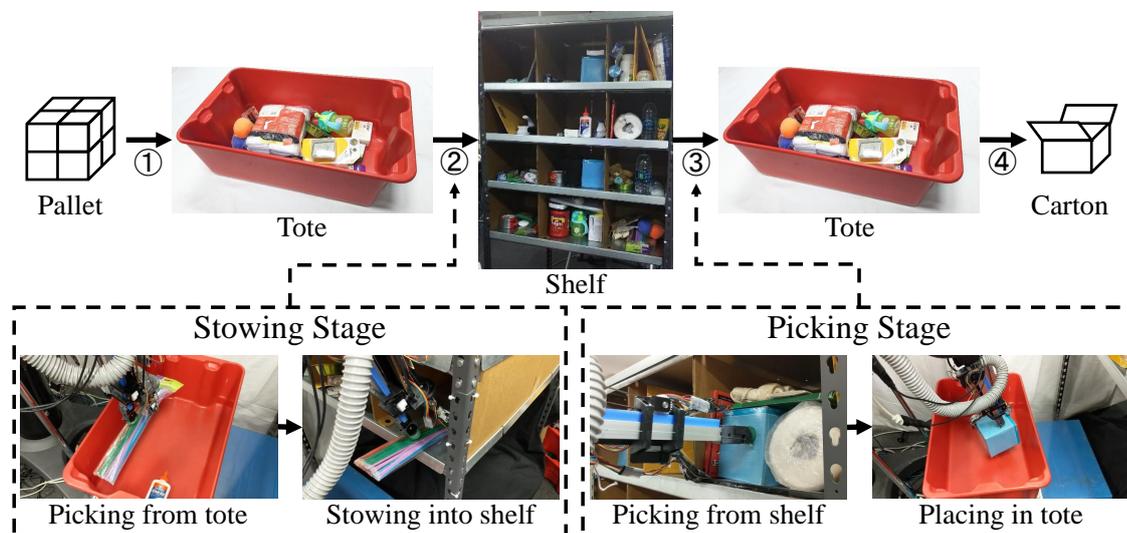


Fig. 4.20: 倉庫において人手で物品を扱う四段階の工程 [70]．本節では，ストーイング段階と呼ぶ段階 2 とピッキング段階と呼ぶ段階 3 に注目する．

して段階 2 (ストーイング段階) があり，この段階に対応する行動はストーイングと呼ばれている [14]．ピッキングを行うロボットシステムでストーイングまで行えるようにすることで，倉庫の単純性や拡張性をより高められると考えられる．

ピッキング段階

前節では，タスクを考える際に，多孔質で空気漏れするなどの理由で吸引着できない物体があることを考慮していなかった．そこで本節では，タスクとして与える要素に対象物が吸引着可能か不可能かを追加し，吸引着不可能な物体を扱うタスクについても考える．この場合，単指しか入れないような狭隘空間において，単指でどのように吸引着不可能な物体を操作するかが問題となる．ここで考えられるのが，Fig.2.17 で述べた押し操作の利用である．吸引着不可能な物体に対し，環境を利用したケーシング状態を保ちながら押し操作を行ってハンド内まで移動させ，単指他指対向型把握への切り替えを行うことで，ピッキングを成功させられると考えられる．

ストーイング段階

ピッキング段階とストーイング段階で同じハンドとピッキング動作戦略を用いるために必要な要素を考える。ストーイング段階では、多様な物体をトートから取り出して棚のビンに収納することが求められる。トートはビンほど狭隘空間ではないため、吸引着不可能な物体に対して、ピッキング段階で求められた複雑な押し操作を行うよりも、直接把握した方が成功しやすいことが多いと考えられる。押し操作による物体掻き出しは、対象物の近くに障害物がないと安定して行えないため、比較的開けた空間では成功率がむしろ低下するものと考えられる。よって、狭くない空間もタスクに追加する必要がある。また、ストーイングの際には、棚のビンの入口を通るように把持した物体を入れなくてはならないが、これはピッキング動作戦略では扱っていない動作である。このため、棚のビンの入口を通るように把持した物体を入れるというタスクも追加しなければならない。

4.3.2 動作構造同時設計論の適用

前項で新たに追加された動作は、押し操作による物体掻き出しと直接的な把握である。後者は、最も高い把持安定余裕 ε を持つ Fig.4.3f に対応するが、狭隘空間においては壁とハンドの衝突を起こしやすいため、可能であれば避けるべきである。つまり、吸引着不可能な物体に対してのみ行われるべきである。前者は、ハンドだけを見ると、吸引着性がない指のみで構成された Fig.4.3d に当たり、 ε は低い。環境による拘束を含めると、Fig.4.3f に対応するが、環境による拘束は他の指と連動しては動かないため、安定性が大きく向上しているとは評価できない。よって、吸引着不可能な物体に対してのみ行われるべきである。一方で、この操作における接触点が物体を押し方向には環境かハンド本体があるため、 $r = 0$ となる。よって、直接的な把握よりも押し操作による物体掻き出しが優先される。以上の新動作は、4.2.5 項で具現化したハンド構造で行えるため、このハンドを使用する。

最終的に設計された動作と、実世界の現在の状態がどのタスクに当たるのかを認識結果から判別するアルゴリズムを組み合わせると、ピッキング段階とストーイング段階の両方において使われるピッキング動作戦略と、ストーイング段階においてビンの入口を通るように把持した物体を入れる動作戦略の二つに再構成できる。前者は不安定な単指マニピュレーションから安定な把握へと切り替える操作が主であることから、これを Unstable-to-Stable Transformation (UST) 戦略と呼ぶ。後者はストーイング段階におけるピッキングにおいて

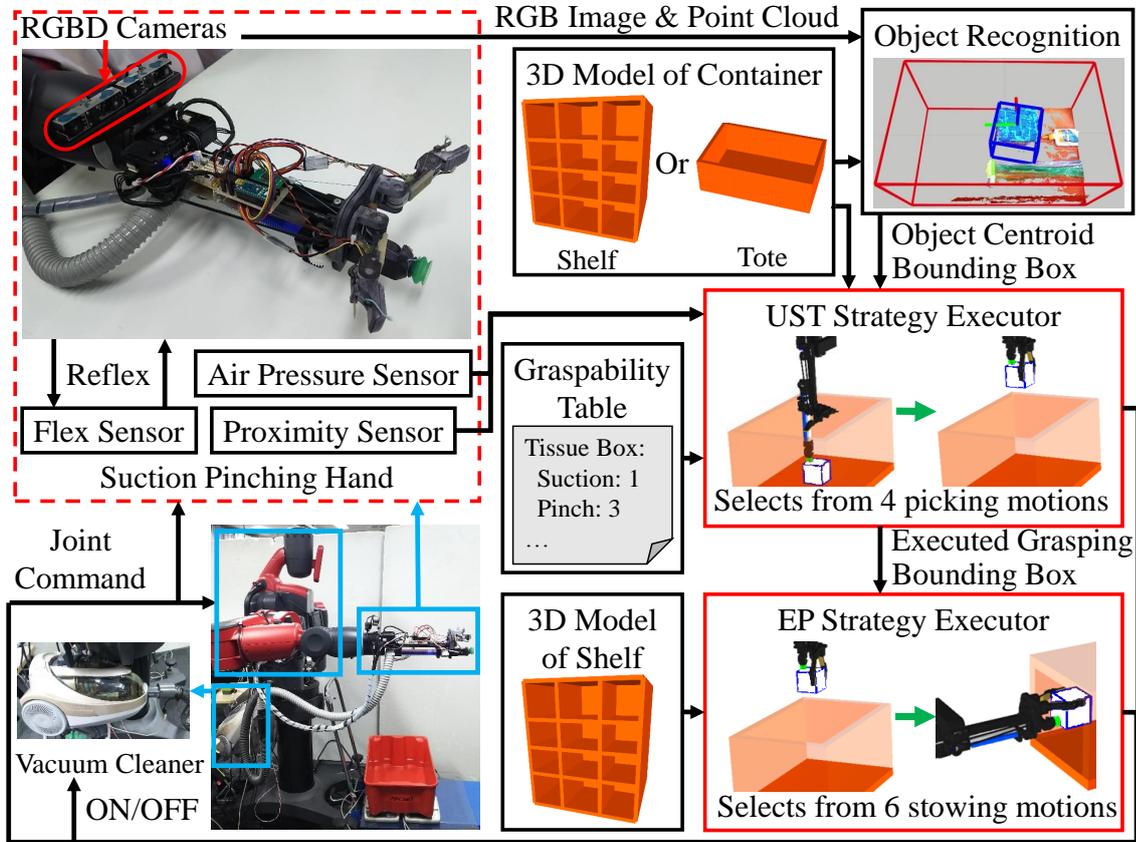


Fig. 4.21: 狭隘空間におけるピッキング・ストーイングが可能なロボットシステム [70].

得られた物体寸法認識結果からピンの入口を通過させられる動作を選択するものとなり、これを Entrance Passing (EP) 戦略と呼ぶ。UST 戦略と EP 戦略を核として構成したロボットシステムの全体像を Fig.4.21 に示す。以下では、UST 戦略と EP 戦略についてそれぞれ説明する。なお、どちらの戦略も、認識結果の形式として、操作対象物のバウンディングボックスと、ピンもしくはトート内でのボックスの位置を想定している。さらに、どちらの戦略も、ピンの奥行きは十分であると仮定し、どの物体においてもピンの最奥の壁よりも他の壁のいずれかの方が近いことと、ストーイングにおいて物体が最奥の壁に衝突することはないことを前提としている。

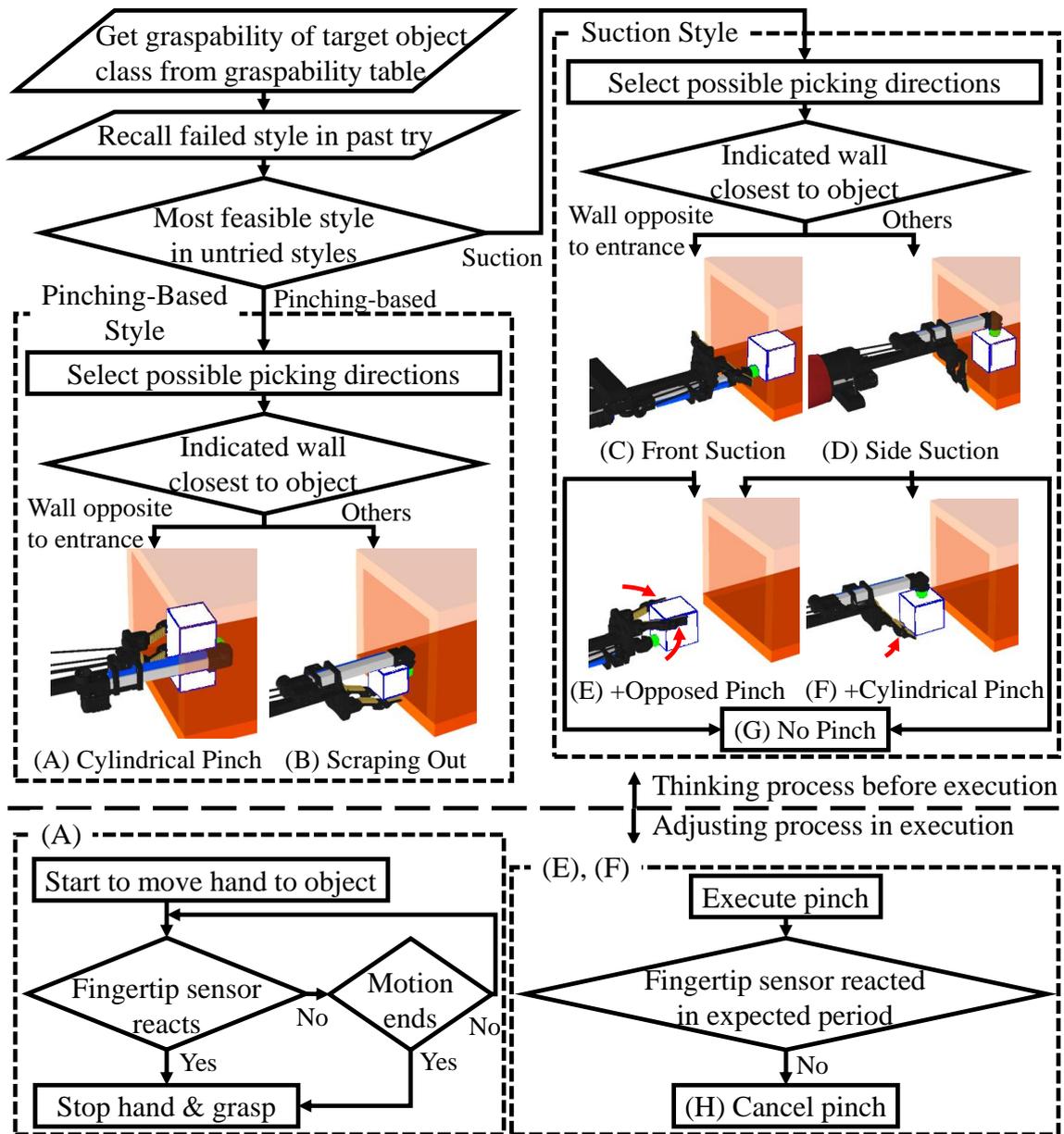
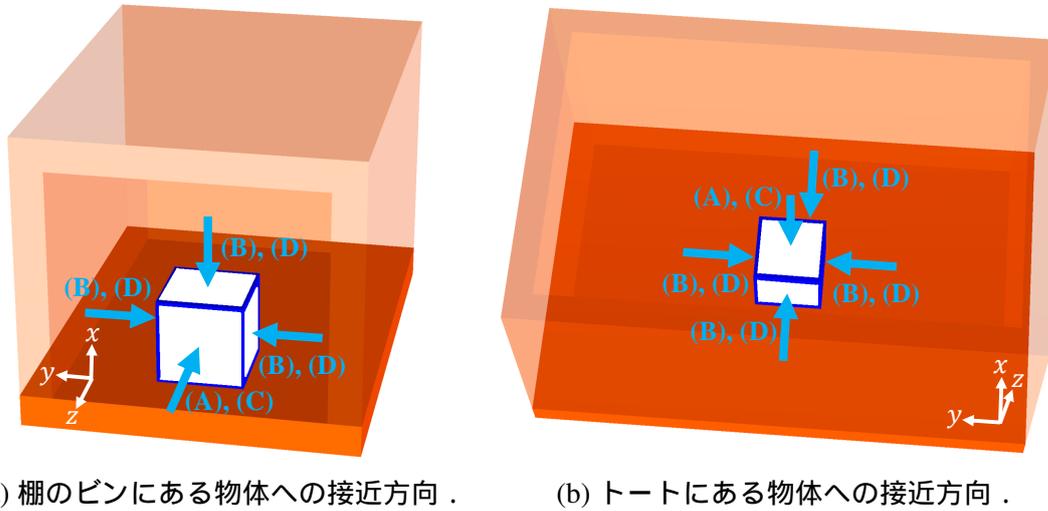


Fig. 4.22: UST 戦略の概要 [70] .

Unstable-to-Stable Transformation 戦略

UST 戦略はピンとトートの両方においてピッキング動作を生成可能でなくてはならず，そこから安定な把握状態への切り替え動作の生成も試みなくてはならない．これを達成するため，UST 戦略では，それ自体が安定か，もしくは安定な把握への切り替えが可能な四つの



(a) 棚のピンにある物体への接近方向 .

(b) トートにある物体への接近方向 .

Fig. 4.23: ピッキング動作が可能な接近方向 [70]. 図の各記号は Fig.4.22 のピッキング動作を意味する . さらに , ピンとトートにおける座標系も示してある .

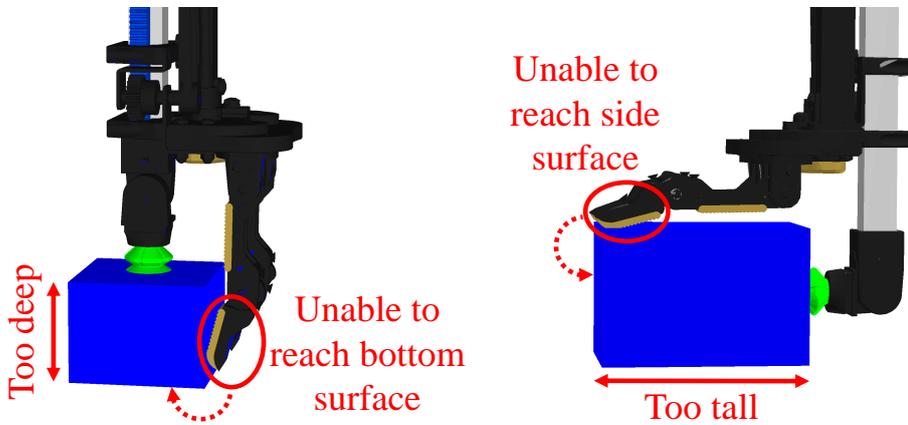
ピッキング動作を用意した . Fig.4.22 に UST 戦略の概要を示す . それらの動作により , 多様な環境の多様な物体が安定にピッキングできるようになる . 特に , 押し操作による物体掻き出しから円筒把握への切り替えは , 棚のピンのような狭隘空間にある吸引不可能な物体の把持に主に用いられる . 他にも , 直接的な円筒把握は , トートのような比較的開けた空間にある吸引不可能な物体の把持に主に用いられる . これらの把握ベースの動作以外の動作は , 吸引可能な物体に対する吸引動作であり , 円筒把握もしくは対向把握への切り替えを伴うことができる .

さらに , 各ピッキング動作を複数の接近方向から行えるようにすることで , 広範囲の物体位置姿勢に対応できるようにする . Fig.4.23 に , ピッキング動作において可能な接近方向を示す . 把握ベースのピッキング様式と吸引によるピッキング様式のどちらにおいても , 床から垂直上向きの方角と入口の反対側の壁からの方向を除いては , ピンやトートの壁に垂直な方向は全て含まれている . 除外された方向は , 入口から入れたハンドでは接近困難な方向である . 対象物のバウンディングボックスの表面に垂直な向きではなく , ピンやトートの壁に垂直な向きを使ったのには二つの理由がある . 一つ目の理由は , 壁に垂直に接近することで , 物体を壁に押し付けることが可能になるからである . 壁への押し付けにより , 真空パッドが物体に馴染んだり , 掻き出し動作において単指と壁の間から物体が抜けてしまうことを防いだりする効果がある . 二つ目の理由は , ハンド全体がピンやトートの壁と平行になるため ,

干渉回避が容易になるからである。この状態での干渉回避は、ピンやトートを縮小したバウンディングボックスを考え、ハンド内のある一点がそのバウンディングボックスから出ないようにすることで達成可能である。

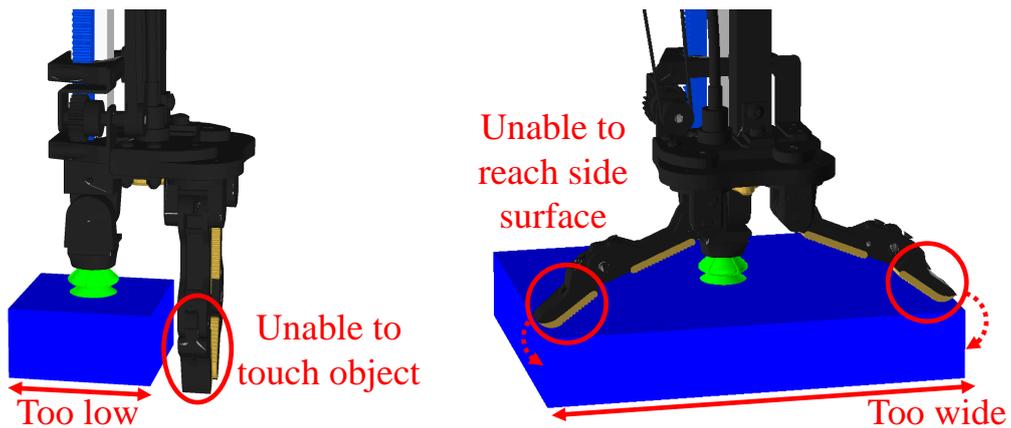
Fig.4.22 に示すように、対象物の種類や位置、バウンディングボックスに基づいて、四つのピッキング動作から一つが選択・実行される。システムはまず、把持可能性一覧表を確認する。この表には、システムが扱う全ての物体種類と、各物体に対する把握ベースピッキング様式の成功確率及び吸引ベースピッキング様式の成功確率が記されている。より成功確率の高い動作が、既に試されて失敗していない限り選択される。次に、全ての接近方向の中から一つが選択される。Fig.4.23 に示すように、各接近方向は選択された様式の動作の一つに対応しており、選択された方向に対応する動作が実行される。接近方向の選択は、動作実行可能性に基づく選択と、壁への押し付け可能性に基づく選択の二段階から成り立っている。一段階目の選択では、壁との干渉や真空パッドより吸引対象表面が小さいことによる吸引失敗がない動作の方向が選択される。二段階目の選択では、一段階目で選択された方向の中から、対応する壁が対象物の表面に最も近いものが選択される。これにより、物体の壁への押し付けが容易になる。選択の際には、物体表面を詳細にモデル化して用いる代わりに、物体のバウンディングボックスの頂点の中で各壁に最も近いものを用いる。ここで、対象物の下敷きになっている他物体は対象物を重力下向きに押し下したとしてもあまり動かないので、それらの他物体は床の一部であるみなすことができる。よって、床が対象物の表面に最も近い壁になるため、一段階目の選択の後に床に対応する方向が残っていた場合、二段階目の選択ではその方向が選択される。

吸引ベースピッキング様式から動作が一つ選択された場合、安定な把握への切り替えが可能なのかを判断する必要がある。切り替えには、Fig.4.22 に示すように、円筒把握への切り替えと対向把握への切り替えという二種類の切り替えがある。ハンドの構造としては球状把握も可能であるが、把握への切り替えが成功している必要があるのは対象物が吸引では安定に把持できないほど大きく重い時であり、この場合では対象物が球状であったとしても円筒把握で対応可能であるため、球状把握は用いなかった。円筒把握への切り替えは側面吸引の後のみで行われる。加えて、吸引している側面の逆側の面に指が届くほど対象物の高さが低い時のみ、切り替えが行われる。Fig.4.24 に円筒把握が適さない場合を示す。正面吸引した場合、高い確率で対象物が奥行き方向に長すぎ、円筒把握できない。これは、壁や他物体とのオクルージョンのため、視覚認識システムが物体の奥行きを過小評価しがちだからであ



(a) 正面吸引した対象物が奥行き方向に長すぎると、指が物体底面に届かない。
 (b) 側面吸引した対象物が高すぎると、指が物体側面に届かない。

Fig. 4.24: 円筒把握が適さない場合 [70].



(a) 対象物が低すぎると、指が物体に触れられない。
 (b) 対象物の横幅が広すぎると、指が物体側面に届かない。

Fig. 4.25: 対向把握が適さない場合 [70].

る。よって、正面吸引した場合、円筒把握への切り替えは行わない。対向把握への切り替えは、指が届くほど対象物が高く、横幅が狭い時のみ行われる。Fig.4.25 に対向把握が適さない場合を示す。円筒把握も対向把握も可能である場合は、円筒把握の方が対象物を吸引パッドに押し付けられて安定となるため、円筒把握が選択される。

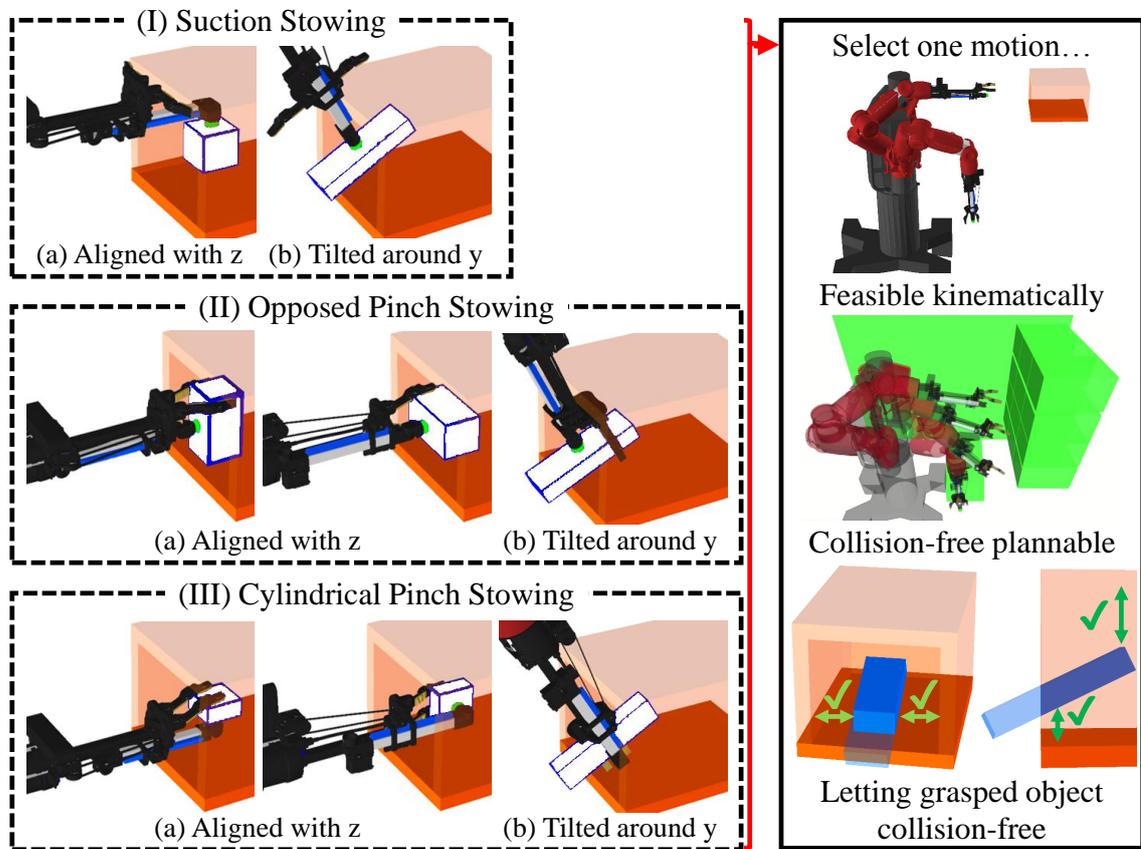


Fig. 4.26: EP 戦略の概要 [70].

Entrance Passing 戦略

EP 戦略は棚のピンの入口を把持した物体が通過できるようなストーイング動作を生成しなければならない。これを達成するため、Fig.4.26 に示すように、全てのピッキング動作の後処理をカバーした6つの動作を用意した。これらの動作は、吸引着ストーイング、対向把握ストーイング、円筒把握ストーイングの三種類に分けられる。吸引着ストーイングは、吸引着によるピッキングは成功したものの、安定な把握への切り替えに失敗した場合に選択される。対向把握ストーイングは、吸引着から対向把握への切り替えが成功した場合に選択される。円筒把握ストーイングは、直接的な円筒把握もしくは円筒把握への切り替えが成功した場合に選択される。

各ストーイングには二種類の動作がある。一種類目の動作 (Fig.4.26 における (a)) は、把持した物体を z 軸に揃えたストーイングである。二種類目の動作 (Fig.4.26 における (b)) は、

把持した物体を y 軸周りに少し傾けるストーイングである。傾けることで、ハンドとピンの壁との干渉を回避しつつも、把持した物体の重心をピンの内部に収めることができる。動作 (a) は自然な動作であり、動作 (b) に比べて干渉なしでピンの奥まで物体を移動させられるため、物体をピンから落としにくいと考えられる。しかし、動作 (a) ではピンの壁と干渉してしまうような形状を持つ物体も存在する。この場合、動作 (a) とは異なる姿勢で物体を収納する動作 (b) が有効である。吸引は y 軸や z 軸周りで大きく回転させられるほど安定ではないと考えられるため、吸引ストーイングの動作 (b) における物体姿勢は、動作 (a) における物体姿勢と比べて、主に x 軸周りに回転させたものになる。一方で、把握は十分に安定で物体姿勢を自由に变化させられるため、吸引ストーイングを除いたストーイングの動作 (b) における物体姿勢は、 y 軸や z 軸周りで大きく回転したものを取れる。

これらの動作の内、以下の条件を満たしたものが選択・実行される。

- 動作内の全てのハンド位置姿勢が運動学的に実現可能であり、逆運動学を解くことでロボットの関節角度列が得られる
- 干渉回避動作計画が成功する
- 把持した物体がピンの壁と干渉しない

最後の条件は、トートにおけるピッキングの際に認識された物体寸法を用いて確認する。この確認により、把持された物体がピンの入口を通過できることが保証される。確認では、仮想の物体モデルに対して確認対象の動作を行ってピンのモデルに入れてみて、物体モデルのピン内部に入った部分の頂点の位置を調べ、それがピン内部に入っていなかった場合に干渉と判定する。Fig.4.27 に条件を満たす場合と満たさない場合を示す。適切な動作の探索は、含有する物体の体積が少ない順に配列されたピンに対して順番に行われる。ピンの配列は、全てのピンになるべく均等に物体を収納するために必要である。各ピンにおいて、初めに動作 (a) を確認し、その後動作 (b) を確認する。この確認順は、物体をピンから落としにくい動作 (a) を優先するためのものである。全条件を満たす動作が一つでも見つかり、その時点で探索は終了する。まだ未確認の動作においても全条件が満たされる可能性はあるが、(a) から (b) への確認順やピンの配列によって優先度順に探索しているため、最初に全条件を満たすことがわかった動作の方が後からわかった動作よりも望ましい。全ての動作が条件を満たせなかった場合は、把持している物体をピッキング前とは異なる位置姿勢になるようにトートに戻す。また、動作 (b) においては特に、ストーイングされた物体がピンからはみ出す可能性があるため、はみ出した部分をピン内部に押し込むための動作がストーイング後に

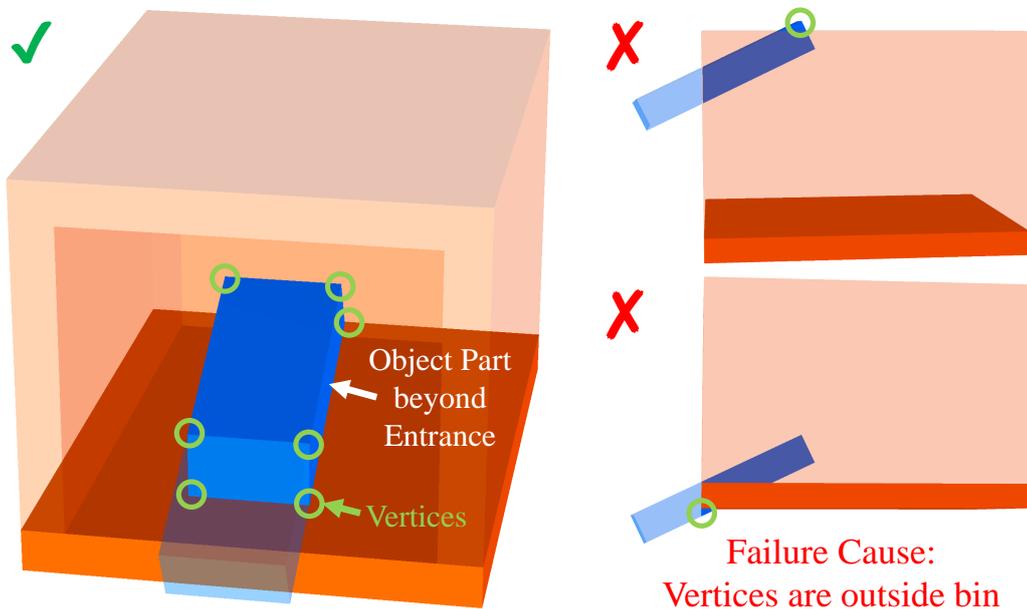


Fig. 4.27: 左：把持された物体がピンの壁と干渉しない場合 [70]．右：把持された物体がピンの壁と干渉する場合 [70]．数個の頂点がピン内部に入っていない．

必要になる．

4.4 非剛体物体への応用

前節までは、操作対象物が剛体であると仮定し、それを扱えるハンドの動作と構造を設計してきた．本節では、操作対象物が単純な剛体ではない場合に関して、動作構造同時設計論の要素を応用する．

4.4.1 可変形状物体の操作

Fig.2.5 や Fig.2.6 , Fig.2.7 に示したような、持ち上げると変形する本のような可変形状物体について、初期状態を剛体近似して把持を設計すると、変形を矯正できない把持 (Fig.2.5) や、垂れ下がった部分に指が届かなくなり実行困難となる把持 (Fig.4.28 b) が含まれてしまう．このような問題のある把持を除外するため、把持移行期リスク r を応用した定式化を行う (Fig.4.28) ．まず、物体を少数の剛体の連結体に近似する．物体持ち上げ後の各剛体セグメントに対して、把持移行期リスク r を計算し、高い r を示すセグメントが存在した場

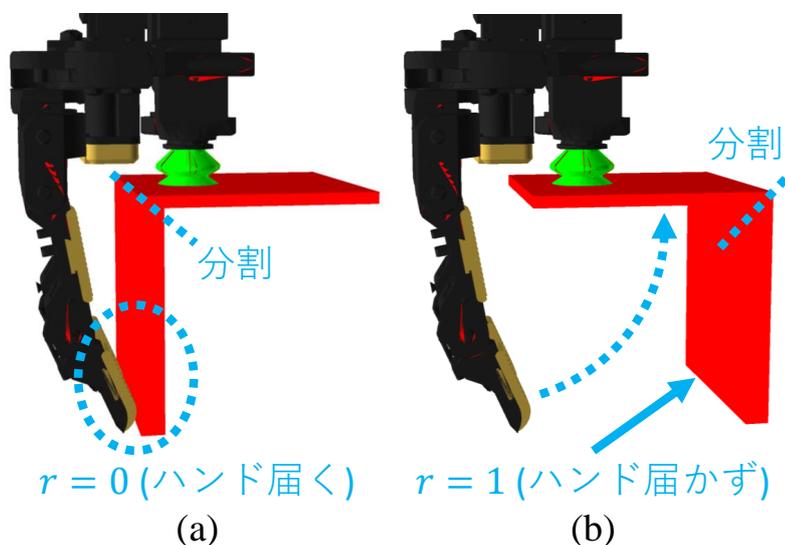


Fig. 4.28: 可変形状物体の垂れ下がった部分の把持移行期リスク r

合，問題のある把持となってしまうと判定できる．この手法は，物体持ち上げ後のセグメントの姿勢がわかることが必要であり，これはヒューリスティックに与えるか，動力学シミュレータにより取得する必要がある．

また，可変形状物体を操作するに当たり，4.2.5項で構成したハンドに改良を加え，Fig.4.29に示す吸引挟み込みハンドを構成した．改良を加えるに当たり，狭隘空間での吸引動作のための伸展可能な細い吸引指や，多様物体を安定に把持する能力を損なわないように注意した．吸引機構と把握機構の動作を Fig.4.30 に示す．

吸引機構

本のような厚い可変形状物体を吸引してから把握するためには，指表面と真空パッドのリップ表面が十分に離れた平行状態を取れるようにする必要がある．しかし，4.2.5項のハンドでは環境として柵のみを考えていたため，Fig.4.31aに示すように，真空パッドの向きによっては真空パッドが指の長さに対して突出しすぎ，指表面とリップ表面が距離を取って平行になることさえ不可能であった．この弱点を修正するため，直動関節の可動域を変更して真空パッドをより掌近くまで引けるようにする．加えて，掌と指の基部を突出させる．以上の変更により，Fig.4.31bに示すように，指表面とリップ表面の間に 33 mm の距離を作ることに成功した．

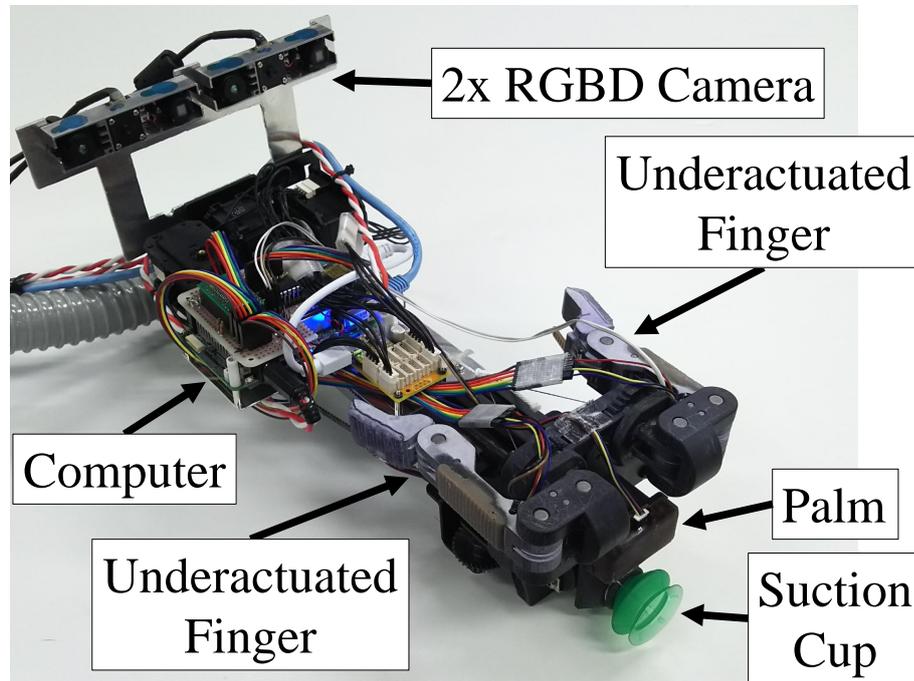
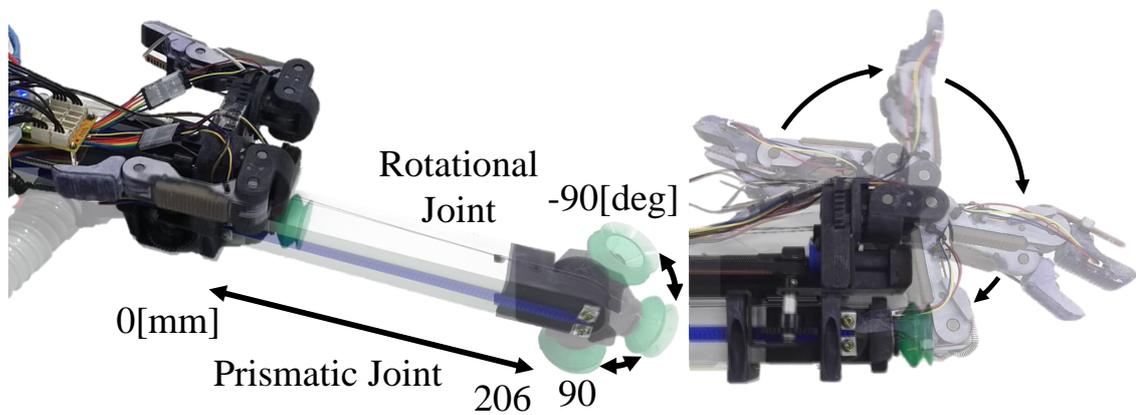


Fig. 4.29: 可変形状物体の操作を考慮した吸引挟み込みハンド [44].



(a) 吸引指の動作．206 mm の伸展と，180 度の回転が可能である．
 (b) 把握機構の動作．指リンクの中で最長のものは，270 度回転する．

Fig. 4.30: ハンドの自由度 [44]．異なる時点でのハンドの状態を半透明にして重ね合わせて表示している．(b) のような大可動域は，指根本付近の二関節により実現されている．(a), (b) で動かしている関節の他に，指の台座に内転/外転関節が入っている．

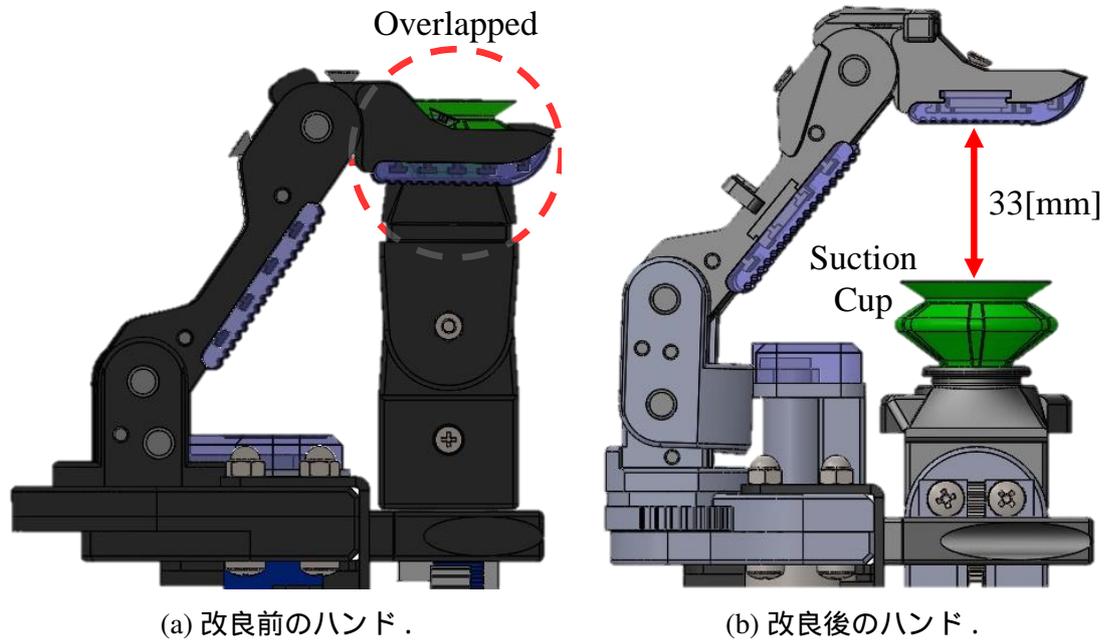


Fig. 4.31: 指と真空パッドの位置関係に関する改良前のハンドと改良後のハンドの比較 [44]. 指表面を真空パッドのリップ表面と平行にすると, 改良前のハンドでは指とリップの間に隙間がなかったが, 改良後のハンドでは 33 mm の隙間ができている. これにより, 改良後のハンドは本のような厚い可変形状物体を把握できるようになった.

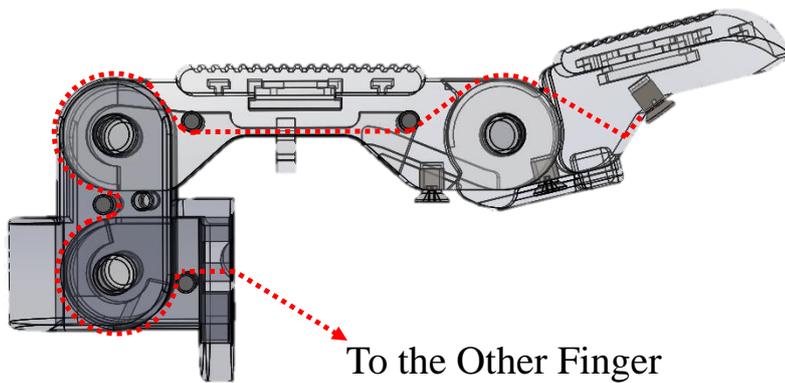


Fig. 4.32: 大可動域を実現するための腱経路 [44]. 赤い破線で示されているのが腱経路である.

把握機構

把握機構に対する要求仕様として、掌のセンサを用いた動作をしている際に指がその動作を邪魔しないことを設定した。そのためには、障害物に指を押し付けてしまってハンドが動けなくなる事態を防止しなければならない。これを達成するため、Fig.4.30b に示すように、4.2.5 項のハンドの劣駆動指を改良して、掌より後部まで折れ曲がるようにした。指が障害物に当たると受けた反力で収納方向に回るようになったため、障害物に指を押し付ける事態を防止できるようになった。掌より後部まで折れ曲がるという大可動域を実現した指内の腱経路を Fig.4.32 に示す。

4.4.2 薄く脆弱な物体を操作可能な吸着機構の構造実現

前項のように物体を少数の剛体の連結体に近似して設計した動作は、少数の剛体の連結体とはみなせない実態を持つ物体に対しても、以下の条件のいずれかを満たせば実行可能である。

- 剛体セグメントに近似した部分が動作中に変形しない
 - 動作中に変形しても動作終了前には元に戻るなど、変形がタスクの成否に影響しない
- よって、設計された動作を一度シミュレータもしくは実機で試行し、タスクの成否を確認することで、その後繰り返せる動作を決めることはできる。しかし、このような物体に対して、吸引を用いるべきなのかは未考慮である。前章で触れたように、空気吸引を厳密に見ると、真空パッド内部の空洞に隣接する部分のみで吸引力が発生し、パッドのリップに接触する部分では垂直抗力のみが発生している。剛体に対しては、この不均一性は特に問題にならず、前章で述べたように吸引力を接触点に分配した等価モデルで考えればよい。しかし、物体によっては、この不均一性が問題となる。例えば、紙などの薄く脆弱な物体だと、パッド内部に対象物が引き込まれ、傷つくことがある。これを原理的になくすためには、接触面の各微小部分において均一に働く吸着力を利用することが有効である。吸着は吸引に比べて力が弱く、めくれ方向の応力がかかると剥離しやすいという問題があるため、早期に複数の指を利用して把持安定余裕の高い把持に移行することが重要になる。

ロボットにおける吸着機構

ロボットにおける吸着機構を、吸着手段と搭載箇所に着目してまとめたものを Fig.4.33 に示す。ロボットにおいて利用されてきた吸着手段を大きく分けると、粘着物質 [33, 34, 35, 105]、

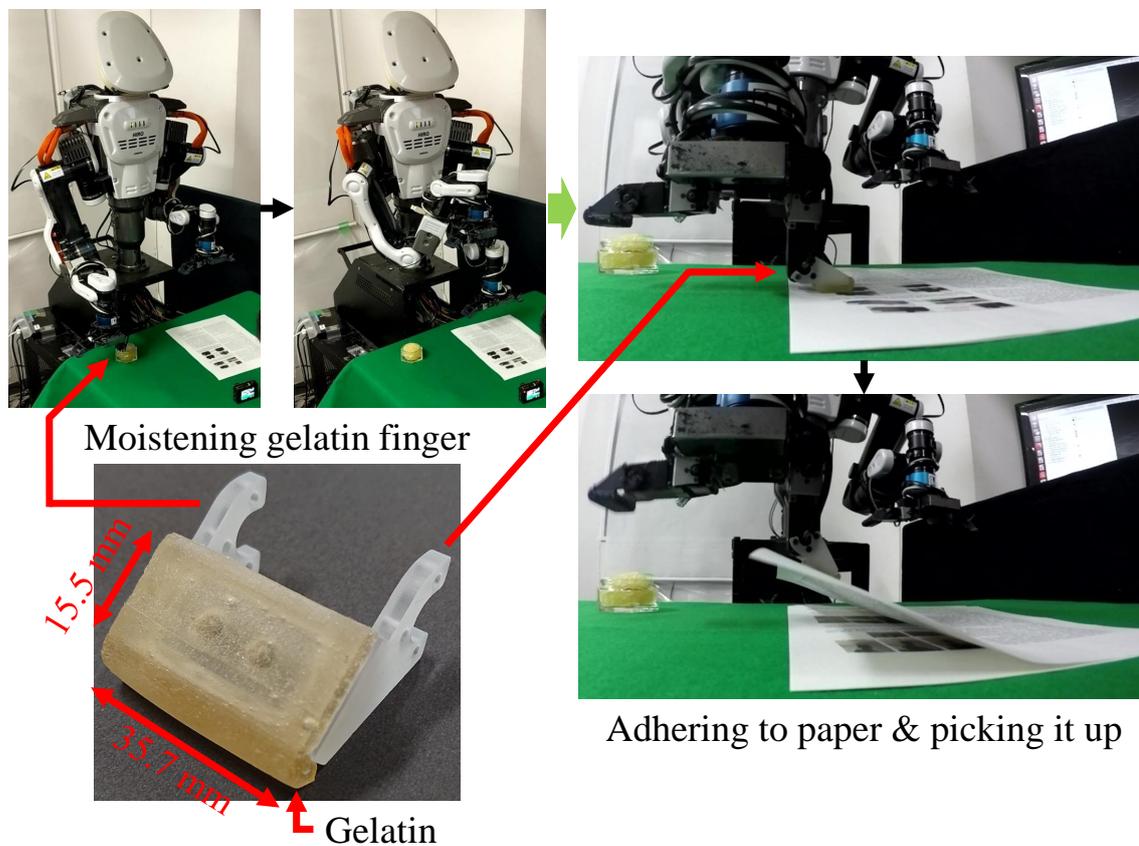


Fig. 4.34: ゼラチンロボットフィンガとそれによる紙一枚分離持ち上げ動作の実現 [111].

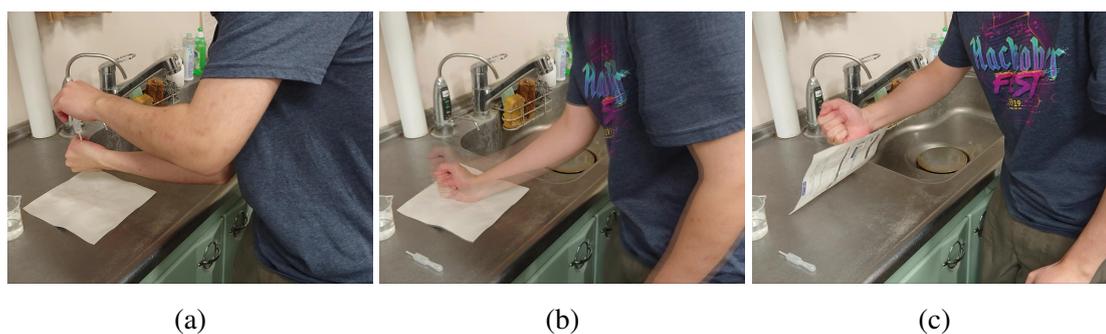


Fig. 4.35: 人間の皮膚が吸着現象を起こすか確認した実験 [111]. 中性洗剤で洗浄し水分を拭き取った手に、(a)のようにスポイトで水を一滴垂らした後、(b)のように何度か紙に押し付けて水を広げると、(c)のように紙に吸着して持ち上げられるようになった。このことから、人間の皮膚では吸着現象が起きることがわかった。

人間の皮膚の吸着現象には吸盤効果だけでなく、皮膚の素材の特性が大きく影響していると考えた。そこで、皮膚の素材に関係があり、入手性が良く、吸着現象を起こせる物質として、ゼラチンに着目した。ゼラチンは動物の皮膚や骨を構成しているコラーゲンを加水分解して得られる物質であり、古くから接着剤（にかわ）として使われてきた [112]。乾燥したゼラチンには粘着性がないが、水で濡らすと吸湿して粘着性を発現する [113]。この性質が人間の皮膚の吸着現象の模倣に適していると考えられる。また、ゼラチンは冷水に溶けない一方で温水には溶けてゼラチン水溶液となるが、これを冷却すると硬化するため、水溶液の間に型に注いで固めた後に型から取り外すことで、構造物を作ることができる [114]。この性質により、ロボットに組み付けやすい吸着機構を構成することが容易になると考えられる。さらに、ゼラチンは可食である [115] ため、ゼラチン製のロボットフィンガは食品の安全性を損なわないままそれを操作できる可能性を秘めていると言える。

本研究では、ゼラチンで造形した滑り止めパッドを装着したロボットフィンガを開発する。吸着対象物体からの剥離時にゼラチンが残ることを防ぐため、造形に用いるゼラチン水溶液を高濃度にし、ちぎれにくい造形物とする。また、水分を含んだゼラチン造形物にはカビが生えやすいため、構造を作ることができる性質を活かして埋め込んだナットを介してフィンガの他の部分と結合することで着脱可能とし、ゼラチン部の交換・殺菌に対応する。このフィンガを適度に湿らせて吸着性を発現させ、積み重なった紙から一枚のみを持ち上げ扱う動作を実現する。

吸着可能なロボット皮膚のゼラチン造形による構成法

本節では、ゼラチン造形によってロボットフィンガを構成する手法について述べる。指紋が転写された人工指をゼラチンを用いて製作する研究 [114] における手法をベースとしつつ、構成対象がロボットフィンガに変わったために必要になった検討を行い、ロボットフィンガに適応させた手法を提案する。一つの検討から手法の複数段階が決定していることがあるため、まず最初に新手法全体の流れを説明し、その手法に至った検討内容を後から説明する。新手法は以下の段階で構成されている。要所の写真を Fig.4.36 に示す。

1. 造形に用いる蓋付き瓶（容量約 40 mL）を用意し、蓋を除いた質量を量る
2. 以下の操作を 6 回繰り返す
 - (a) 板ゼラチン（マルハニチロ株式会社のゼラチンリーフ）を一枚（1.5 g）取り、両



Fig. 4.36: ロボットフィンガに適應させたゼラチン造形手法の要所 [111] . 段階番号は本文中の箇条書きの番号に対応している .

面に流水を素早くかけた後に振って水を切る

(b) 少し待つとゼラチンが軟化して割らずに畳めるようになるので、粘着性が強まる

前に瓶に入るサイズに畳んで瓶に入れる

3. ゼラチンが入った瓶の質量を量り，段階1での質量より18g多くなるまで水を加え，蓋を閉めて3分間ふやかす
4. 瓶内部に泡が発生する瞬間まで電子レンジで加熱し，蓋を開けてかき混ぜた後，再び蓋を閉める．これにより，50 wt.%のゼラチン水溶液（ゼラチン9g・水9g）となる
5. 以下の操作を溶液中の気泡が少なくなるまで（5回程度）繰り返す
 - (a) 流動性がなくなるまで空冷する
 - (b) 元の流動性を取り戻すまで，瓶内部に泡が発生しないよう注意しながら電子レンジで加熱する
6. 蓋を開けてゼラチン水溶液表面の膜を除去し，液体部分のみを60°Cに予熱しておいた型に一気に注ぐ
7. 60°C設定の恒温槽に10分間入れ，ゼラチンを型内部に行き渡らせる
8. 冷蔵庫に10分間入れてゼラチンを硬化させる
9. ゼラチンを型から取り外し，漏斗部分を切除する

使用するゼラチンの選択とその使用法

先行手法 [114] ではマルハニチロ株式会社の板ゼラチンであるゼラチンリーフを用いているが，ロボットフィンガに適しているのか再検討した．安価で入手が容易な料理用ゼラチンには，板・粉・顆粒の三種類の形状がある．粉ゼラチンと顆粒ゼラチンの違いは，温めたゼリー化したい液体に入れる前に冷水でふやかす必要があるかないかである．三種類の内，板ゼラチンで作るゼリーが最も透明であると言われており，先行手法 [114] で用いられた高濃度ゼラチン水溶液に近い高濃度域においても同じ傾向にあることを，Fig.4.37 に示すように確認した．造形物が透明になれば，将来的にフィンガ内に埋め込む触覚センサとして光学式センサを選択できるようになり，センサ数低減や近接覚検出の面で有利である．そこで，本研究においても板ゼラチンを使用することとした．さらに，動物の皮膚を原材料とするゼラチンが本研究の目的に即しており好ましいと考えられるため，原材料が豚の皮であるゼラチンリーフを先行手法 [114] と同様に使用することが適切であると判断した．

先行手法 [114] では沸かした水を瓶に入れてゼラチンを加えることになっているが，実際に行ってみたところ，ゼラチンの溶解に時間がかかってかき混ぜ回数が増え，大量の気泡が



Fig. 4.37: 高濃度ゼラチン水溶液による造形物の透明度に関するゼラチン形状の比較 [111]. 板ゼラチンは気泡を除けば透明であるのに対し，粉・顆粒ゼラチンは完全に不透明である．粉ゼラチンはゼライス株式会社のゼライスゼラチンパウダーを，顆粒ゼラチンは新田ゼラチン株式会社のニューシルバーを用いた．

混入した．この気泡の除去には非常に手間と時間がかかるため，最初から気泡の混入量を抑える工夫が求められた．また，先行手法 [114] では一回の造形でゼラチン 30 g と水 30 mL を使用しているが，ゼラチンを節約するため使用量を減らしたところ，大きな容器から型に注ごうとすると，ゼラチン水溶液が容器壁面を移動している間に冷却され，流動性が損なわれて注ぎにくくなった．これを踏まえて容器を小さくすると，容器に入れるために板ゼラチンを小さく裁断する必要が生じた．これらの問題を解決するため，板ゼラチンに冷水を吸わせて柔らかくすることで，簡単に畳んで容器に入れられるようにするとともに，吸わせた水分を電子レンジで直接加熱することで，かき混ぜ前からゼラチンが溶けている状態にすることに成功した．水を吸わせる手法は通常の料理手順に倣うことを考え，板ゼラチン一枚 (1.5 g) をたっぷりの冷水に浸けて3分ふやかしてみたが，4 g の水を吸ってしまい，先行手法 [114] における濃度 50 wt.% を再現するのが困難であった．そこで，適度にむらなく水を吸わせる手法として，板ゼラチンの両面に流水を素早くかけた後に振って水を切るという手法を考案し，有効性を確認した．この手法では逆に水が不足するので，瓶に入れた後で足りない量の水を追加する必要がある．

ゼラチン水溶液中の気泡削減

先行手法 [114] では瓶の蓋を閉めたまま電子レンジによる加熱と冷却を繰り返すことで気泡を削減することになっているが，手間と時間がかかるため，通常のゴム造形で用いられる真空脱泡を検討した．実際にゼラチン水溶液を真空脱泡してみたところ，泡の膨張に伴って

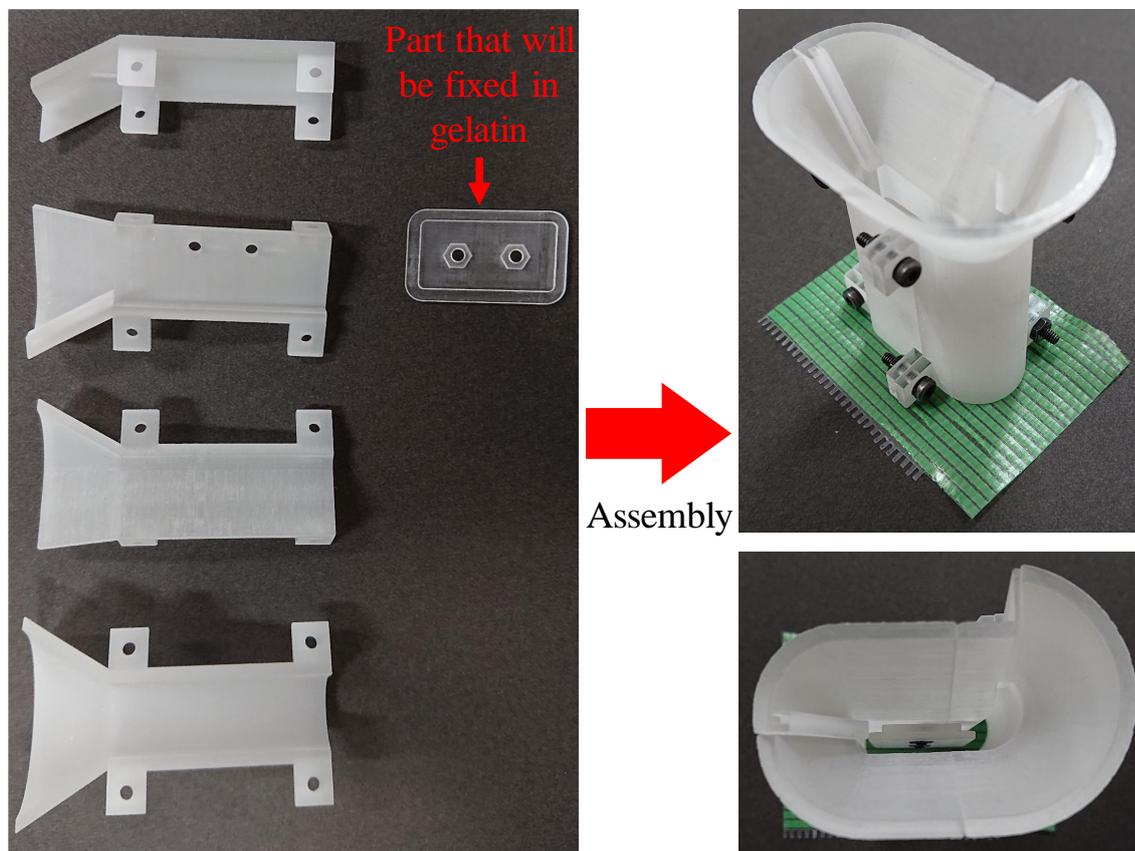


Fig. 4.38: 3D プリンタで製作したゼラチン型 [111] .

容器側壁に広がったゼラチンがそのまま固まってしまう、電子レンジや湯煎で再加熱しても注げる状態に戻らなかった。これは、水分が抜けてしまったせいだと考えられる。そこで、先行手法 [114] と同様の気泡削減方法を採用した。なお、電子レンジによる加熱と冷却を繰り返した場合でも、ゼラチン水溶液表面の水分は抜けて硬化するが、硬化は表面に留まって膜のようになるため、段階6で述べたように簡単に除去できる。

型の準備と後処理

先行手法 [114] では熱可塑性樹脂に人間の指を押し付けて型を製作していたが、本研究ではCAD上で設計した滑り止めパッド形状にゼラチンを造形する必要があるため、その手法について検討した。ゼラチンを造形するために3Dプリンタで製作した型をFig.4.38に示す。ゼラチン硬化後の取り外しのため、型は分割できるようになっている。分割された型の一つ



Fig. 4.39: 型の溶液注入口が固まった溶液で塞がった様子 [111] .

が、かえしによってゼラチン造形物に固定された状態になり、その型に埋め込まれたナットがロボットフィンガの他の部分との接続部となる。ここで、型上部が漏斗形状になっているのは、ゼラチン水溶液を一気に注いでも型から溢れないようにするためである。操作対象物体と接触する面の形状を設計できるようにするため、滑り止めパッド側面を溶液注入口とした結果、注入口の幅が4.5 mmと狭くなって溶液を入れにくくなり、型全体に行き渡る量の溶液を注ぐ前に注入口が塞がり冷え固まってしまった (Fig.4.39)。そのため、漏斗形状を頼りに溶液を一気に注いだ直後に恒温槽に入れ、溶液の硬化を遅らせて型全体に行き渡らせるという手法を考案した。空気の出口を考慮しながら注ぐことができないため、注入口の一部を空気穴とし、その上部を溶液が塞がないように漏斗形状を設計した。溶液は多めに注ぐため、漏斗部分にも残って造形されてしまうが、その部分は硬化後に簡単に切除できる。

吸着皮膚の殺菌による保全

前述の手法により構成されたロボットフィンガのゼラチン部には水分が含まれているため、カビなどの微生物が発生しやすい。一方で、ゼラチン部を乾燥させすぎると弾性が失われ、滑り止めパッドとしての機能を果たさなくなる。そこで、ゼラチン部を取り外し



Fig. 4.40: スピリタスを用いたゼラチン部の殺菌工程 [111] .

でエタノールによる殺菌を行うことで、カビなどの発生を防止することを考えた。ここで、日本薬局方に従った消毒用エタノール（エタノール濃度 76.9–81.4 vol% で残りは水）をゼラチン造形物に塗ってみたところ、造形物が水を吸収して粘着性が生じてしまい、造形物の状態を維持した殺菌が難しいことがわかった。これに対し、無水エタノール（濃度 99.5 vol% 以上）を試したところ、粘着性は生じず、超高濃度のエタノールを用いる必要があることが判明した。また、ゼラチン造形物を無水エタノールに一週間漬けてみたところ、消毒用エタノールの場合とは逆にゼラチンから水分が抜けて弾性が失われた。以上から、超高濃度エタノールによる短時間の洗浄を定期的に行うことで、ゼラチン部の状態を維持しながらカビなどの発生を防止できると考えられる。ここで飲用不可な無水エタノールを使ってしまうと、ゼラチン部に有害物質が残留する可能性があり、将来的に食品を操作しようとした場合に、その安全性を損なうようになってしまおうと考えられる。そこで、飲用可能なエタノールの中で最高の濃度を持つスピリタス（濃度 96 vol%）を用い、Fig.4.40 に示すような殺菌工程を最低二日に一回行っている。

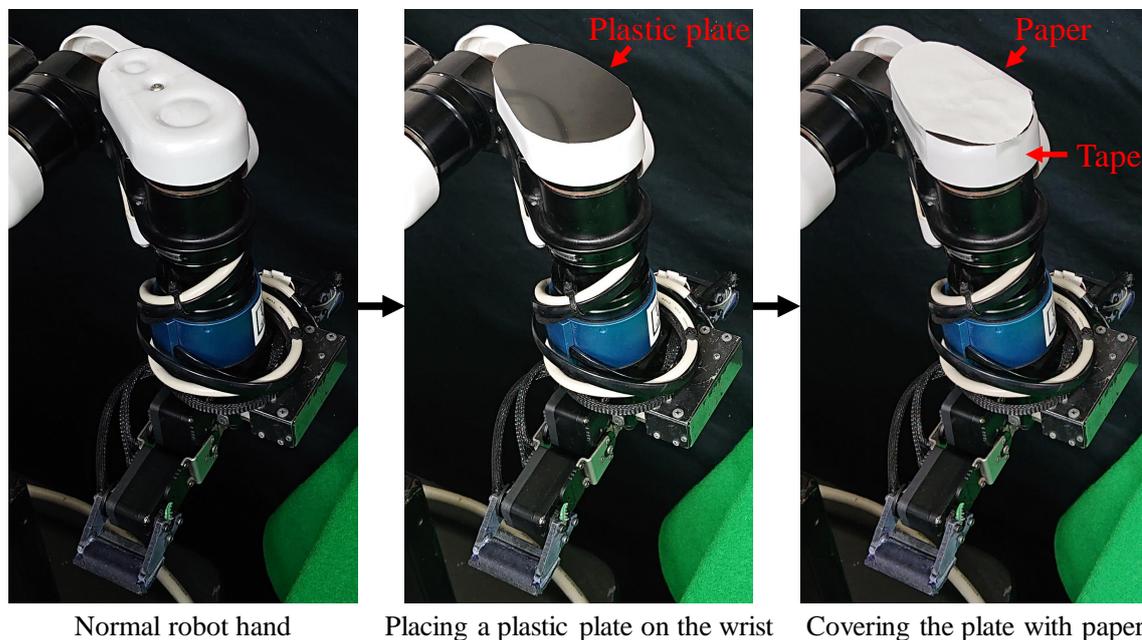


Fig. 4.41: 濡れたフィンガを押し付けるための紙のロボット手首への貼り付け [111]。手首の外装には凹凸があったため、プラスチック板（厚さ 0.54 mm）を被せて押し付け面が平坦になるようにした上で、紙を被せてテープで固定した。

吸引着皮膚の吸引着発現法

ゼラチンフィンガの吸引着を発現させるためには、フィンガを適度に湿らせる必要がある。本研究では、人間の事務作業にヒントを得て、濡らした事務用海綿にフィンガを触れさせることでフィンガを濡らす。しかし、これだけでは、フィンガの吸引着は十分に発現しなかった。原因としては、水が水滴として付着するためむらがあり、水が付いている場所でも水が多すぎて吸引着の邪魔になったことが考えられる。そこで、ゼラチンフィンガを組み付けた腕とは反対側の腕の手首に、Fig.4.41 に示すように紙を貼り付け、そこへの濡れたフィンガの押し付けを繰り返すことで、水の拡散と余分な水の除去を行った。これにより、紙を操作することのできる吸引着を発生させられるようになった。

吸引着評価実験

実現されたゼラチンフィンガの吸引着を計測する実験を行った。この実験では、テープで一体化された紙束（21 g）を電子天秤上に置き、そこに自動で湿らせたゼラチンフィンガを押し付けた後、吸引着が剥がれるまでフィンガを引き上げる。Fig.4.42 に実験の様子を示す。

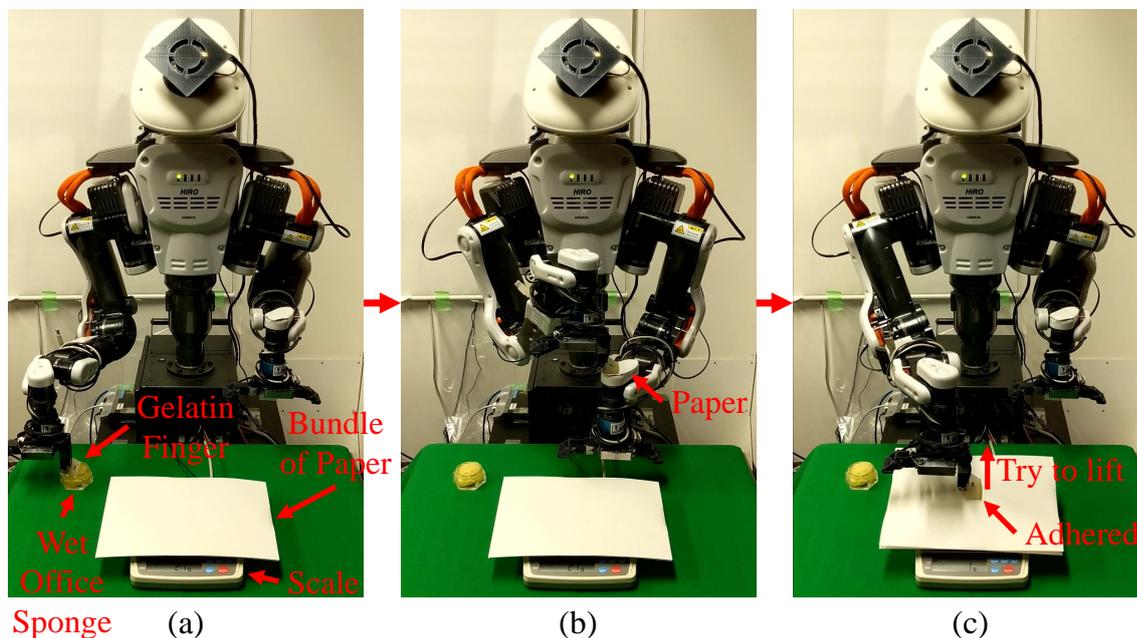


Fig. 4.42: 吸着力評価実験の様子。(a) 事務用海綿でフィンガを濡らし、(b) 手首に貼り付けた紙へのフィンガの押し付けを繰り返して吸着性を発現させ、(c) 電子天秤上の紙束を吸着して持ち上げようとする。

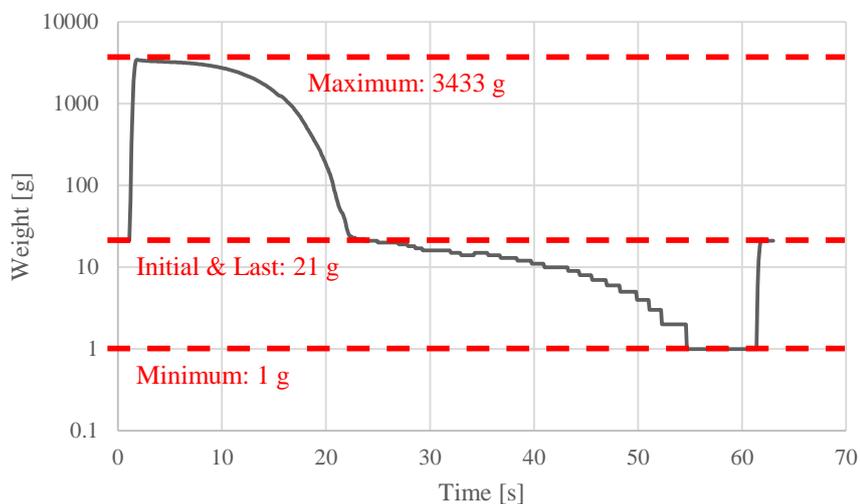


Fig. 4.43: 吸着力評価実験における電子天秤計測値の時間変化。

電子天秤が記録した重量からフィンガが発生させた力を計算する。Fig.4.43 に実験中の電子天秤計測値を示す。電子天秤が記録した最小重量は1gであった。紙束の重量は21gなので、

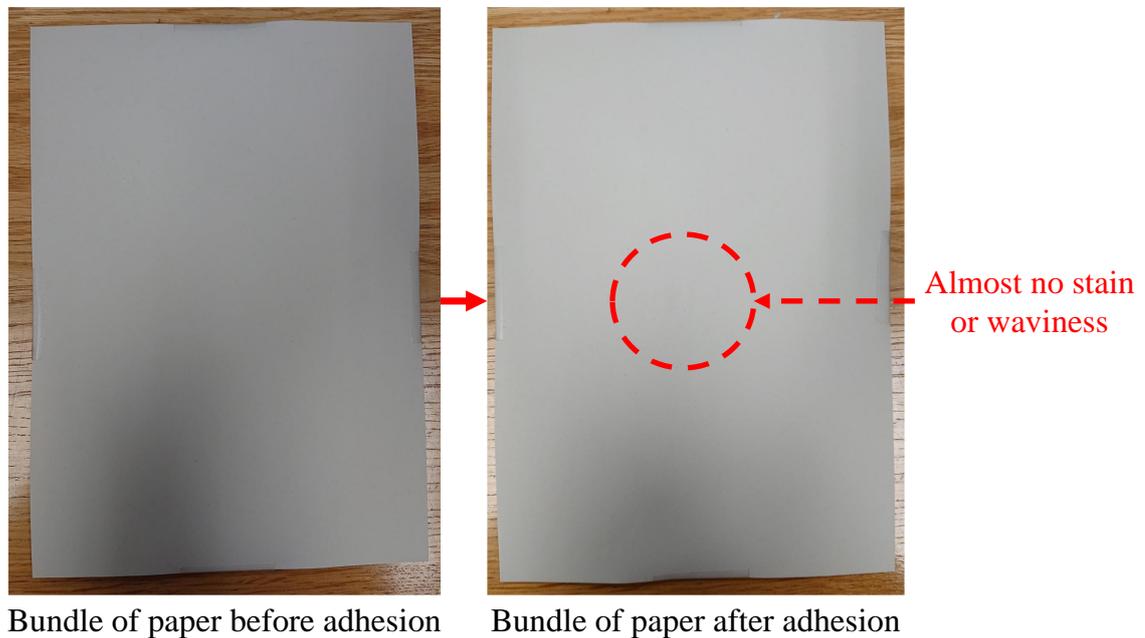


Fig. 4.44: 吸着前後の紙束の比較．吸着後の紙束に染みや波打ちはほぼ残っていない．

最大吸着力は $21\text{ g 重} - 1\text{ g 重} = 20\text{ g 重}$ である．これは、A4用紙1枚の重量(4g)と比較して十分に大きく、紙一枚を持ち上げられることが確認された．なお、電子天秤が記録した最大重量は 3433 g であったことから、 20 g 重 の吸着力を発揮するために必要な押付力は、高々 $3433\text{ g 重} - 21\text{ g 重} = 3412\text{ g 重}$ であることもわかった．吸着前後の紙束の比較を Fig.4.44 に示す．吸着後の紙束に染みや波打ちはほぼ残っておらず、対象物体をほぼ濡らさない吸着であることが確かめられた．

4.4.3 吸引機構と吸着機構の統合

多様な物体を一つのハンドで吸引着するためには、前項以前で述べた吸引機構と前項で述べた吸着機構を同一ハンド内に共存させ、対象物に応じて使い分けが必要となる．この時、物体操作において担う役割自体は、吸引と吸着で変化しないことから、どちらの力も同一箇所から発生するようにしておけば、吸引と吸着を切り替えた際の動作変更は最小限で済む．よって、吸引機構と吸着機構の統合を考え、空気吸引における真空パッドに着目した．前項の吸着機構で用いたゼラチンは弾性のある構造物を作ることができるため、真空パッドはゼラチンで作ることができると考えられる．このようにして構成された真空パッドは吸引

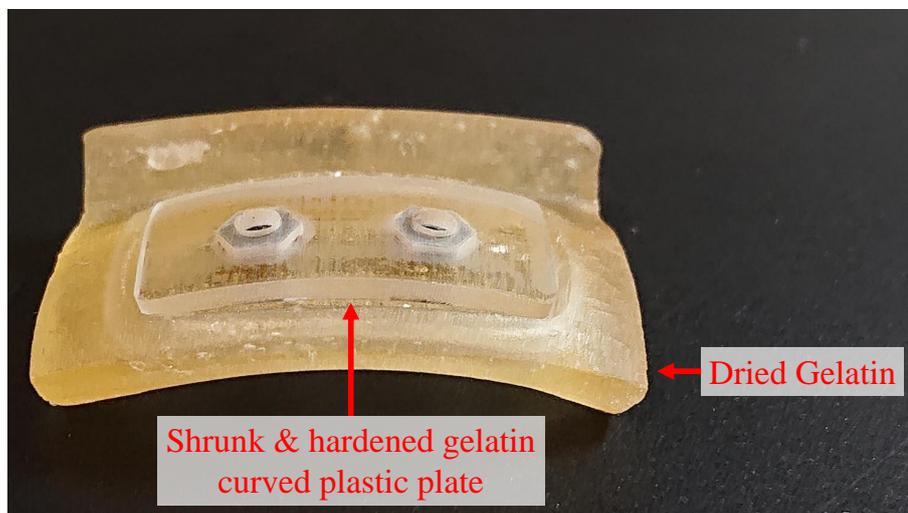


Fig. 4.45: ゼラチンと水分のみから構成された造形物の乾燥後の状態．造形物が収縮・硬化し、埋め込まれたプラスチック板を湾曲させている．

も吸着も行うことができ、吸引機構と吸着機構の統合が達成される．本項では、このような真空パッドの構成法について述べる．

乾燥後も一定の弾性を保つゼラチン造形物の構成

前項におけるゼラチン造形物はゼラチンと水分のみから構成されていたが、造形後大気中に放置すると徐々に水分が蒸発して乾燥し、造形物が収縮・硬化する現象が確認された．Fig.4.45 に乾燥したゼラチン造形物の様子を示す．特に、真空パッドをゼラチンで造形した場合、吸引時には内部を大量の空気が流れることになり、乾燥が一気に進むと考えられるため、乾燥による変形が作業中に発生し、作業に悪影響を与えられられる．そのため、ゼラチン製の真空パッドは事前に十分に乾燥させる必要があるが、従来のゼラチン造形物でこれを行うと、弾性が失われてしまい、真空パッドとして機能しなくなってしまう．よって、乾燥後も一定の弾性を保つゼラチン造形物が必要となる．これを達成するため、ゼラチンを用いた可食アクチュエータの研究 [115] において用いられた手法を用いる．この手法においては、ゼラチンを柔らかくする可塑剤としてグリセリンが採用され、ゼラチン水溶液に加えられている．グリセリンは 20°C ではほとんど気化しない [116] ため、十分な乾燥の後も、造形物の弾性を維持する成分として機能すると考えられる．

先行研究 [115] においては、ゼラチン：グリセリン：水 = 1：1：8（重量比）の溶液を硬

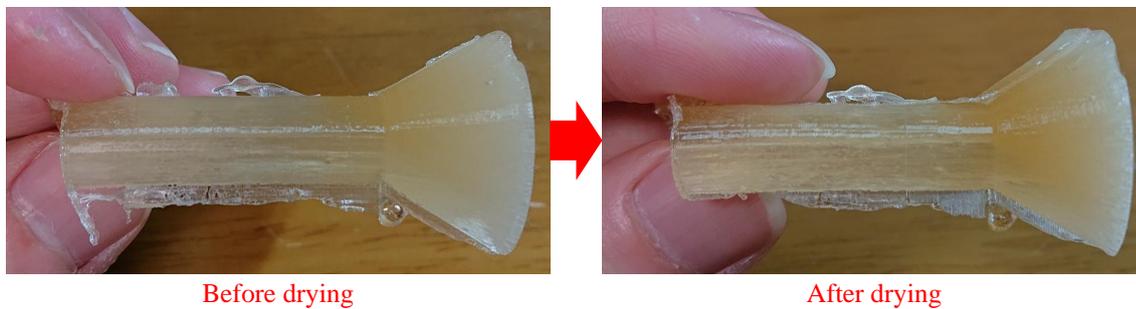


Fig. 4.46: ゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 2 : 3 の溶液による造形物の乾燥後の湾曲．

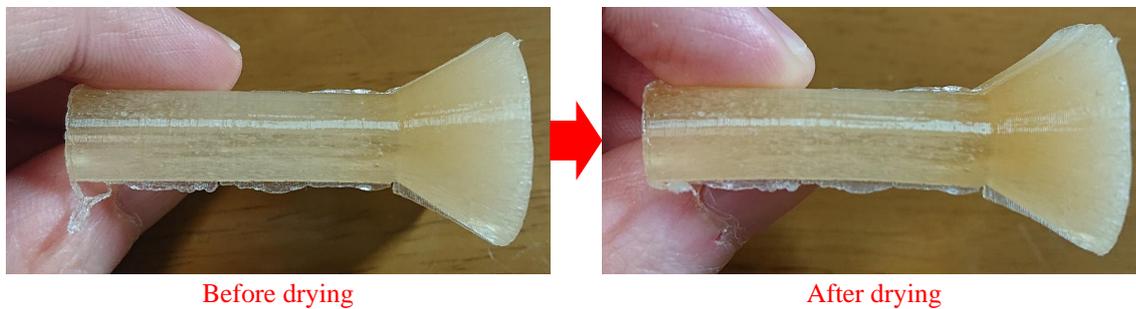
化・乾燥させた造形物と，1 : 2 : 8 の溶液を硬化・乾燥させた造形物の機械的性質が測定され，両者ともソフトロボットにおいて用いられるシリコンエラストマーと同程度の性質を有することや，後者の方が柔らかいことが確かめられた．また，室温で 48 時間乾燥させると水分の蒸発による重量減少はほぼ見られなくなることから，これが十分な乾燥であることが明らかになった．一方で，測定対象となった混合比では水の割合が非常に大きいため，乾燥時に大きな収縮が起こると考えられる．形状に機能を持たせた構造物を造形した場合，全体的な収縮やむらのある収縮によって形状が変化することで機能が損なわれる可能性がある．先行研究 [115] においても，空気圧アクチュエータを実際に造形する際には，水の割合を削減して ゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 2 : 3 とした溶液が用いられている．しかし，実際にこの混合比の溶液で造形した造形物を十分に乾燥させてみたところ，Fig.4.46 に示すように，造形直後は一直線だった造形物が湾曲するという変形が確認され，水の割合の削減が不十分であることがわかった．また，十分に乾燥させた後であっても，造形物表面に紙を持ち上げられる程度の粘着性が残っており（Fig.4.47），これが邪魔になる場面では問題となる．そこで，前者の問題の解決のために水の割合のさらなる削減を，後者の問題の解決のためにグリセリンの割合の削減を行った．前者に関しては，グリセリンのみでゼラチンを溶解させることはできず [113]，水が少なくなるほど溶液の粘度が低下することから，造形作業に支障をきたさない範囲で水の割合を削減することにした．後者に関しては，グリセリンを減らしすぎると造形物の柔軟性が失われてしまうことから，先行研究 [115] において十分な柔



Fig. 4.47: ゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 2 : 3 の溶液による造形物の乾燥後の粘着性．



(a) ゼラチン：グリセリン：水 = 2 : 3 : 2 の溶液による造形物の乾燥前後の形状比較．



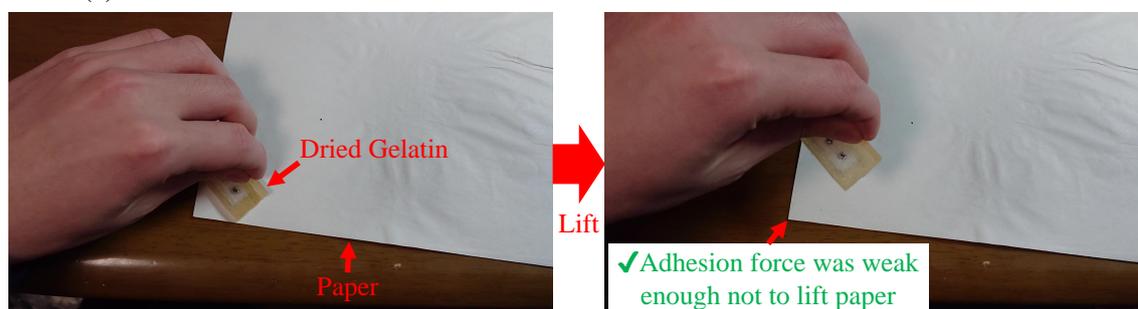
(b) ゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 1 : 1 の溶液による造形物の乾燥前後の形状比較．

Fig. 4.48: 新たな混合比の溶液による造形物の乾燥前後の形状比較．どちらにおいても，乾燥前後の変形は十分に小さい．

軟性が確かめられている ゼラチン：グリセリン = 1 : 1 までの範囲で，グリセリンの割合を削減することにした．ゼラチン：グリセリン：水 = 2 : 3 : 2 の溶液での造形とゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 1 : 1 の溶液での造形をそれぞれ試したところ，乾燥時の変形に関しては両者とも十分に小さくなった (Fig.4.48) 一方で，乾燥後の粘着性に関しては，前者の方が後者より大きく，定常的な発生を確認できる状態であった (Fig.4.49) ．以上から，ゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 1 : 1 を混合比として採用した．



(a) ゼラチン：グリセリン：水 = 2 : 3 : 2 の溶液による造形物の乾燥後の粘着性．



(b) ゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 1 : 1 の溶液による造形物の乾燥後の粘着性．

Fig. 4.49: 新たな混合比の溶液による造形物の乾燥後の粘着性．ゼラチン：グリセリン：水 = 1 : 1 : 1 の溶液による造形物の方が粘着性が小さい．

これに伴い，前項で提案した造形法の段階3において，水を加えた後に，さらに9g グリセリンを加えてからふやかす．すなわち，段階4においてできる溶液は，33.3 wt.% のゼラチン溶液（ゼラチン9g・グリセリン9g・水9g）となる．また，段階9を，型からの取り外しと漏斗部分の切除の二段階に分け，間に十分な乾燥（室温で48時間以上乾燥）を挟む．以上の変更を加えた造形法全体を以下に示す．

1. 造形に用いる蓋付き瓶（容量約40mL）を用意し，蓋を除いた質量を量る
2. 以下の操作を6回繰り返す
 - (a) 板ゼラチン（マルハニチロ株式会社のゼラチンリーフ）を一枚（1.5g）取り，両面に流水を素早くかけた後に振って水を切る
 - (b) 少し待つとゼラチンが軟化して割らずに畳めるようになるので，粘着性が強まる前に瓶に入るサイズに畳んで瓶に入れる
3. ゼラチンが入った瓶の質量を量り，段階1での質量より18g多くなるまで水を加えた後，さらに9g グリセリンを加え，蓋を閉めて3分間ふやかす

4. 瓶内部に泡が発生する瞬間まで電子レンジで加熱し，蓋を開けてかき混ぜた後，再び蓋を閉める．これにより，33.3 wt.% のゼラチン溶液（ゼラチン 9 g・グリセリン 9 g・水 9 g）となる
5. 以下の操作を溶液中の気泡が少なくなるまで（5 回程度）繰り返す
 - (a) 流動性がなくなるまで空冷する
 - (b) 元の流動性を取り戻すまで，瓶内部に泡が発生しないよう注意しながら電子レンジで加熱する
6. 蓋を開けてゼラチン水溶液表面の膜を除去し，液体部分のみを 60℃ に予熱しておいた型に一気に注ぐ
7. 60℃ 設定の恒温槽に 10 分間入れ，ゼラチンを型内部に行き渡らせる
8. 冷蔵庫に 10 分間入れてゼラチンを硬化させる
9. 造形物を型から取り外す
10. 造形物を室温で 48 時間以上乾燥させる
11. 造形物の漏斗部分を切除する

吸引着の剥がれにくさと造形の失敗しにくさを両立する真空パッド設計

真空パッドを吸引時に剥がれにくくするためには，吸引している面の姿勢変化に追従できるようにすることが重要である．これが，ゼラチン：グリセリン：水 = 1：1：1 の溶液による造形物の柔軟性で可能になるようなパッド形状を設計する必要がある．パッドの壁を厚くしすぎると，パッド全体としては硬くなり，Fig.4.50 に示すように，姿勢変化する面に追従できずに剥がれやすくなる．一方で，パッドの壁を薄くしすぎると，それを造形するための型の隙間が非常に狭くなり，粘度の高いゼラチン溶液を入れた際に気泡が抜けなくなって，Fig.4.51 のように造形が失敗してしまう．また，吸着に関しても考えると，パッドを濡らした後の水の拡散と余分な水の除去を行うためには，パッドを十分な押付力で紙に押し付ける必要があるが，パッドが柔らかすぎると十分な押付力を得ることができない．よって，吸引着の剥がれにくさと造形の失敗しにくさのバランスを取る必要がある．

最終的に採用した設計を Fig.4.52 に示す．外形に関しては，前項以前で述べた吸引機構で用いた真空パッドである，シュマルツ社の SPB1-30 [117] に近い形状にし，パッドを交換することで吸引機構に搭載可能とした．改善後の混合比であっても，乾燥時の若干の収縮はな

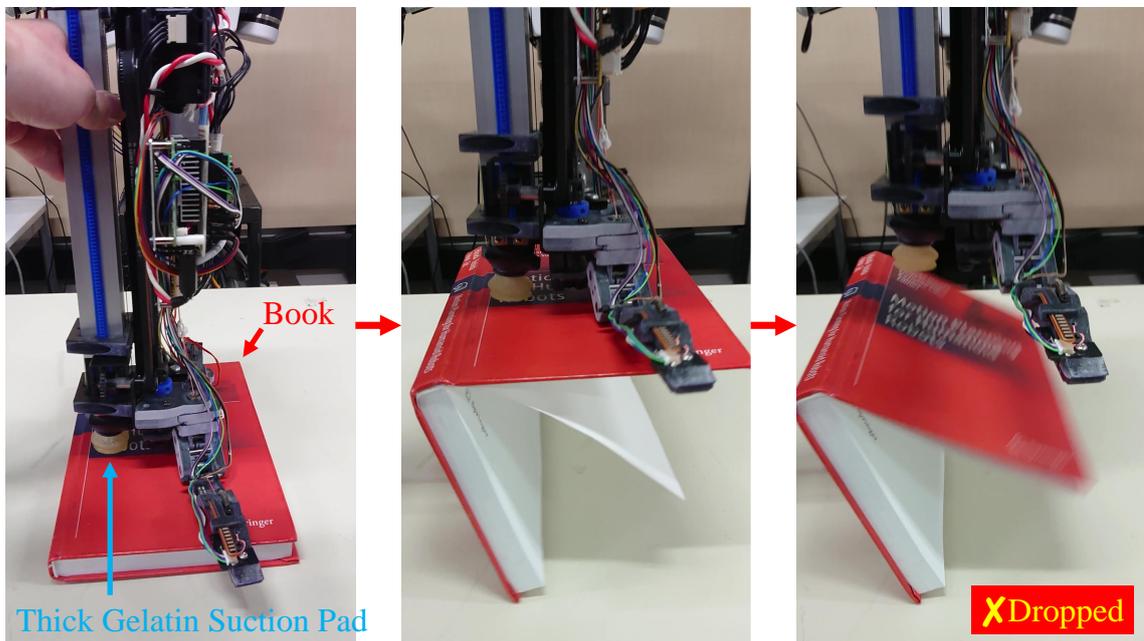


Fig. 4.50: 壁が厚い真空パッドにおける動作失敗例．吸引した本の表紙の姿勢変化に追従できずに剥がれてしまう．

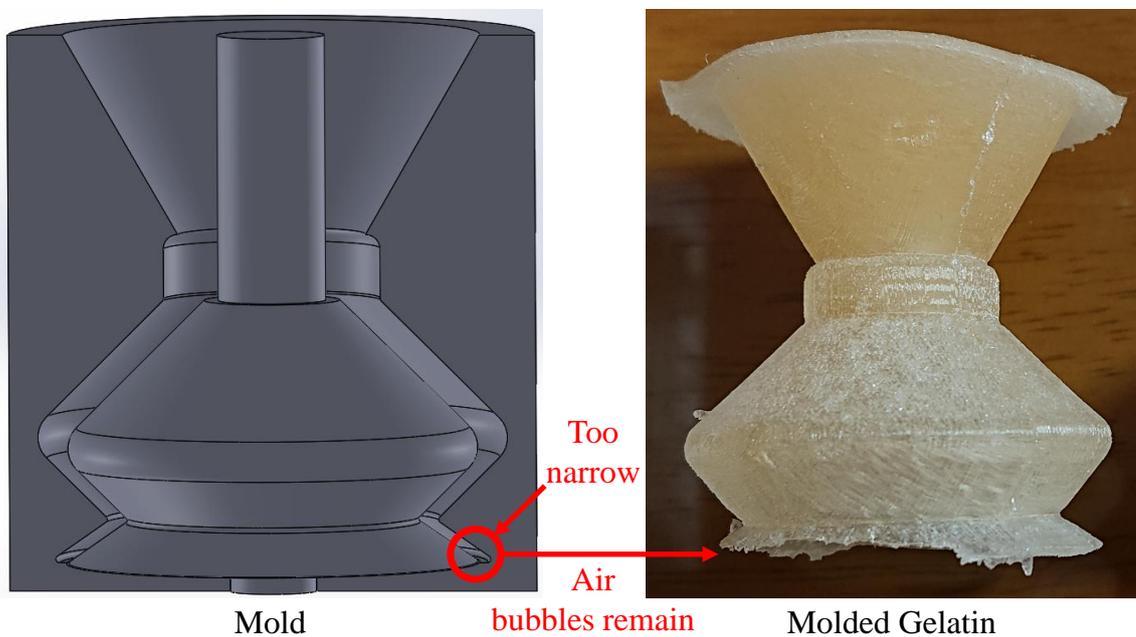


Fig. 4.51: 壁が薄い真空パッドにおける造形失敗例．狭い部分に残った気泡により造形物に亀裂が入り，離型時にその亀裂からちぎれてしまう．

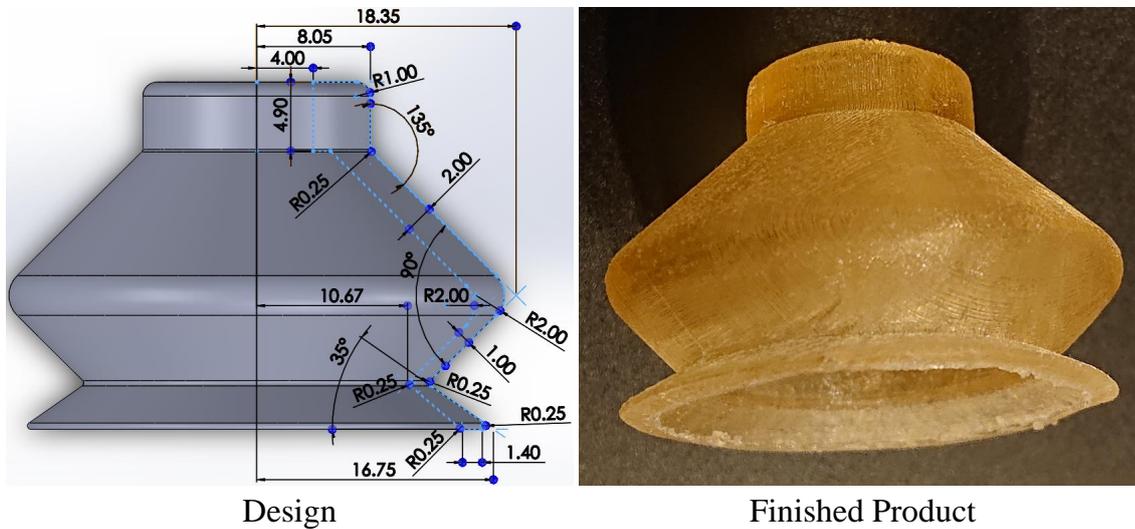


Fig. 4.52: 最終的に採用した真空パッド設計．左図における青い破線がパッドの壁を表す．

くせなかったため，吸引機構への圧入部には圧入成立に必要な厚みの分だけテープを巻く．圧入部からベローズの山までは，壁の厚みを 2 mm とすることで，吸着に必要な押付力を得るための剛性を確保する．一方で，ベローズの山からリップ部までは，壁の厚みをより薄くすることで，吸引している面の姿勢変化に追従するための柔軟性を確保する．ここで，壁の厚みを全て 1 mm とすると，Fig.4.51 のようにリップ部の造形に失敗したので，1 mm とするのはベローズの谷までとし，そこからリップ部までは徐々に厚くなる構造とすることで，造形失敗を防ぐ．以上のような壁厚設計により，Fig.4.53 のような姿勢変化する面への追従と，Fig.4.54 のような押し付けに基づく吸着性発現が実現されることを確認した．

真空パッド造形のための型を Fig.4.55 に示す．型の製作には，熱溶解フィラメント製法 (FFF) 方式の 3D プリンタである Raise3D Pro2 [118] を用い，フィラメントとして colorFabb 社の nGen クリア [119] を利用した．このフィラメントは，米国食品医薬品局 (FDA) から食品接触用途での使用を承認された素材から成っているため，これを素材とした型を用いることで，ゼラチンの安全性を損なわないままこれを造形することが可能となる．ただし，このフィラメントはプリント中に糸引きしやすかったため，産毛のような細く短い毛が型の表面から所々生えた状態となり，この毛が造形物に混入する可能性が生じた．そこで，造形物に混入する可能性がある毛を一回目の造形で除去した後，二回目の造形による造形物を完成品とした．一回目の造形においては，気泡削減の必要はないため，造形時間を短縮できる．また，造形物の離型は以下の手順で行う．

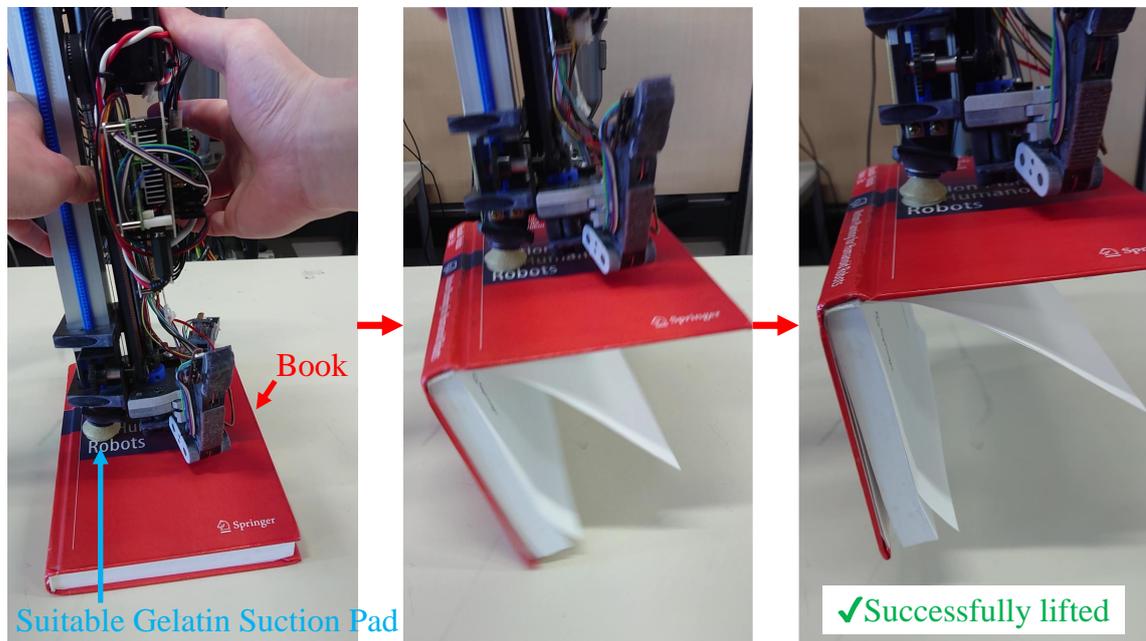


Fig. 4.53: 提案する壁厚設計による真空パッドは, Fig.4.50 とは異なり, 吸引した本の表紙の姿勢変化に追従できた.

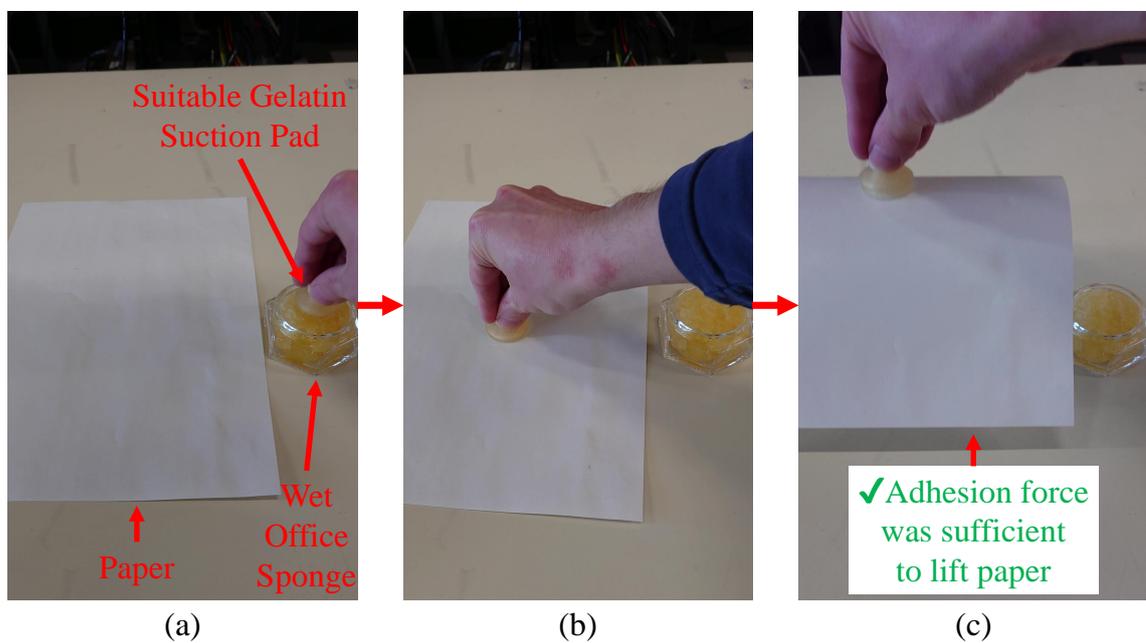


Fig. 4.54: 提案する壁厚設計による真空パッドは, (a) 濡らして (b) 押し付けを繰り返すことで, (c) 紙を吸着して持ち上げることができた.

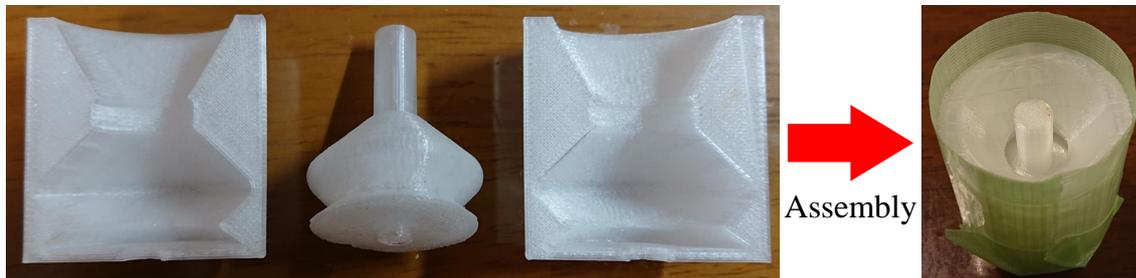


Fig. 4.55: 真空パッド造形のための型 .

1. 型の外壁の隙間にマイナスドライバーを差し込み，テコのように用いることで隙間を少しずつ広げ，片方の外壁を外す
2. 外壁の漏斗部と造形物の間にマイナスドライバーを差し込み，漏斗部を支点，造形物に埋まった型を作用点とするテコを活用しながら外壁を外す
3. 造形物を伸ばし，内部のコマ状の型を外す

第5章

吸引着把握併用ハンドの融合感覚把持制御

従来の実ロボットの把持制御では、距離情報や接触情報、力情報といった異なるセンサ情報を用いて、位置や力といった複数の制御対象を、到達動作と把持動作という複数の段階に分けて制御しており、複雑化していた。そこで本章では、複数のセンサの出力を融合感覚と呼ぶ一つの感覚に統合し、制御入力をその感覚に統一することによる単純化を提案する。その枠組みの中で、視覚由来の融合感覚に基づく制御と、末端効果器にあるセンサ由来の融合感覚に基づく制御について述べる。前者では、タスクにおける未知物体の有無・外形からは把持動作予測困難な物体の有無・把持動作の複雑性・把持動作の種類の数に応じ、物体クラスへの依存性の有無と把持動作の分割の有無を組み合わせた実世界認識から吸引着把握併用を制御する手法を示す。後者では、効果器距離覚と近接覚を組み合わせ、前者の認識の誤りの訂正や、前者の認識では困難な力の制御を行う精密認識・制御法を示す。

Fig.5.1 に融合感覚の構成を示す。視覚が色知覚と距離知覚から構成されていることを規範として出力形式とし、物体との距離に応じて距離知覚に変換するセンサを変更していく。さらに、センサの検知範囲が重複する領域において、必要に応じて、片方のセンサ値を用いたもう片方のセンサのモデルの同定を行う。ここで、センサをロボットの末端効果器に付随する効果器センサと付随しない非効果器センサに分けた [120] 時に、距離知覚を担える効果器センサは現在のところ二種類に分けられる。すなわち、至近距離 (< 10 mm) での計測が可能なセンサと不可能なセンサである。詳細は後述するが、至近距離での計測が可能なセンサは検知範囲が狭く、視覚と切れ目なく繋げることができない。また、計測対象物体の特性に強く依存するものが多い。一方で、検知範囲が広く、視覚と繋がるようなセンサは至近距

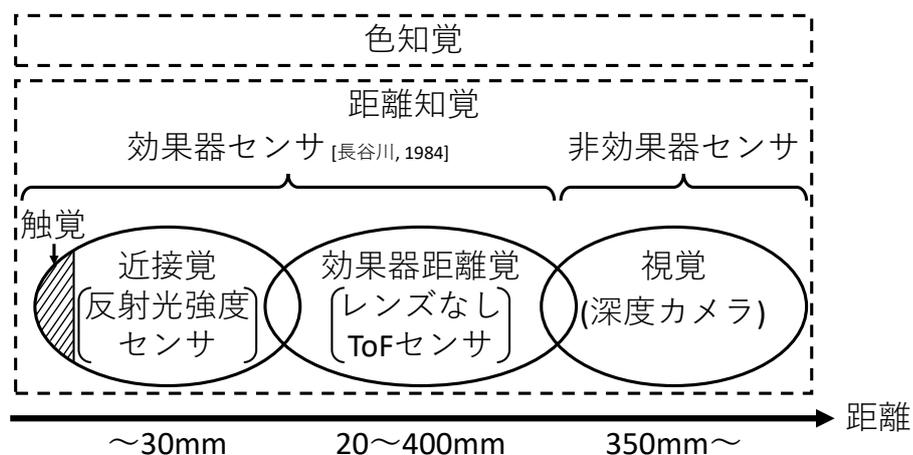


Fig. 5.1: 融合感覚の構成 .

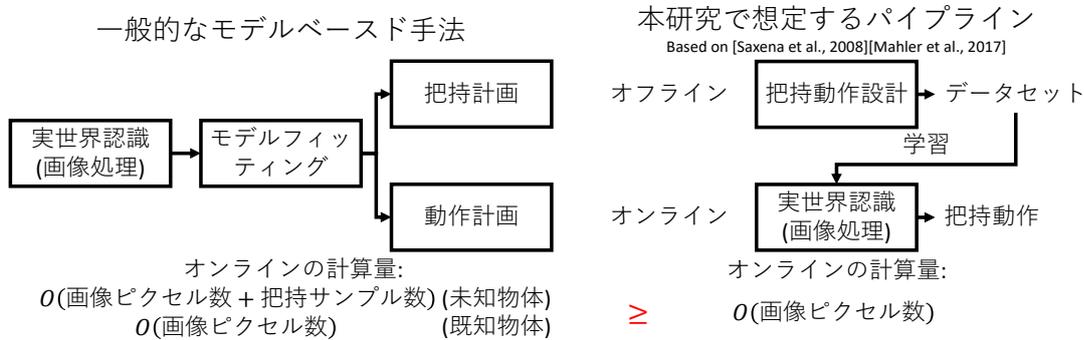


Fig. 5.2: 一般的なモデルベースド手法と本研究における実世界画像認識の位置づけ。

離をカバーできない。つまり、これら二種類は、特に距離知覚におけるカバー範囲という観点から見た時、大きく異なった特徴を持つと言える。本研究では、前者を（厳密な）近接覚センサ、後者を効果器距離覚センサと呼んで区別することとする。

5.1 視覚に基づく到達動作の制御

到達動作の目標となるハンド位置姿勢は実世界画像から認識するのが一般的である。この認識について、一般的なモデルベースド手法と本研究における位置づけを Fig.5.2 に示す。一般的なモデルベースド手法においては、実世界の認識結果への既知物体モデルフィッティング、もしくは認識結果からの未知物体モデル推定を行い、既知物体モデルに対して事前計算された把持候補の取得、もしくは未知物体モデルに対する事前知識なしの把持計画の実行により、オンラインでの把持計画・動作計画を行ってハンド位置姿勢を求める [121]。この場合、既知物体に対するオンラインの計算量は $O(\text{画像ピクセル数})$ となる一方で、未知物体に対してはサンプリングベースの把持計画が必要となるため、オンラインの計算量は $O(\text{画像ピクセル数} + \text{把持サンプル数})$ となる。本研究はモデルベースの理論を基盤とするが、この一般的なパイプラインではなく、オフラインで行う把持動作設計により作成したデータセットを用いて実世界認識器を学習させ、オンラインでは実世界認識器が把持動作を直接出力するパイプライン [122, 123] を想定する。このパイプラインにおけるオンラインの計算量は、既知物体か未知物体かに関わらず $O(\text{画像ピクセル数})$ となるため、一般的なパイプラインと同等か、より高速であることが期待できる。出力されるハンド位置姿勢の精度に関しては、完璧なモデルとその位置姿勢が得られた場合のモデルベースド手法に比べると劣ってしまうと考えられるが、多種物体が存在する環境において各物体を識別してその位置姿勢を

得るために今日用いられるのは学習ベースの認識器であり [124, 125, 126]，取得されるモデルの精度はその認識に依存するため，パイプライン全体としては精度に大きな差はないと考えられる。

把持動作を出力する学習ベースの実世界認識器は，学習時に必要な情報に着目すると，物体クラス（製品名）依存のものと，物体クラス不問のものに分けられると考えられる．前者は本のような，外形から必要な動作を予測するのが難しい物体でも学習しやすいが，扱う物体クラスが増えると再学習が必要となる．後者は逆に，未知物体であっても似た既知物体があれば動作を予測できる可能性があるが，外形から必要な動作を予測するのが難しい物体は学習しにくい．また，把持動作の出力形式に着目すると，把持動作をまとめて代表の点や座標系で出力するものと，把持動作を吸引や把握などの要素ごとに出力してから後で統合するものに分けられると考えられる．前者は複雑な動作でも簡略なデータに変換するため学習しやすいが，扱う動作が増えると再学習が必要となる．後者は逆に，新規動作に対応しやすいが，要素を分割しすぎると認識が難しくなる．以上の長所と短所はトレードオフとなってしまいうため，タスクに応じて適した方式を選択し，組み合わせることが重要となる．本研究では，物体クラス依存の認識と把持動作代表点の認識を組み合わせたとの，物体クラス不問の認識と把持動作要素点の認識を組み合わせたとのを開発した。

5.1.1 物体クラス依存の把持動作代表点認識

まず，最も簡単な認識として，把持動作代表点は考慮せずに物体情報のみを出力する認識を実装した．把持動作代表点に関しては，認識された物体情報から一定のヒューリスティクスに基づいて求めることを前提とした．この認識では，深層学習した物体認識器を用いて実世界の色画像から対象物の領域を分割し，距離画像も用いて対象物のバウンディングボックスと重心の位置を推定する．認識の流れを Fig.5.3 に示す．Fully Convolutional Network (FCN) [127] に基づく畳み込みニューラルネットワーク (CNN) モデルを用いて，視覚センサで得た RGB 色画像の分割を行った．モデルの学習は，先行研究 [128, 129] に従って行った．モデルの出力を用いると，対象物の三次元点群が抽出できる．抽出された点群に対してユークリッド距離クラスタリングを行い，一番大きなクラスタの点群を囲むバウンディングボックスを対象物のバウンディングボックス，点群の重心を対象物の重心とする．ユークリッド距離クラスタリングを行うのは，三次元的にノイズを除去するためである．

以上の認識を発展させ，把持動作代表点を直接出力する物体クラス依存の認識を実装し

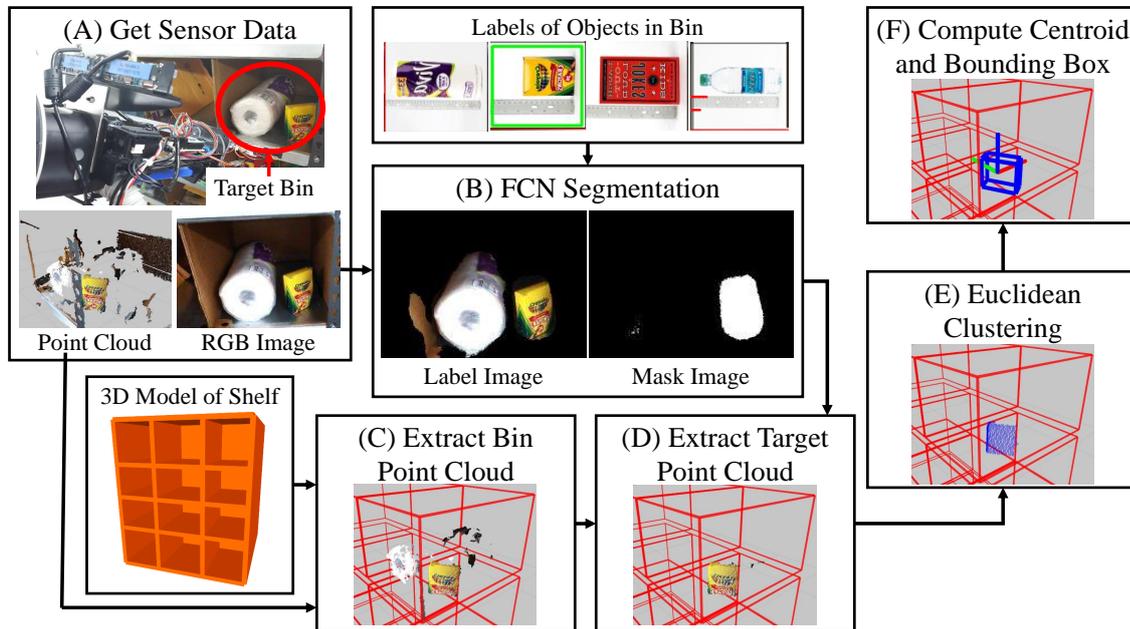


Fig. 5.3: 物体領域分割に基づく認識の流れ [70] .

た．この認識では，可変形状物体である折り畳まれた物体を操作するため，深層学習した認識器を用いて実世界の色画像から把持の代表点を認識し，距離画像も用いて把持位置姿勢に変換する．折り畳まれた物体を操作するためには，物体を持ち上げた際に垂れ下がる部分の外側に指が届き，物体を把握して折り畳める必要がある．この操作を行うため，Fig.5.4 に示す試行錯誤型システムを構築する．このシステムは以下の流れで構成されており，これを折り畳まれた物体の把握に成功するまで繰り返す．

- 物体画像認識により目標物体のバウンディングボックスと適切な吸引点を取得する．
- 未試行の姿勢で吸引把持し，物体を持ち上げる．
- 物体の状態を認識し，指が垂れ下がり部分の外側に届くか確認する．
- 畳み操作の失敗が予測された場合は物体を元の場所に戻して再試行する．

このシステムでは，畳み込みニューラルネットワークにより適切な吸引点が推定されると共に，主にロボットハンド指先に搭載された近接覚センサで垂れ下がり部分を検出することにより畳み操作の失敗が予測されている．Fig.5.5 に示すように，垂れ下がり部分の外側が指の対面に来て畳み操作が成功する場合に，垂れ下がり部分と指が最も近づく（Fig.5.5a）ので，上記の予測が可能となっている．また，試行錯誤は，特に対称的な物体に対する吸引点

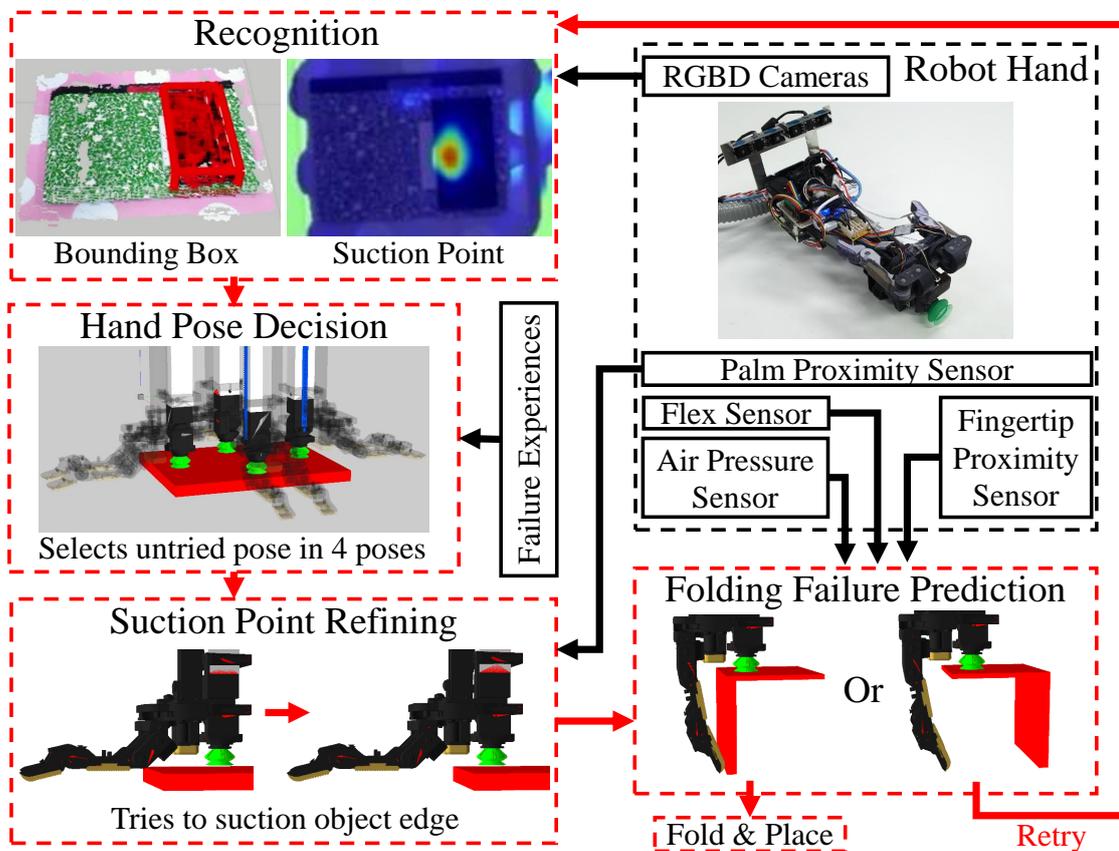


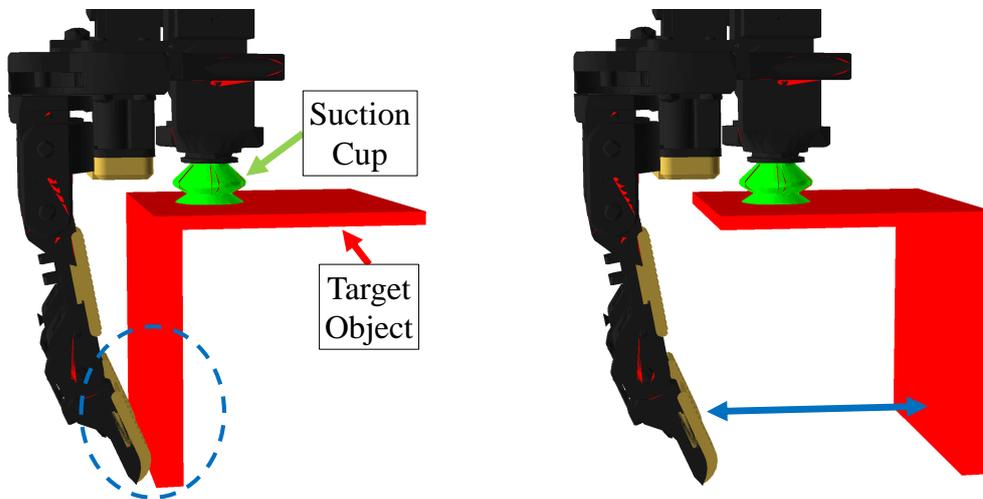
Fig. 5.4: 折り畳まれた物体を操作する試行錯誤型システム [44].

認識の不確実性に対処するため必要である．この他に不確実性が生じうるものとして，バウンディングボックス認識・ハードウェア・吸引着把持の安定性がある．このそれぞれに対処するため，掌に搭載された近接覚センサ・指先関節周りに搭載された曲げセンサ・気圧センサを利用する．

認識の流れをまとめた図を，Fig.5.6 に示す．

物体領域と吸引領域の分割

視覚センサによる物体認識手法の中で，深層学習を用いた領域分割が多クラス問題に対して有効であることが明らかになってきている [129]．先行研究において，吸引領域を予測する畳み込みニューラルネットワークモデルが提案されている [131] が，このモデルは物体領域を抽出しないため，今回のシステムで用いることは難しい．今回のシステムでは，物体の



(a) 垂れ下がり部分の外側が指の対面に来る時、垂れ下がり部分と指は近づく。
 (b) 垂れ下がり部分の内側が指の対面に来る時、垂れ下がり部分と指は離れる。

Fig. 5.5: 指先の近接覚センサで積み操作の失敗が予測可能な理由 [44] . (a) では、指が垂れ下がり部分に届いて畳む方向に押し上げることが可能である . (b) では、指が垂れ下がり部分に届かないか、畳む方向とは逆方向に押し上げてしまう .

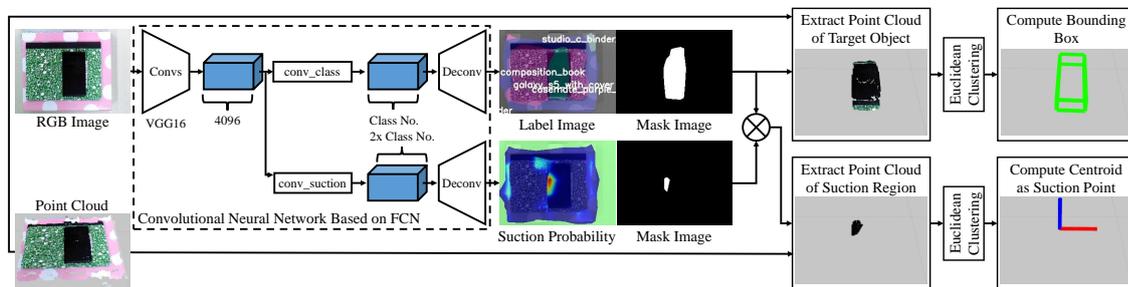


Fig. 5.6: 視覚センサによる認識の流れ [130] .

バウンディングボックスと吸引点を用いるため、画像認識では物体領域と吸引すべき領域の両方を分割する必要がある . そこで、物体ラベルと吸引すべき場所かどうかのラベルを同時に予測する畳み込みニューラルネットワークモデルを構築する . 構築するモデルは、RGB 画像入力に対し各物体クラスの確率をピクセルごとに出力する FCN-8s at-once [127] のモデルを拡張したものである . FCN-8s at-once は、VGG16 [132] の fc6 層及び fc7 層を畳み込み層に置き換え、置き換え後の fc7 層の出力を conv_class 畳み込み層に入力することによりピクセルごとのクラス確率を予測している . 本研究では、クラスに加えて吸引領域を予測するた

め、垂れ下がり面の持ち上げ点に指が届くような吸引点であるかどうかを物体クラス・ピクセルごとに予測する conv_suction 畳み込み層を別ブランチで追加する。

入力画像の高さを H 、幅を W とすると、fc7 層の出力はサイズ $(H/32, W/32, 4096)$ のテンソルと表現できる。ここで、4096 はチャンネル数を示している。また、 N_{class} を物体クラス数とすると、conv_class 層の出力は $(H/32, W/32, N_{class})$ 、conv_suction 層の出力は $(H/32, W/32, 2N_{class})$ である。ここで、2 は “suitable for suction” と “unsuitable for suction” の二種類の吸引クラスを意味している。これらの $1/32$ スケールの出力が、次の逆畳み込み層で (H, W) に拡大される。吸引クラスは二種類しかなく排他的なため、一クラスにして出力をシグモイド関数に入力しても表現できるが、conv_class 層では出力にソフトマックス関数を使っているため、それに合わせてソフトマックス関数を用いるために二クラスとする。学習時には、 $(H, W, 2)$ の正解吸引ラベルマップと比較した損失を計算するため、 $(H, W, 2N_{class})$ の吸引クラス予測結果から損失に関与する $(H, W, 2)$ の領域を抽出する。この際、 $(H, W, 1)$ の正解物体ラベルを用いる。テスト時には、予測された $(H, W, 1)$ の物体ラベルを用いる。

吸引点補正を行う上で、物体上面に沿ってハンドを動かすために、物体上面の推定が必要になる。これを達成するため、上面が平面であると仮定した上で、画像分割で得られた物体領域に対応する三次元点群に対して Point Cloud Library [133] の平面検出を適用する。検出された平面領域の中で、最大の領域が上面を代表するものとする。この平面に沿ってバウンディングボックスを作ることで、バウンディングボックスに上面の情報が含まれることになり、これを利用して吸引点補正を行う。

自動生成したデータセットによる領域予測モデルの学習

モデルの学習を、バッチサイズ 1、60000 イテレーションで行う。学習の最適化には、 $\alpha = 10^{-5}$ 、 $weight_decay_rate = 0.0005$ の Adam [134] を用いる。学習に用いるデータセットは、18 種類の折り畳まれた物体のインスタンス画像それぞれ 5 ~ 10 枚ずつからイテレーションごとに自動生成する。自動生成により、データセット作成時のアノテーション作業を減らすことができる。インスタンス画像の例を Fig.5.7 に示す。各インスタンス画像はアスペクト比を保って縮小し、 $360 \times 360 = 129600$ pixels の面積に揃えておく。自動生成の際は、インスタンス画像にデータ拡張を行った後、 $667 \text{ pixel} \times 375 \text{ pixel}$ の背景画像のランダムな位置に画像からはみ出さないよう貼り付け、画像全体にもデータ拡張を行う。自動生成した画像に対応する正解ラベルは、各インスタンス画像に対し人手でアノテーションした物体領域と



Fig. 5.7: インスタンス画像の例 [130] . 複数角度から撮影したデータが含まれている .

吸引領域から生成する . Fig.5.8 に , 自動生成された画像と対応する正解ラベルの例を示す . データ拡張は , インスタンス画像撮影に使用したカメラとロボットシステムのカメラの違いや照明環境の違い , 物体の姿勢や見える大きさの違いに頑健なモデルを得るために行う . 具体的には , 以下の処理を RGB 画像に対して順番に行う .

- 30%の確率で R と G の値に 1 ~ 1.5 のランダムな値を乗ずる
- 30%の確率で HSV 画像に変換して S と V の値に 0.5 ~ 2 のランダムな値を乗じた後 , RGB 画像に戻す
- 30%の確率で 0 ~ 1 のランダムな σ のガウシアンぼかしをかける
- 80%の確率で 15 ~ 80%の縮小 , -16 ~ 16 ピクセルの平行移動 , -180 ~ 180 度の回転 , -16 ~ 16 度のせん断変形をいずれもランダムな値で行う

なお , RGB 画像の拡大縮小には Bilinear 補間を , ラベルの拡大縮小には Nearest neighbor 補間を用いる .

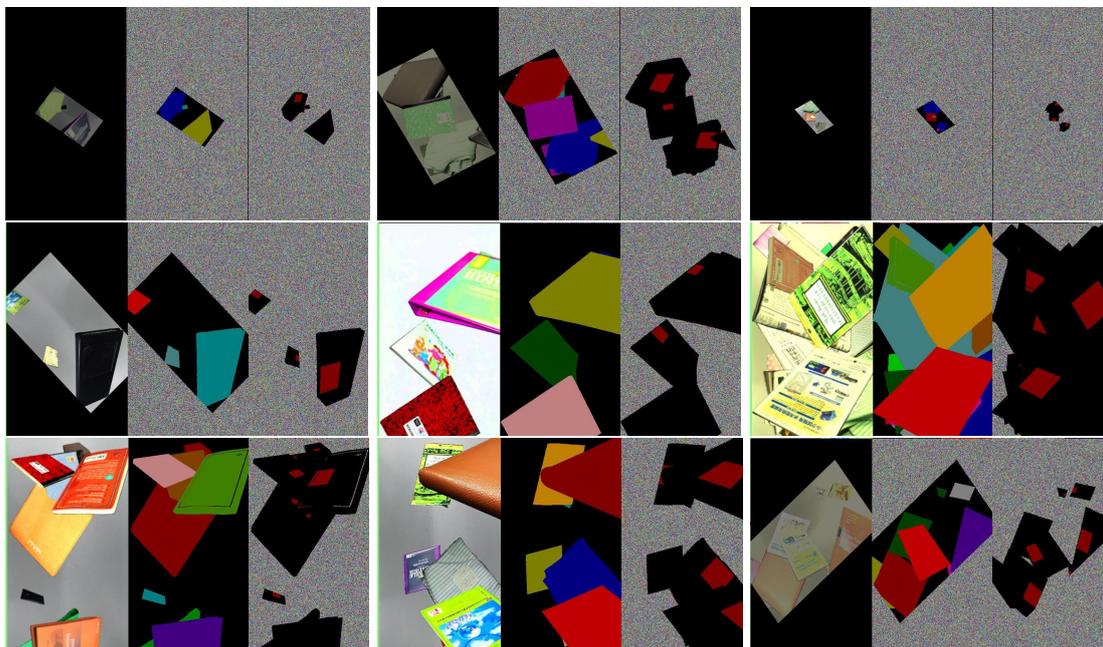


Fig. 5.8: 自動生成されたデータセットの例 [130]. 各画像において, 左側 1/3 は背景画像にインスタンス画像を貼り付けたもの, 中央 1/3 は対応する正解物体ラベルを可視化したもの, 右側 1/3 は正解吸引ラベルを可視化したものである.

吸引位置姿勢決定

垂れ下がり部分は物体エッジの下に現れるため, 垂れ下がり部分の押し上げ操作を成功させるためには, 物体バウンディングボックスのエッジの下側に指が届く必要がある. そのため, 吸引時のハンド位置姿勢は, Fig.5.9 に示す四つの位置姿勢のいずれかである必要がある. この中から, 未試行の位置姿勢が選択される. 選択に際して, 現在のバウンディングボックスが以前の試行のものとずれている場合は, 現在の位置姿勢候補の中で, 既に試行済みの位置姿勢に最も近い位置姿勢を試行済みであるものとする. 吸引点が発見されている場合は, 各エッジと吸引点間の距離を比較し, 最も近いエッジ用の位置姿勢を最初に試す.

5.1.2 物体クラス不問の把持動作要素点認識

把持の要素として吸引と把握を考え, それらを別々に認識し, 認識後にハンド構造に基づいて把持を構成する. 近年の深層学習の発展により, 未知物体の把持位置姿勢検出性能が向上し, 主に平行グリッパ [135, 136, 123, 137, 138, 131] や吸引グリッパ [131, 67] を用いて盛

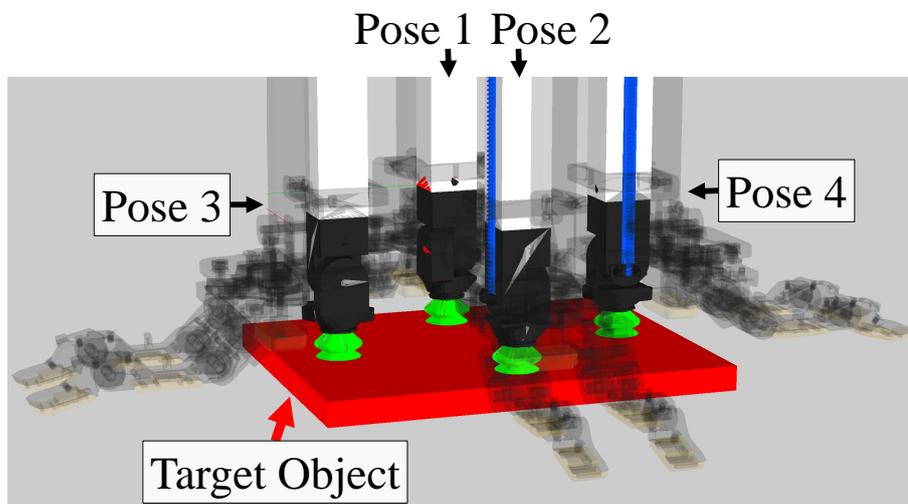


Fig. 5.9: 吸引時のハンド位置姿勢の候補 [44] . 各姿勢では、垂れ下がり部分が生じるかもしれないバウンディングボックスのエッジの下側に指が届くようになっている .

んに研究が行われてきた . 前者は把握による把持 , 後者は吸引による把持に当たり , 従来はこれらが別々に扱われ , 入力画像から単独の把持モダリティ (把握もしくは吸引) の実行方法を予測するニューラルネットワークモデルが訓練されてきた .

これに対し , いくつかの先行研究 [40, 139] 及び本研究においては , 把握と吸引を同時に行えるマルチモーダルなハンドが開発されてきている . これらのハンドは異なる把持モダリティを併用し , 把持の実行可能性と安定性を高める複雑な動作を行うことができる . このような併用を把持融合と呼ぶことにする . 本研究で扱っている単指把握切替マニピュレーションがその一つである .

しかし , マルチモーダルなハンドを開発している研究においては , ハンドを自律型ロボットで活用するために必要な環境認識技術の開発が不十分であった . 具体的には , 環境認識なしで事前に定めた動作のみを行っていたり [40] , 全ての物体形状がバウンディングボックスに近似できると仮定し , 検出されたバウンディングボックスを用いて把持動作を計画していたりした [139] . 本研究のこれまでの環境認識も後者に当たる . バウンディングボックス近似に基づく把持は箱型の物体には有効に機能する一方で , 凹型の物体や穴の開いた物体などの複雑形状物体に対しては失敗することがあり , 正確な把持位置姿勢の検出が求められている .

以上の考察から , 前述の単独把持モダリティ予測のモデルをマルチモーダルなハンドのた

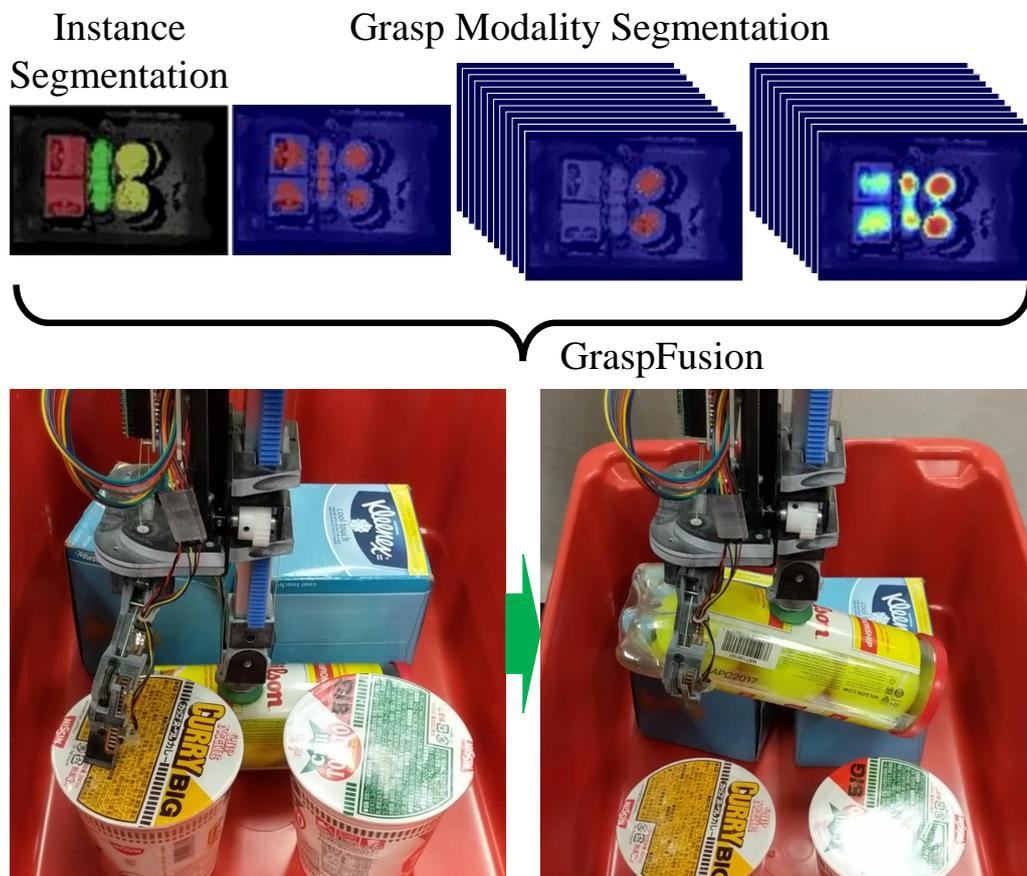


Fig. 5.10: インスタンスを考慮した環境認識に基づく単指把握切替マニピュレーション [140]. 環境認識では、物体のインスタンス検出を行い、それに基づいて吸引と把握という異なる把持モダリティを融合する．上図では、吸引と把握を用いた単指把握切替マニピュレーションが行われており、物体が吸引されて引き上げられた後、把握されている．

めの環境認識に適用することを考える．これらのモデルを使えば、物体検出や領域分割なしで、RGB 画像のようなセンサ入力から未知の複雑形状物体の把持位置姿勢を出力することができる．しかし、異なる把持モダリティを正しく統合・併用して複数物体を一度に把持しないようにするためには、それぞれの物体の領域も考慮しなければならない．特に、複数物体が近接する乱雑環境においては、把持モダリティの統合に失敗すると、ある物体を吸引しつつ別の物体を把握してしまうといった状態が生じ得るため、物体領域の考慮が重要である．未知物体への適用可能性を維持しつつこの要件を満たすためには、物体クラス不問のインスタンス領域分割を導入し、各物体インスタンス領域内での把持モダリティ統合を行う必要がある (Fig.5.10) ．

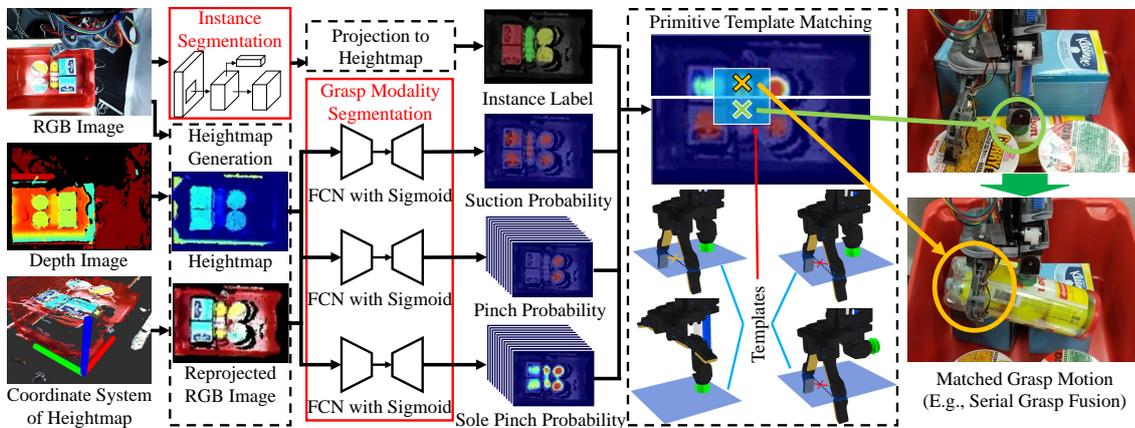


Fig. 5.11: 複数の把持モダリティ領域分割のインスタンスを考慮した統合に基づく把持融合実現システム [140] .

よって，Fig.5.11 に示すような環境認識・動作計画システムを構築し，自律的な把持融合を実現する．このシステムは，以下の要素で構成されている．

1. 物体クラス不問のインスタンス領域分割
2. 並列に動作する単独把持モダリティ領域分割
3. 領域分割結果と把持プリミティブテンプレートを用いた把持位置姿勢計画

一つ目の要素は，最先端のインスタンス領域分割モデルである Mask R-CNN [126] を拡張して物体クラス不問とすることにより実現する．二つ目の要素は，各把持モダリティ用に別々の Fully Convolutional Network モデル [127] を訓練することにより実現する．三つ目の要素は，ハンドが可能な把持動作を表す把持プリミティブテンプレートを認識結果にマッチングすることにより実現する．把持プリミティブテンプレートとは，把握中心点は吸引点から 10 cm 離れている，といった把持モダリティ間の幾何拘束関係を表すものであり，ハンドの構造に由来する．テンプレートの導入により，このテンプレートを修正するだけで，ハンド構造の変化に対応できるようになる．

把持融合の分類

把持融合には，並列把持融合と直列把持融合の二種類が存在する．並列把持融合では，複数の把持モダリティが同時に使われ始める．Mantis Gripper [139] の「Front/Top Suction and Grip」がこの種類に分類される．直列把持融合では，複数の把持モダリティが順次使われ始

める．これは初期状態の物体に対して一部の把持モダリティだけしか適用できない時に有効である．例えば，iGRIPP 4 [40] は把握できないテーブル上の薄い物体を吸引で持ち上げ，持ち上げ後に把握している．これは，本研究で言う単指把握切替マニピュレーションに当たる．直列把持融合は並列把持融合に比べて様々な環境での実行可能性に優れるが，単独の把持モダリティで物体を移動させる工程が存在するため，並列把持融合よりも安定性には劣る．

並列把持融合と直列把持融合を両方とも活用するため，把持動作の実行可能性を評価した上で，実行可能な動作の中から最も安定な動作を選択する．

環境視覚情報として用いる高さ地図

単独把持モダリティ検出のために用いる視覚情報は，ピンにおけるピッキング用に把握と吸引を検出した先行研究 [131] と同様のものを用いる．具体的には，カメラから得られた RGB 画像と距離画像を，ピンが一定の位置姿勢にあると仮定して，Fig.5.12 に示すようなピン内の高さ地図に変換する．まず，RGB 画像と距離画像を三次元点群に変換し，さらにその点群を $0.002\text{ m} = 2\text{ mm}$ 区切りのボクセルにリサンプリングする．高さ地図のピクセルはボクセルに対応するため，高さ地図の 1 ピクセルは三次元空間における 2 mm に相当することになる．Fig.5.12 に RGB 画像と距離画像をピン内の高さ地図に変換する例を示す．

把持モダリティ領域分割

ピクセル単位の把持モダリティ領域分割を行うため，元々は意味領域分割において用いられていた Fully Convolutional Networks (FCN) [127] を拡張する．元々の FCN モデルは入力画像 (サイズ: $(H, W, 3)$) からピクセル単位の物体クラススコア (テンソルサイズ: (H, W, C)) を予測する．ここで， H と W はそれぞれ画像の高さと幅を， C は物体クラス数に対応した出力チャンネルのサイズを， 3 は RGB 画像入力のチャンネル数を表している．意味領域分割においては，最も確からしい物体クラスを出力するよう訓練するため，活性化関数にソフトマックス関数，損失関数に多クラス交差エントロピー関数を用いるソフトマックス交差エントロピー損失が用いられ，チャンネル間で競争的な損失が計算されていた [127]．この損失は，物体領域間に重複がないためピクセルごとに最も確からしいクラスを一つ出力すればよい意味領域分割においては有効であった．

一方で，把持モダリティ領域分割では，把持モダリティ領域間で重複がありえる．例えば，把握領域分割を考える．この分割においては，各ピクセルのラベルは把握中心点を表せるが，

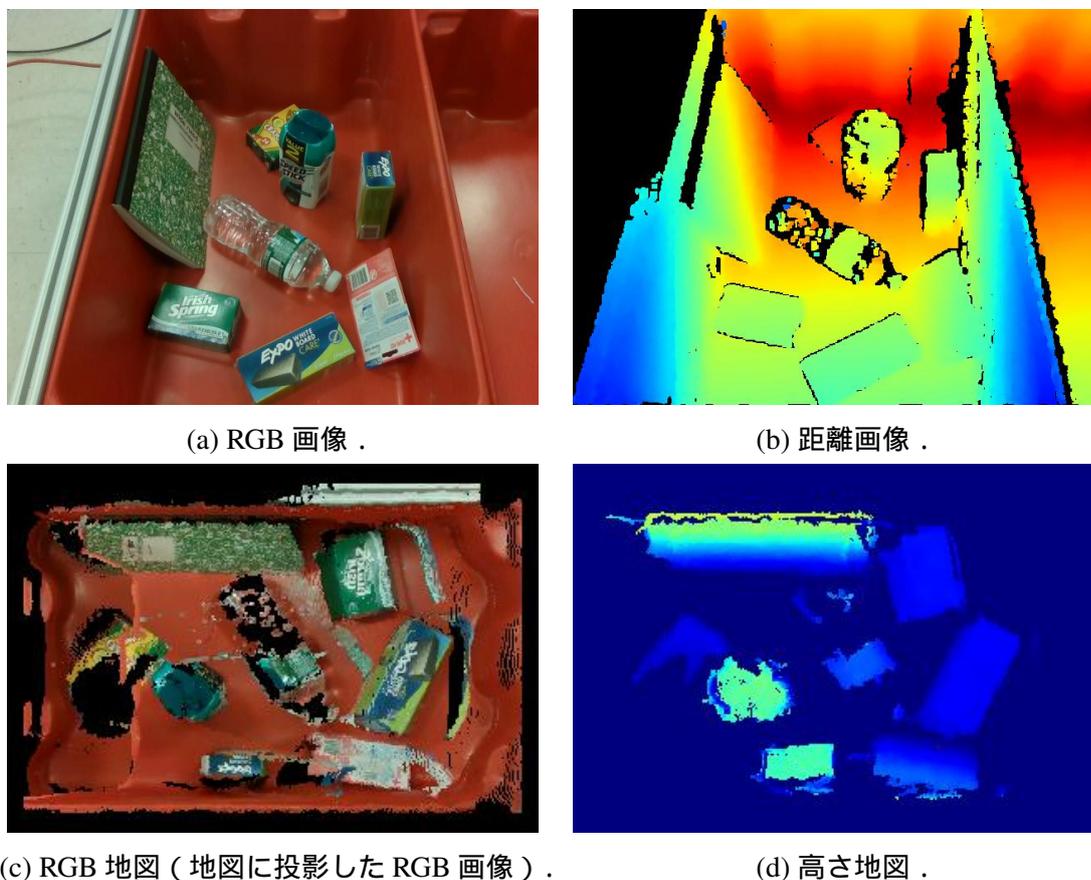


Fig. 5.12: 環境の高さ地図 [140] . カメラから得られた RGB 画像と距離画像がピンの底の中心から見た高さ地図表現に変換されている .

世界座標系 z 軸 (重力軸) 周りの回転は表せない . z 軸周りの回転角 θ を表すため , 回転角を解像度 d 度で離散化する . 平行な二指による把握においては $\theta = x$ と $\theta = 180 + x$ は同等の作用となるため , d は $(0, 180)$ の範囲に制限できる . d を用いれば , 出力チャンネル数 C は $C = 180/d$ と表せる . ボールのような物体はどの向きでも把握できるので , 把持モダリティ領域間で重複がありえることがわかる . このような非競争的な把持モダリティ領域を表現するため , ソフトマックス交差エントロピー損失の代わりに , 活性化関数にシグモイド関数を用いたシグモイド交差エントロピー損失を用いる . シグモイド交差エントロピー損失はチャンネルごとに計算される損失である . 把握領域は , シグモイド関数を適用後の出力を閾値 0.5 で二値化することにより抽出できる .

Fig.5.13 に , Fig.5.12 の画像に対する吸引領域と把握領域の正解ラベルを示す . Fig.5.13 に

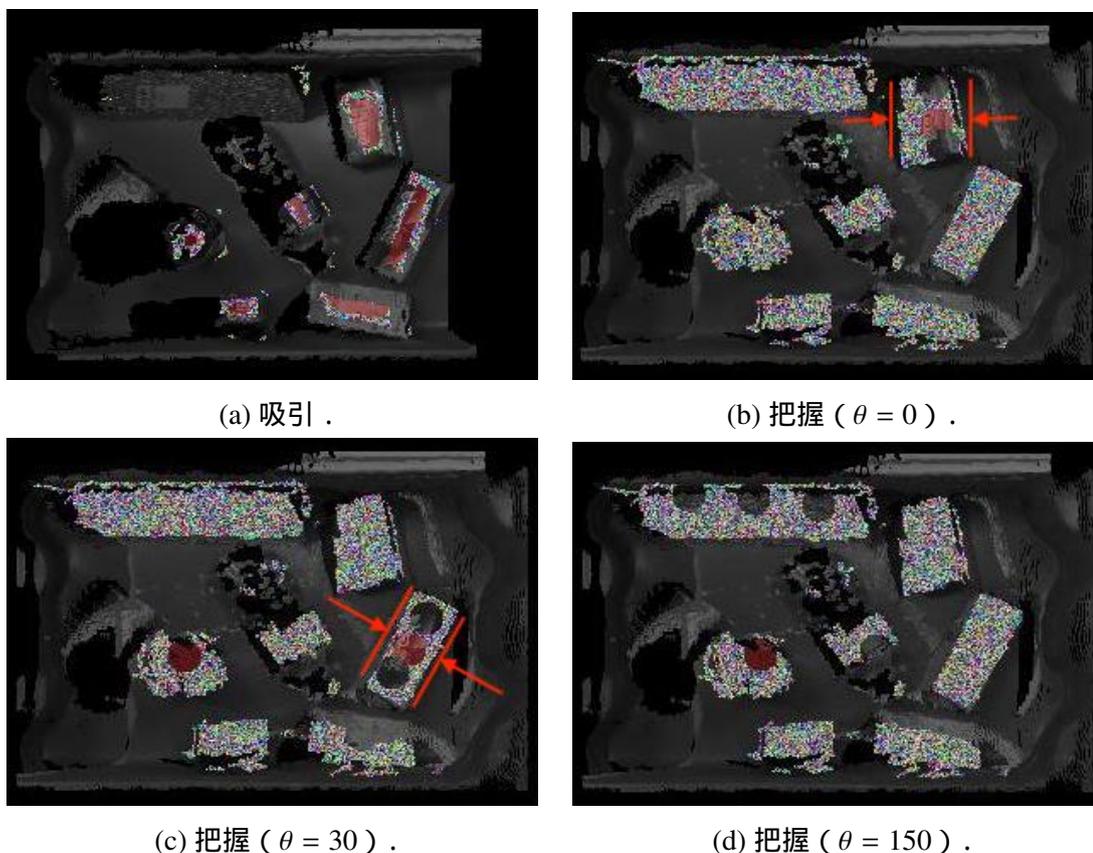
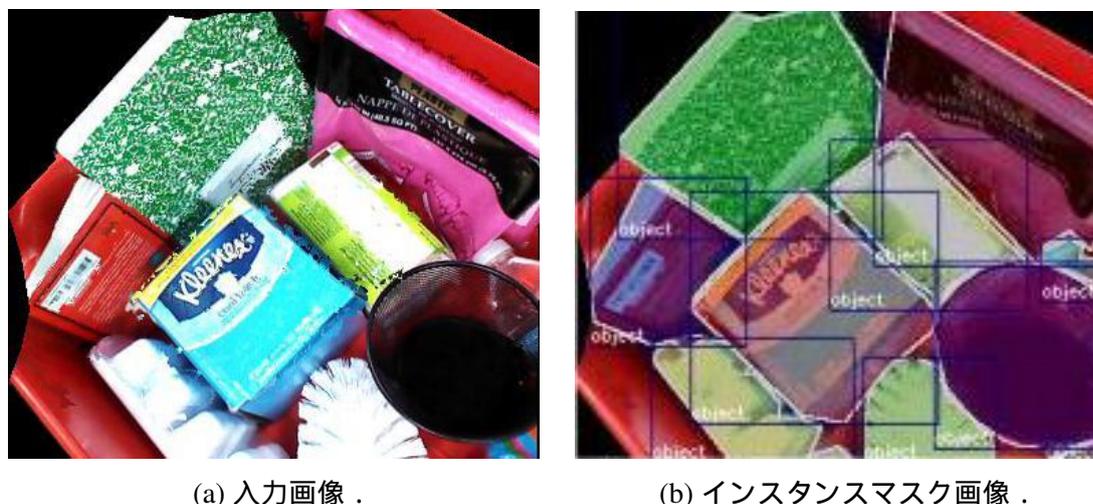


Fig. 5.13: 把持モダリティのピクセル単位の正解ラベル [140] . 赤い領域は把持に適していることを, 黒い領域は把持に適していないことを, ホワイトノイズの領域はラベリングされておらず, 訓練時には無視されることを示す .

において, 赤い領域は把持に適していることを, 黒い領域は把持に適していないことを, ランダムな色の領域はラベリングされていないことを示す . ラベリングされていない領域は無視され, 損失に影響しない .

ネットワークモデルには RGB 画像だけでなく距離画像も入力する . RGB-D 物体認識に関する先行研究 [141] を参考に, 距離画像を Jet カラーマップで RGB 画像に変換し, 入力とする . また, FCN の先行研究 [127] と同様に, ImageNet [142] で訓練された VGG16 [132] をモデルの初期重みとして用いる . VGG16 は RGB 画像入力に対して訓練されたものであるため, 最初の畳み込み層の入力チャンネルは 3 となっている . そこで, 距離画像も FCN の入力とするため, 最初の畳み込み層の重みをコピーして 6 チャンネル入力とする . このうち 3 つが通常の RGB 画像用, 3 つが Jet カラーマップで変換された距離画像用である . モデルへの入



(a) 入力画像 .

(b) インスタンスマスク画像 .

Fig. 5.14: 物体クラス不問のインスタンス領域分割 [140] . バウンディングボックスの色は物体クラスを示し , 全てが前景となっている . マスクの色はインスタンスを示す .

力の例として , Fig.5.12d に Jet カラーマップで変換された高さ地図を示す .

物体クラス不問のインスタンス領域分割

未知物体も扱える物体クラス不問のインスタンス領域分割を実現するため , Mask R-CNN モデル [126] を拡張する . 元々の Mask R-CNN は多クラス (例えば背景 , 人 , 車 , 犬) のインスタンス領域分割において用いられていた . このクラスを背景と前景のみに設定することで , 物体クラス分類を行わないモデルを訓練できる .

ピンでのピッキングにおいては , 前景クラスは , ピンに入っていてロボットがピッキングしなければならない全ての物体を含み , 背景クラスはピンを含む . Fig.5.14 に , 入力画像及びそれに対応するインスタンスマスク画像を示す .

把持プリミティブテンプレート

把持モダリティ検出の出力は二次元のラベル画像であるため , 実行可能な把持プリミティブの探索を簡単にするためには , ハンド構造に由来する把持モダリティ間の幾何拘束関係の表現も二次元のテンプレートである必要がある . Fig.5.15 に示す四つのテンプレートを用意する . 一つ目のテンプレートは直列把持融合を表しており , ロボットはまず物体を吸引して開けた空間まで持ち上げ , それから把握する . このテンプレートでは , 真空パッドの平面内

での位置が吸引点とラベリングされ、把握を行う指の間の中心位置が持ち上げ後の把握点とラベリングされる。二つ目のテンプレートは並列把持融合を表しており、ロボットは吸引と把握を同時に始める。このテンプレートでは、真空パッドの位置が吸引点とラベリングされ、把握を行う指の間の中心位置が把握点とラベリングされる。三つ目のテンプレートは把握を表しており、把握を行う指の間の中心位置が把握点とラベリングされる。四つ目のテンプレートは吸引を表しており、真空パッドの位置が吸引点とラベリングされる。

単離環境での把握モダリティ

直列把持融合のテンプレートをマッチングするために、単離環境での把握モダリティ (Sole Pinch Modality) を導入する。これは、物体が持ち上げられて、周辺に他物体がなくなった状況において実行可能な把握動作を表すものである。このモダリティは (乱雑環境における) 把握モダリティとは異なり、周辺環境を考慮する必要がない。このモダリティの領域を取得するため、各物体に関して、その物体以外の部分がマスクされた画像をインスタンス領域分割の結果を用いて作成し、その画像を把握領域分割モデルに入力する。マスクされた画像は、対象物以外の物体が存在しない環境、つまり持ち上げ後の環境を模擬しており、この画像を入力した時の把握領域分割の出力が、持ち上げ後の対象物に対して実行可能な把握動作を表せていると考えられる。出力画像において、対象物の領域の外部は無意味な情報なので、各物体に関する出力画像からその物体の領域の内部のみを切り出したものを全ての物体に関して集め、一つの画像を作ることができる。この画像を単離環境での把握モダリティ領域分割結果として、持ち上げ後の把握点と対応するものとして使う。

把持プリミティブテンプレートのマッチング

把持プリミティブテンプレートのマッチングは移動段階と回転段階に分けられる。移動段階は以下の5つの段階に沿って行われる。

1. 各物体の各把持モダリティ領域に対してユークリッド距離クラスタリングを行う
2. 小さすぎるクラスタをノイズ除去のため削除し、大きすぎるクラスタを背景除去のため削除する
3. 初期状態から実行可能なモダリティ (つまり、単離環境での把握モダリティ以外のモダリティ) の各クラスタの重心を計算する

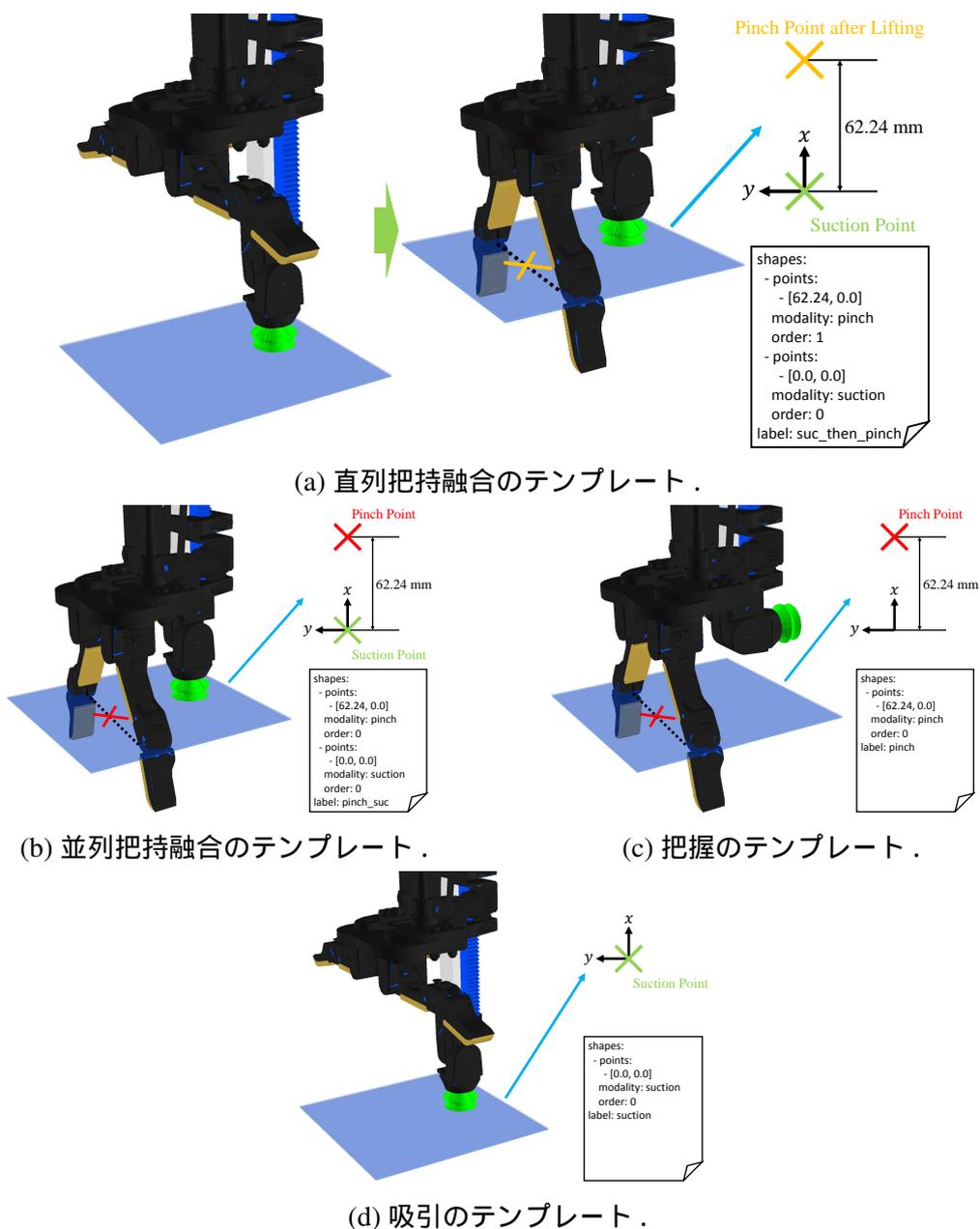


Fig. 5.15: 用意された把持プリミティブテンプレート [140]. それぞれの右下にあるメモはYAML形式で表現されたテンプレートである .

4. 重心が同じモダリティのクラスタ内にある場合は重心に目標点を設定し, そうでない場合は最大確率を取るピクセルに目標点を設定する
5. 目標点と同じモダリティにラベリングされているテンプレート内の点が目標点と一致

するようにテンプレートを移動させる

テンプレートに把握か単離環境での把握に関する点が含まれている場合は、移動段階の後で、そのモダリティの全てのチャンネルに対して以下の回転段階を行う。

1. 選択したチャンネルが表す回転角にテンプレートに含まれる把握方向が揃うまで、移動段階で揃えた点周りにテンプレートを回転させる
2. テンプレートが把握融合のものの場合、まだ揃えていない点とその点のモダリティの領域に収まるまで、テンプレートを追加で回転させる。ただし、追加の回転角が設定した上限を上回った場合、そこで回転を止める
3. テンプレート内の全ての点が各々のモダリティの領域に収まった場合、テンプレートはマッチングしたと判定する

移動段階において、ユークリッド距離クラスタリングは良い候補を抽出するのに貢献する。把持点を得るための単純な手法は最大確率を取るピクセルを把持点に設定することであるが、実験してみると、最大確率を取るピクセルの位置は少しの状況変化で大きく変わることがわかった。そのため、ユークリッド距離クラスタリングと重心計算の組み合わせによる手法を導入する。しかし、この手法を穴の開いている物体に適用すると、重心が穴に入って吸引などが失敗する可能性がある。そこで、この手法では困難な場合を検出するようにし、その場合は単純な手法の方を行う。並列把持融合のマッチングに関しては、初期状態から実行可能なモダリティの点が二点、テンプレートに含まれるが、まず把握点を揃える。これは、把握に対応するクラスタの方が吸引より少なくなる傾向があるためである。

回転段階において360度をカバーするようにするため、回転段階の詳細を以下のように定める。In order to cover 360 degrees in the rotating phase, we define details of that phase as follows:

- 把握や単離環境での把握はハンドの180度回転を許容するので、各チャンネルの角度に180度を足した角度も確認する
- 追加の回転角の上限は、把握領域分割における回転角の解像度の半分に設定する

把持動作の選択

実行する把持動作を選択する上で、把持動作の安定性を最優先に考え、その把持動作を認識した時の確信度は次に考える。そのため、並列把持融合の動作の中で最も確信度が高いものが実行される。並列把持融合の候補がなければ、直列把持融合、把握、吸引の順に確認する。把持動作を認識した時の確信度は、テンプレート内の点に対応するピクセルの取る確率を乗算することにより求まる。

把持モダリティ領域分割のためのデータセット

把持モダリティ領域分割モデルを訓練するため、先行研究 [131] において公開されたデータセットを用いた。このデータセットには把握用に 389 枚 (訓練 : テスト = 312 : 77)、吸引用に 1837 枚 (訓練 : テスト = 1470 : 367) の画像が含まれている。吸引用データセットには、把持に適しているかいないかがピクセル単位でアノテーションされている (Fig.5.13a)。把握用データセットには、良い把握と悪い把握の把握中心点と角度が線分でアノテーションされている。この線分アノテーションを、角度に関して離散化して把握領域検出のチャンネルに振り分け、ピクセル単位のアノテーションに変換する。Fig.5.13b から Fig.5.13d に、異なる回転角における把握領域の正解ラベルが示されている。

把持モダリティ領域分割における異なる視覚入力の比較

把持モダリティのピクセル単位の正解アノテーションを用いて、把持モダリティ領域分割モデルを、視覚入力を変えながら評価した。視覚入力としては、RGB 画像のみ、距離画像のみ、RGB 画像と距離画像の両方、を用意し、それぞれにおける性能を比較した。Table 5.1 に、吸引と把握 ($d = 30$) における領域分割の Intersection over Union (IoU) [127] を示す。両方の把持モダリティにおいて、RGB 画像と距離画像の両方を入力した場合が最も高い性能を示した。この結果から、距離画像を入力可能とする FCN モデルの拡張が有効であることが示された。後述の実験においては、RGB 画像と距離画像の両方をモデルの入力として用いた。

把持モダリティ領域分割における異なる把握回転角解像度の比較

把握領域分割を、回転角の解像度 d を変えながら評価した。Table 5.2 に結果を示す。 $d = 15$ が解像度と IoU のバランスから適切であることが示された。ここで、IoU だけでなく解像度

Table 5.1: 異なる視覚入力の比較結果 [140] . 入力する視覚情報を変えながら把持モダリティ領域分割の性能を評価した .

| grasp modality | visual information | IoU |
|--------------------|--------------------|-------------|
| suction | RGB | 69.6 |
| | depth | 69.4 |
| | RGB+depth | 70.9 |
| pinch ($d = 30$) | RGB | 71.9 |
| | depth | 73.3 |
| | RGB+depth | 74.2 |

とのバランスを考える理由は、解像度が大きすぎると環境に最適な把握角度から大きくずれた角度しか予測できなくなるからである。後述の実験においては、 $d = 15$, $C = 12$ を把握領域分割の解像度として用いた。

Table 5.2: 異なる把握回転角解像度の比較結果 [140] . 解像度を変えながら把握領域分割の性能を評価した .

| resolution [degree] (d) | output channels (C) | IoU |
|--------------------------------|----------------------------|-------------|
| 5 | 36 | 71.1 |
| 10 | 18 | 71.2 |
| 12 | 15 | 71.3 |
| 15 | 12 | 75.2 |
| 20 | 9 | 74.9 |
| 30 | 6 | 74.2 |

物体クラス不問のインスタンス領域分割のためのデータセット合成

物体クラス不問のインスタンス領域分割モデルを訓練するため、乱雑環境の RGB 画像とインスタンスマスクを自動生成する画像合成 [143] を用いた。画像合成では、インスタンス画像に対してランダムなデータ拡張を行って背景画像の上に貼り付ける。Fig.5.16 に合成されたデータセットの例を示す。

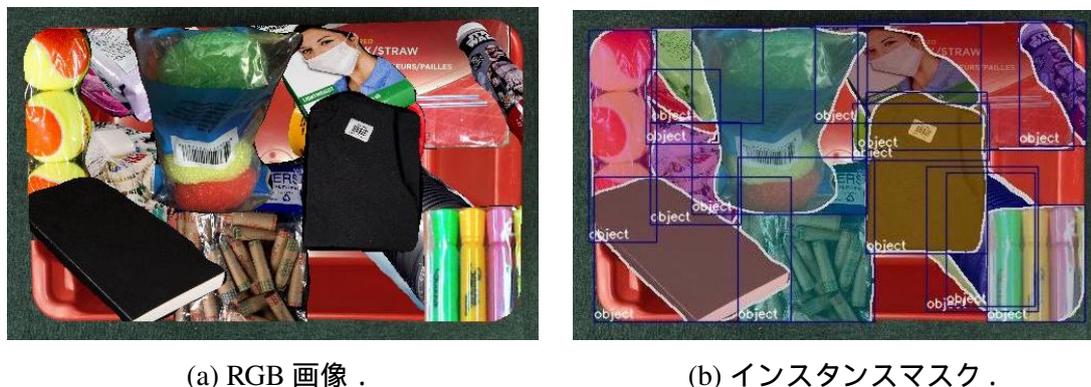


Fig. 5.16: 合成されたデータセット [140].

人がアノテーションしたデータセットを用いた物体クラス不問のインスタンス領域分割の評価

合成されたデータセットで訓練した物体クラス不問のインスタンス領域分割モデルを評価した。評価のためのデータセットとして、40 種類の物品が写っている人がアノテーションしたデータセット [143] を用いた。なお、この 40 物品は訓練時の画像合成では用いないようにした。評価指標としては、インスタンス領域分割において広く用いられる mean Average Precision (mAP) [144] を用いた。以上の条件のもとで、物体クラス不問のインスタンス領域分割モデルは 28.6 mAP という結果を示した。

実世界認識への適用のためのデータ拡張

把持モダリティ領域分割モデルの訓練において、データセットの RGB 画像と距離画像に対し、以下のデータ拡張を行った。

- 距離画像入力のノイズに対する耐性を高めるためのドロップアウト
- 明るさや色の変化に対する耐性を高めるための HSV 色空間におけるランダムなスケールリング
- カメラが動くことによるぼやけに対する耐性を高めるためのガウシアンぼかし
- 物体姿勢の変化に対する耐性を高めるためのアフィン変換

Fig.5.17 に、吸引領域分割用のデータに対してデータ拡張を行った例を示す。RGB 画像に対しては全ての拡張を、距離画像に対してはドロップアウトとアフィン変換を、吸引領域ラベ

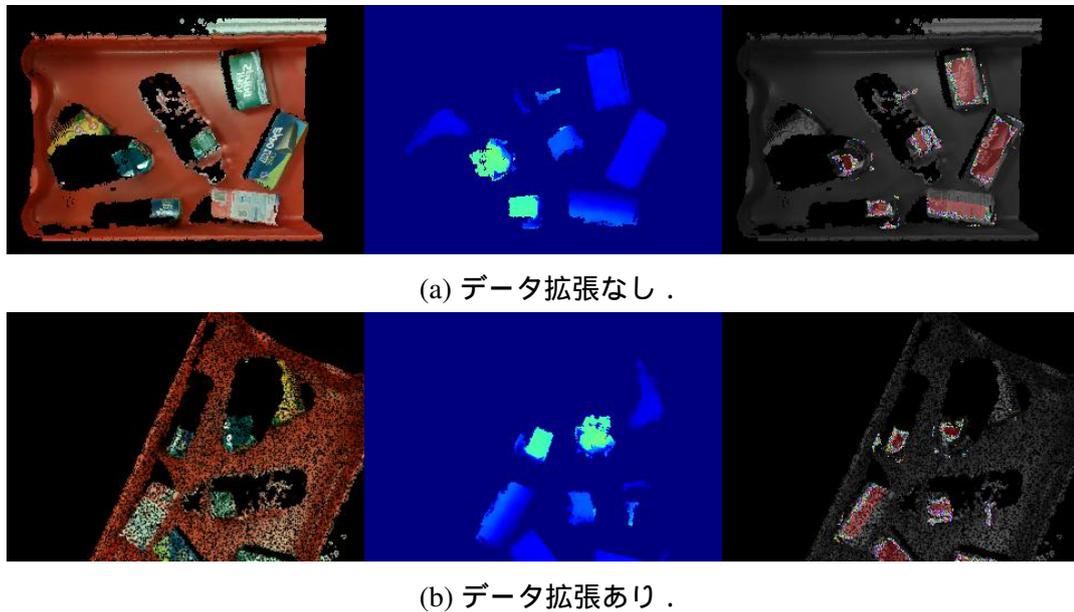


Fig. 5.17: 把持モダリティ領域分割の訓練におけるデータ拡張 [140] .

ルにはアフィン変換を行った .

把持融合の安定性評価

把持融合により，単独の把持モダリティ動作よりも把持を安定化できることを実験的に評価した．加えて，先行研究 [139] のようにバウンディングボックス近似に基づいて計画した動作では持ち上げられない凹型の物体を安定に持ち上げられることが示された．Fig.5.18 にこの実験のタスク環境を示す．ロボットは，把持モダリティ領域分割の統合による把持融合か，単独の把持モダリティ動作（吸引か把握），バウンディングボックス近似による把持融合のいずれかを用いて，Fig.5.18 の左側の赤いトートから物体を持ち上げる．各把持モダリティは把持モダリティ領域分割モデルによって予測された．バウンディングボックスを用いた把持融合（ボックスに基づく融合）では，吸引点は基本的に物体の三次元点群の重心とした．把握に関しては，物体の点群全体を囲むバウンディングボックスの最長辺の向きで z 軸周りの回転角を求めた．バウンディングボックスが小さく把握中心点まで届かないと判定された場合は，届くようになるまで吸引点を移動させた．持ち上げ後，ロボットの腕を振って把持安定性を確認した．腕振り動作中に物体を落とさなかった場合，試行成功と記録した．この手順を，一つずつ物体が入った 8 環境に対して行った (Fig.5.19) . これらの環境には，



Fig. 5.18: 把持融合の安定性評価実験のタスク環境 [140] .

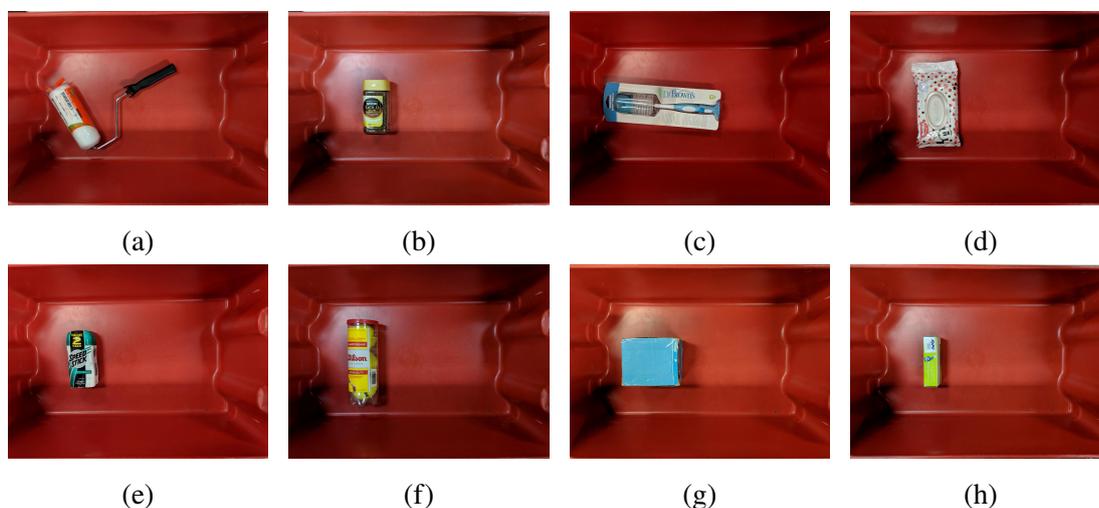


Fig. 5.19: 把持融合の安定性評価実験におけるトート内環境 [140] .

把持モダリティ領域分割モデルにとって未知の物体が四種類 (Fig.5.19a から Fig.5.19d) , 凹型の物体が一種類 (Fig.5.19a) 含まれている .

Table 5.3 に実験結果を示す . 把持モダリティ領域分割の統合による把持融合が最も安定であった . ボックスに基づく融合は , ローラーに対して吸引が失敗し , 把握も不安定なものになっていたため失敗した . 吸引が失敗したのは , 吸引点がロールと持ち手の間の物体ではない部分になってしまったからである . 把握に関しても , ロールと持ち手を繋ぐ細い金属棒を把握してしまったため , 不安定になった . この結果から , 把持モダリティ領域分割の統合で達成された , 正確な把持点の検出の必要性が明らかになった .

Table 5.3: 把持融合の安定性評価実験の結果 [140] .

| environment ID | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) | sum |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
| our grasp fusion | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 8/8 |
| pinch | × | ✓ | ✓ | × | ✓ | ✓ | × | ✓ | 5/8 |
| suction | × | × | ✓ | ✓ | × | × | × | ✓ | 3/8 |
| box-based fusion | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 7/8 |



Fig. 5.20: 実験対象の乱雑環境 [140] .

乱雑環境における把持融合

乱雑環境において、把持モダリティ領域分割の統合に基づく把持融合を用いた物体運搬実験を行った。この実験の環境 (Fig.5.20) においては、テニスボール容器が二つのティッシュ箱とカップ麺に挟まれており、そのままでは把握できない。使用した物体の中で、カップ麺は二つとも把持モダリティ領域分割モデルにとって未知物体である。トマトのカップ麺はインスタンス領域分割モデルにとっても未知物体である。ロボットは Fig.5.18 の左側のトートから物体を持ち上げ、右側のトートへと運搬する。Fig.5.20 に左側のトート内の対象環境を示す。

Fig.5.21 に実験の様子を示す。構成したシステムは未知物体を含む乱雑環境を認識し、不適切な把持を回避できることが示された。一回目のピックアップにおいては、テニスボール容器の状況が認識され、並列把持融合が回避された。代わりに、直列把持融合が選択・実行され、成功した。さらに、構成したシステムは、把持融合が行えない時に単独の把持モダリティの動作を選択できることが示された。二回目及び三回目のピックアップにおいては、カップ麺が把握によりピックアップされた。この単独把持モダリティの選択可能性は、継続的なタ

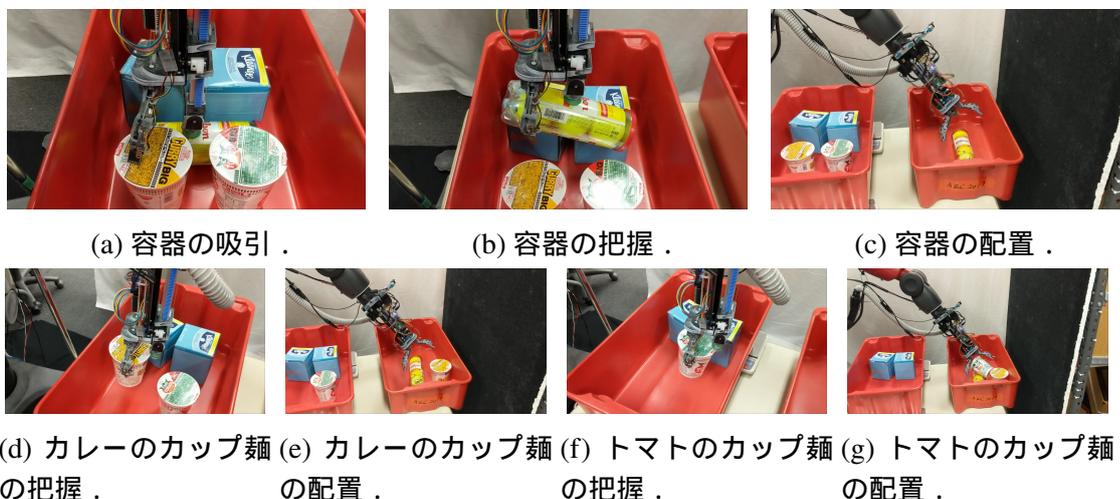


Fig. 5.21: 乱雑環境における実験の様子 [140] .

スク実行において重要である .

5.2 効果器距離覚と近接覚に基づく到達動作の制御

本節では、折り畳まれた物体に対する到達動作における効果器距離覚と近接覚を用いた制御について述べる .

5.2.1 効果器距離覚・近接覚による吸引位置補正動作

効果器距離覚・近接覚による吸引位置補正動作は、以下の8段階で構成されている .

1. 目標物体を吸引したことを気圧センサが検知するまで吸引位置にハンドを近づける .
検知した点に吸引位置を移動する
2. 目標物体を持ち上げないように直動関節を伸ばしながら、バウンディングボックス上面法線方向に掌を持ち上げる
3. 掌距離覚センサ正面に目標物体が確実にないか、不確実な状態かを判定し、補正動作の方向と順番を決める
4. 吸引をやめて物体を離し、直動関節を縮めつつ掌を近づける

5. 掌距離覚センサが段差を検出するまで，補正方向に向かって掌を動かす
6. 段差が検出できた場合，そこに物体側面があるとし，そこを指が回り込めるような吸引位置に移動して補正動作を終える
7. 規定の距離動いても段差が検出できなければ，補正方向に物体側面はないと判断し元の位置まで戻る
8. 次に試す補正方向がある場合は，段階5に戻ってその方向を試す．なければ吸引位置は変更しない

段階1により，バウンディングボックス上面法線方向の吸引位置のずれが補正される．段階2は，段階3で用いるToF方式効果器距離覚センサが距離を測れるよう，掌と物体の間の距離を確保するための動作である．

段階3において，掌距離覚センサ正面に目標物体が確実にないと判定された場合，吸引機構側に物体側面があると考えられるので，そちらの方向を補正方向とする．目標物体のあるなしが不確実な状態と判定された場合は，あると仮定して吸引機構と反対側，つまり劣駆動指側に物体側面があると考え，そちらの方向を補正方向とする．一方で，実際には側面が吸引機構側にある可能性も考え，次の補正方向として吸引機構側も設定しておく．不確実な状態と判定する理由は，薄い物体に対する補正動作において，物体のあるなしで生じるセンサ値の差が小さく，試行ごとの誤差を考慮した閾値が得られなかったためである．厚い物体に対しては，物体がセンサ正面になかった場合のセンサ値が十分に大きくなるので，閾値をこちら側に寄せることで，物体が正面にないと判定された場合は確実になく，それ以外は不確実であるという状態にする．

段階5では，物体上面と掌の間を一定距離に保ちながら掌を動かす，センサ値の変化を段差と検出する．ここで，素早い段差判定のため，掌の反射光強度方式近接覚センサも併用する．段階4で掌を近づけたのは，ToF方式効果器距離覚センサも反射光強度方式近接覚センサも計測可能な範囲に物体を入れるためである．反射光強度方式近接覚センサは，ToF方式効果器距離覚センサに比べて応答性がよく [145]，段差上を通過した際に即座に反応するため，段差に十分近い所で掌を止められると考えられる．しかし，赤外線反射強度は対象物体との距離だけでなく，対象物体の表面色にも影響されるため，正確な段差の判定は難しい．そこで，反射光強度方式近接覚センサの値の変化を検知して掌を止めた後に，ToF方式効果器距離覚センサの値が変化しているか確認する．変化していた場合は，段差を検出したとい

うことである．変化していなければ，反射光強度方式近接覚センサの初期値を取り直して補正動作を再開する．念の為，ToF方式効果器距離覚センサの値も常時確認しておき，反射光強度方式近接覚センサよりも先に値が変化した場合も掌を止める．

5.2.2 効果器距離覚による垂れ下がり面の状態認識

効果器距離覚による垂れ下がり面の状態認識では，吸引位置補正動作の後，指が垂れ下がり面を持ち上げることができるかを判定する．吸引位置姿勢決定で求めた位置姿勢で物体を少し持ち上げると，Fig.5.22 に示す 10 通りの状態の内，いずれかになると考える．この持ち上げ過程で，物体を落としたことが気圧センサにより検出された場合は，垂れ下がり面の状態認識は必要なくなるのでスキップされ，視覚認識から再試行する．物体の種類としては，軽い物体・上面が硬い重い物体・上面が柔らかい重い物体の三種類に分けられ，それぞれの 4 側面に対して吸引位置が考えられる．この内，正解の側面近くを吸引した場合は，どの物体であっても Fig.5.22a に似た状態となるため， $12 - 2 = 10$ 通りの状態を想定すれば良い．10 通りの内，正しい物体側面近くを吸引していて垂れ下がり面に指が届くような状態と，他の 9 通りを区別するのが本節で述べる状態認識である．この認識は，指先距離覚による認識と，掌距離覚による認識を組み合わせで実現されている．なお，効果器距離覚は検知範囲が広い為，指先を無理に物体に近づける必要がなくなり，腱をあまり引かなくてもよくなった結果，指先関節の意図しない屈曲は発生しなくなった．これにより，曲げセンサによる操作は必要なくなった．

5.2.3 指先距離覚による認識

ハンドの各指先には ToF 方式効果器距離覚センサが 2 個ずつ搭載されている．この指先を Fig.5.22 のように垂れ下がり面に向ける．垂れ下がり面に指が届くような状態では，Fig.5.23 のように，指先端に近い側のセンサが計測する距離が，もう一つのセンサの距離に比べて長くなる．これに対し，正解側面の隣の側面近くを吸引している 6 通りでは，どちらかのセンサが物体を検知していない状態か，どちらも同じ物体側面を検知して同じ距離を計測している状態になる．さらに，軽い物体の正解側面の反対側の側面近くを吸引している状態では，指先端に近い側のセンサが計測する距離が，もう一つのセンサの距離に比べて短くなる．以上

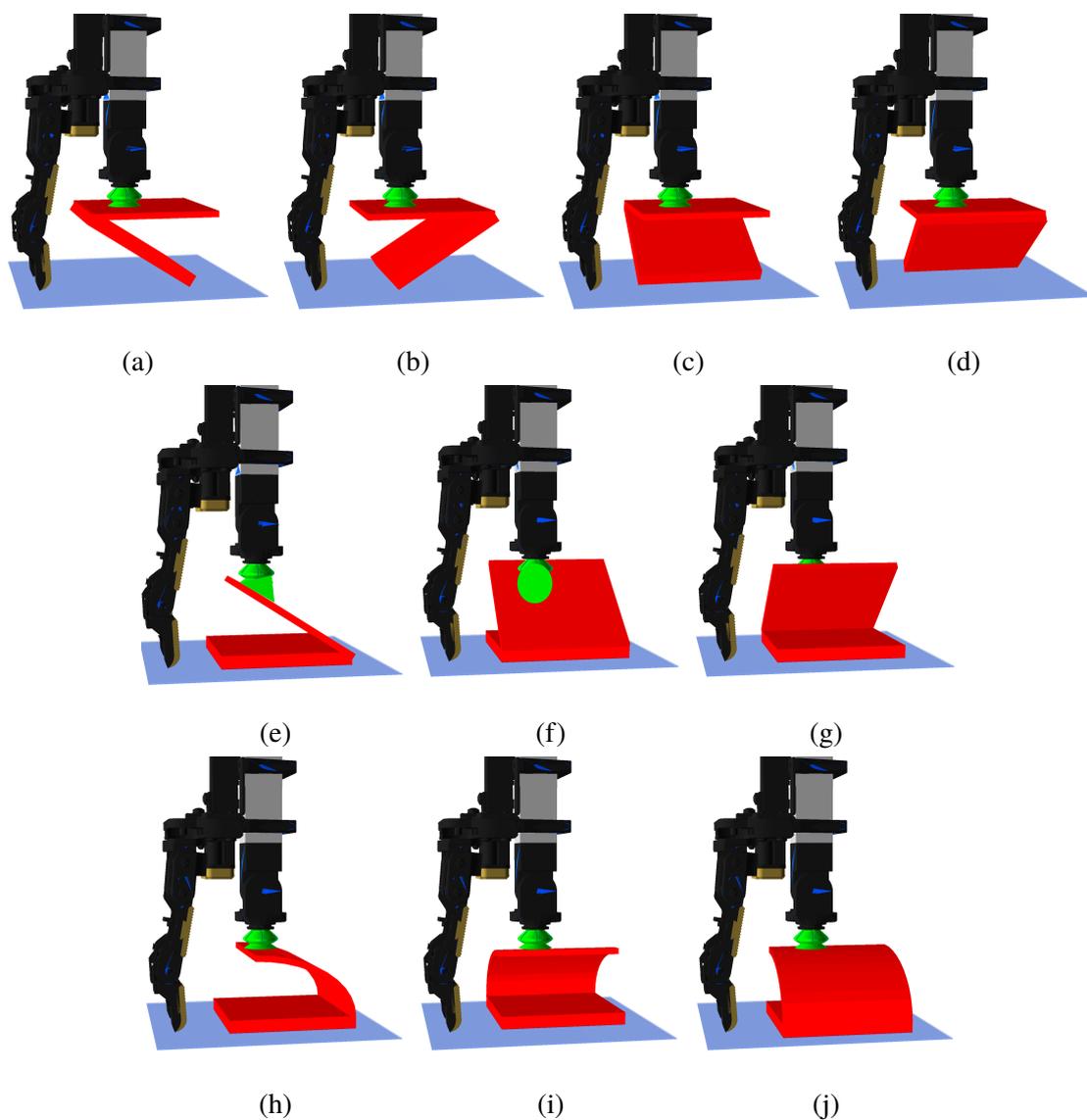


Fig. 5.22: 物体を少し持ち上げた際の状態の種類 [130]. (a) は、任意の折り畳まれた物体の正解側面近くを吸引した時の状態である. (b)~(d) は、軽い物体の誤った側面近くを吸引した時の状態である. (e)~(g) は、上面が硬い重い物体の誤った側面近くを吸引した時の状態である. (h)~(j) は、上面が柔らかい重い物体の誤った側面近くを吸引した時の状態である.

を利用することで、7通りの状態において、正解側面近くを吸引できていないことを判定できる.

また、上面が柔らかい物体の正解側面の反対側面近くを吸引している状態では、同サイズ

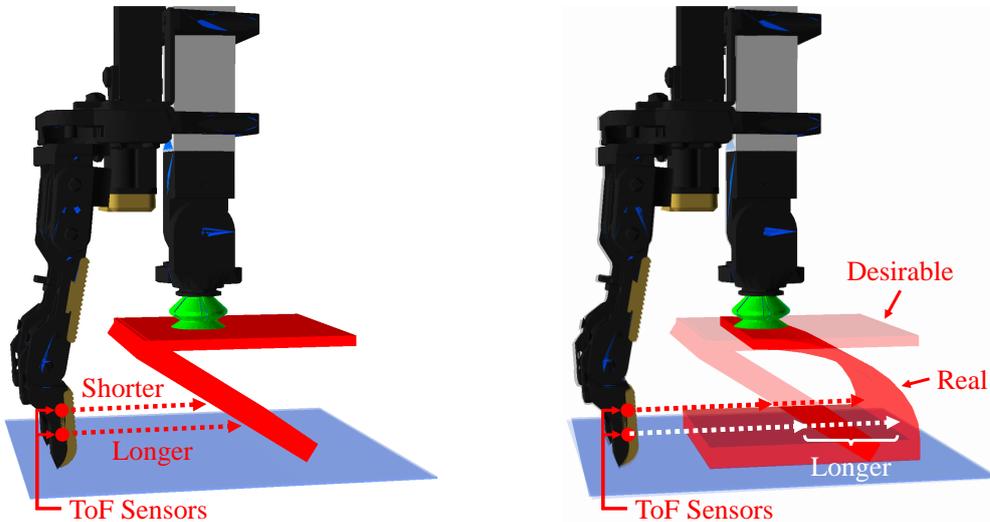


Fig. 5.23: 垂れ下がり面に指が届くような状態 [130]. 指先端に近い側の ToF 方式効果器を吸引している状態と、その反対側面付近距離覚センサの計測距離の方が、もう一方の ToF 方式効果器を吸引している状態の比較 [130]. 後者の方がセンサより長い.

Fig. 5.24: 上面が柔らかい物体の正解側面近くを吸引している状態と、その反対側面付近距離覚センサの計測距離の方が、もう一方の ToF 方式効果器を吸引している状態の比較 [130]. 後者の方がセンサの計測距離が長い.

の物体の正解側面近くを吸引している状態に比べ、指先センサの計測距離が長くなる。なぜなら、指先センサで検知できるのが物体上面の裏側となり、これは真空パッドで持ち上げられた部分から曲線を描いて垂れ下がっているためである。この様子を Fig.5.24 に示す。物体サイズは、バウンディングボックスの寸法として求まっているので、これを利用した区別を行うことで、先ほどの 7 通りと合わせて 8 通りを判定できる。

しかし、最後の一通り、すなわち上面が硬い重い物体の正解側面の反対側面近くを吸引している状態では、上面の代わりに真空パッドの方が歪んでしまい、上面が指先センサに近づいてしまう。この状態では、正解側面近くを吸引している 3 通りと区別することができない。そこで、掌センサによる認識を導入する。

5.2.4 掌距離覚による認識

指先距離覚による認識で正解状態と区別できなかった状態では、正解状態と比べて掌と物体上面が近づいている。これは、物体上面が硬いため、真空パッドを支点とするこのような状態になり、垂れ下がった部分と逆側の部分が上昇して掌に近づくからである。逆に正解状態では、垂れ下がった部分が掌側の物体上面を引っ張るため、掌と物体上面の距離は持ち

上げ前と比べて変わらないか、むしろ大きくなる。よって、掌距離覚センサと物体上面との距離を測ることで、正解状態と区別できると考えられる。具体的には、物体を持ち上げる前に掌センサの値を取得しておき、その値より持ち上げた後の値が十分に小さくなれば、上面が掌に接近しているとみなす。

5.3 近接覚に基づく到達動作の制御

5.3.1 垂れ下がり部分の認識

先行研究においては、指で物体の存在を検出する際には主に接触センサが用いられてきた [28, 148]。この検出方法は信頼性が高いが、接触した物体からの十分な反力が必要となる。一方で、垂れ下がり部分は弱い力で動いてしまうため、反力が十分に得られないと考えられる。そこで、垂れ下がり部分を触れずに検出するため、近接覚センサ [146] を用いる。

センサシステム

垂れ下がり部分の外側に指が届いて押し上げられるかを確認するため、Fig.5.25 に示すように、ハンド指先に近接覚センサを埋め込む。この際、指の巨大化を防ぐため、先行研究 [146] を参考にしてセンサを指先ゴムに内蔵する。使用したセンサ基板は Robotic Finger Sensor [147] からゴムを除去したものである。搭載されているセンサ素子は、Vishay 社の VCNL4040M3OE [149] (以下 VCNL4040 と略記) である。センサはハンドに内蔵されたコンピュータ (AAEON 社の UP Board [150]) に I²C 通信で接続される。

また、同じ近接覚センサを、Fig.5.25 のように掌にも内蔵した。このセンサは、バウンディングボックス認識の不確実性に対応するための吸引点補正に用いられる。これにより、バウンディングボックス認識が物体サイズを過大評価したり過小評価したりした場合に、吸引した物体面が指を動かす上での障害物となるのを防ぐことができる。

把握の単純化・適応化のため指は劣駆動となっているが、そのために指先関節の角度を指定して動かすことができない。これにより、Fig.5.5 のような状況において指先関節が意図せず曲がってしまうことがあるという、ハードウェアの不確実性が生じてしまう。これを検出するため、曲げセンサ (Spectra Symbol 社の Flex Sensor 2.2" [151]) を指先関節周りに、Fig.5.25 のように搭載している。

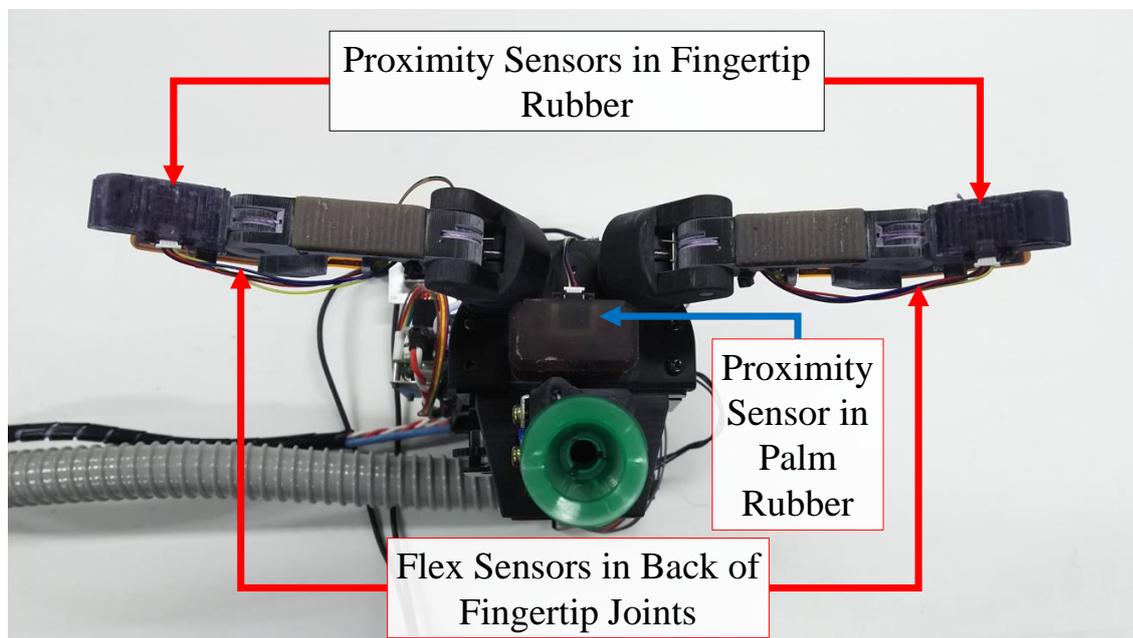


Fig. 5.25: 近接覚センサ及び曲げセンサの位置 [44].

目標物体の不適切な場所を吸引して持ち上げようとした場合、物体が傾いて吸引が剥がれ、物体が落ちることがあるという、吸引着把持の不確実性が生じる。これを以前のハンドより精度よく検出するため、気圧センサ（Bosch Sensortec 社の BME280 [152]）をホース内部から吸引管内部に移動した。

センサシステムにおけるその他の変更として、先行研究 [153] に基づいて二個の RGBD カメラを搭載し、ステレオカメラとしても使えるようにして、より詳細な三次元点群を取得できるようにしたという点が挙げられる。

シングルボードコンピュータ搭載によるスタンドアローン化

カメラのインタフェースが USB であるため、ケーブル取り回しの問題を解決するには、USB 通信が行えるコントローラをハンドに搭載することが必要になる。また、Ubuntu AMD64 オペレーティングシステムが動作すれば、これまでのソフトウェアを再利用することができる。よって、x64 CPU を持つシングルボードコンピュータを採用するのがよいと考えられる。このコンピュータは、二台のカメラと通信する必要があるため、それに耐える CPU 性能と、そのデータをロボット全体の通信ネットワークに流すことができる高速インタフェー

スを持つ必要がある．加えて，ハンドに搭載可能なサイズ，質量でなくてはならない．以上の要件を踏まえ，AAEON社のUP Board [150]を採用する．UP Boardの性能をTable 5.4に示す．CPUはクアッドコアであり，二台のカメラのデータをそれぞれ，カメラ性能通りの30 Hzで出力することができる．ネットワークインタフェースはギガビット・イーサネットであり，他PCからネットワーク越しに30 Hzでカメラデータを取得することができる．質量は公式には明らかにされていないが，使用したアクティブクーラー付きボードを実測した所，78 gであり，十分軽量であることがわかる．

Table 5.4: UP Boardの性能 [150]．

| | |
|------------|--|
| Processor | Intel Atom x5-Z8350 Processor (2M Cache, up to 1.92 GHz) |
| Memory | 4 GB, DDR3L-1600 |
| Storage | 32 GB eMMC |
| Ethernet | Gb Ethernet RJ-45 |
| Expansion | 40-pin GP-bus |
| Dimensions | 85.60 mm × 56.5 mm |

UP Boardは周辺機器として40ピンのGPIOを提供している．ここにはI²CポートとSPIポートが存在する．A/D変換器はないが，Microchip Technology社のA/D変換器MCP3208-CI/P [154]を介することで，SPI通信で電圧データを取得することができる．よって，近接覚センサ・気圧センサ・曲げセンサをUP Boardに直接繋ぐ．結果的に，UP BoardのUSBポートには，カメラ二台とモータコントローラが繋がる．

CPU性能及びストレージが十分であったので，ハンドのみが関係する処理は全てUP Board内部で行わせることにする．これにより，スタンドアローンとなり，他のロボットへ移植しやすくなる．また，ハンド関連処理が専用のCPUで行われるため，リアルタイム性の向上を図ることができる．

吸引点補正

掌近接覚センサによる吸引点補正を導入する．吸引点補正は，以下の5段階で構成されている．

1. 目標物体を吸引し，少し持ち上げる．

2. 吸引している物体面が掌に届くようなら，次の段階に移る．もし届いていなければ，以下の段階を飛ばして畳み操作失敗予測に移る．
3. 元の位置に物体を戻し，吸引を切る．
4. 吸引していた物体面が床と区別できるなら，次の段階に移る．もし区別できなければ，以下の段階を飛ばして畳み操作失敗予測に移る．
5. 吸引していた物体面が掌に届く間，物体エッジに向かって吸引点をずらし続ける．

第一段階の持ち上げは，次の段階での判定の信頼性を高めるために必要である．他の物体が目標物体近くにあった場合，吸引開始時点では掌近接覚センサがそれらの他物体に反応している恐れがある．しかし，物体を少し持ち上げると，吸引されている物体は持ち上がって掌近くに存在し続けるのに対し，他物体は動かず，掌から離れる．これにより，吸引している物体面が掌に届いているかどうかを，掌近接覚センサが反応しているかどうかで判断できる．

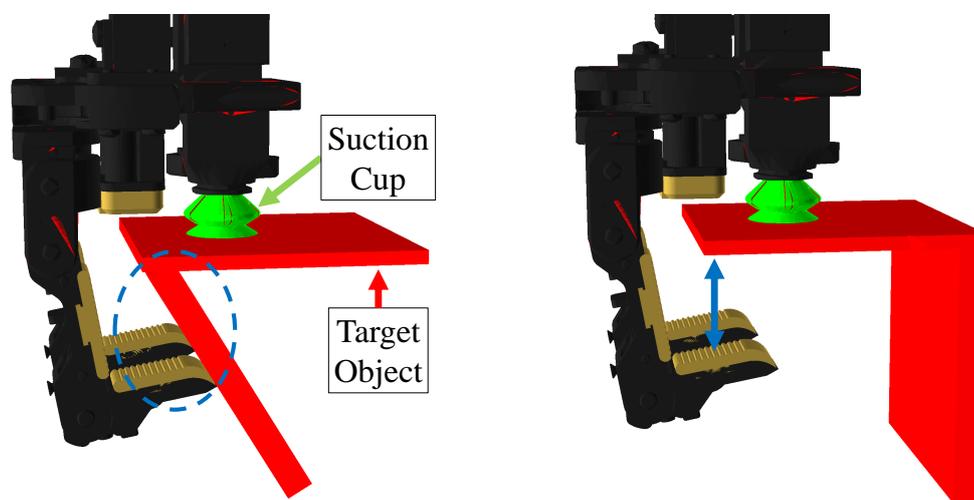
第二段階では，吸引した物体面が指を動かす上での障害物となるかどうかを判定したいが，指センサを使っての判定では，センサのついていない部分に吸引面がぶつかる場合を検出できない．そこで，掌近接覚センサを用いて，吸引した物体面が指を動かす上での障害物となる場合は常に成り立っている条件を用意した．成り立つ理由は，指が真空パッドから見て掌と同じ側にあり，掌よりも遠い位置にあるからである．

第四段階では，吸引していた物体面が掌に届かなくなったことを第五段階において検出できない場合を事前に判定する．その場合は，第五段階を行った結果吸引点が目標物体から外れてしまうことが考えられるので，第五段階をスキップする．床の上に物体がないときの掌近接覚センサ値を事前に取得しておき，それと現在値を比較することで判定を行う．

第五段階では，物体バウンディングボックス表面と掌の間を一定距離に保ちながら掌を動かす．掌近接覚センサ値が顕著に変わった時に，吸引していた物体面が掌に届かなくなったと判断し，その時点での真空パッド位置を新たな吸引点とする．

畳み操作失敗予測

吸引点補正の後，目標物体の吸引点を吸引して持ち上げる．この際，目標物体を落としたことが気圧センサにより検出された場合は，以下の予測は必要ないのでスキップされ，物体



(a) 垂れ下がり面が持ち上げられる場合． (b) 垂れ下がり面が持ち上げられない場合．

Fig. 5.26: 指先関節が意図せず屈曲した場合でも、腱を引いて指が開かないようにすれば、垂れ下がり部分が持ち上げられる場合はその部分が指先に近く (a)、それ以外の場合は物体上面裏側が遠くに検出される (b) ため、両者を区別できる [44]．

認識から再試行する．目標物体を落とさなければ、指が垂れ下がり部分の外側に届くか確認する必要がある．まず、Fig.5.5 のように、指をある程度曲げ、指先近接覚センサ値を取得する．センサ値が一つでも閾値未満であった場合、指は垂れ下がり部分の外側に届かないと判断でき、畳み操作の失敗が予測される．この時は物体を元の場所へ戻し、物体認識から再試行する．畳み操作の成功が予想された場合は、指をさらに曲げることで物体を畳み、運搬に移る．

指先関節が意図せず曲がると、腱の長さを一定にしているため指が開いてしまい、指先が垂れ下がり部分から離れて予測ミスを引き起こす恐れがある．これを防ぐため、曲げセンサによって指先関節の屈曲を検出した場合は腱をより引くことで、指を Fig.5.26 に示すような状況に置く．この状況でも、垂れ下がり部分の外側に指が届かない場合は、指先と対面する物体吸引部の内側が指先から十分離れているため、畳み操作失敗を予測することができる．

5.4 近接覚に基づく把持動作の制御

5.4.1 把持切り替え制御

物体が指先の近接覚センサの検知範囲に入る前の物体認識結果に基づいて吸引着から把握への切り替えを行おうとした際に、実際の対象物が把握するには大きすぎる、もしくは小さすぎると判断された場合は切り替えを中止する。前者と判定されるのは、把握動作中に近接覚センサが一つでも障害物との接触を検出するのが早すぎた場合である。この場合、本来指が接触すべき面とは別の面に指が触れている (Fig.4.24 や Fig.4.25b の状態) と考えられ、実際の対象物が把握するには大きすぎたと判断できる。後者と判定されるのは、把握動作中に近接覚センサが一つでも障害物との接触を検出するのが遅すぎた場合である。この場合、指が対象物のどことも接触できていない (Fig.4.25a の状態) と考えられ、実際の対象物が把握するには小さすぎたと判断できる。切り替えを中止することで、前者の場合、真空パッドのある方向とは別の方向に物体を押し吸引を剥がしてしまうことがなくなる。また、スライディングの場合は吸引スライディングとなり、対象物を慎重に扱うようになるので、失敗率が下がる。

近接覚センサは Fig.5.27 に示すように、把握機構指先の透明な滑り止めゴム内部に埋め込む。透明なゴム内部への近接覚センサの埋め込みは、先行研究 [146] を参考にしている。使用したセンサ基板は、SparkFun Electronics 社の Robotic Finger Sensor [147] からゴムを除去して取り出したものである。センサは赤外線をゴムの外に向けて発射し、反射光の強度を計測する。反射光には、近接する物体で反射したもの以外に、ゴムと外気の境界で反射したものが含まれているため、後者の反射光によるセンサ値を除去しなければならない。また、物体が十分に近接している場合、センサと物体の距離の変化に対するセンサ値の変化が大きく、接触を検出するための閾値を適切に設定するのが困難であった。そこで、以下の式で補正されたセンサ値を用いる。

$$I_{\text{calib}} = \frac{I_{\text{raw}} - I_{\text{init}}}{\left(\frac{I_{\text{init}}}{2500}\right)^{1.5}} \quad (5.1)$$

ここで、 I_{raw} は現在のセンサ値、 I_{init} はセンサ周辺に物体がない時のセンサ値である。 I_{init} が、ゴムと外気の境界で反射した光によるセンサ値である。 $\left(\frac{I_{\text{init}}}{2500}\right)^{1.5}$ で割ることで、センサ値の変化が抑えられる。

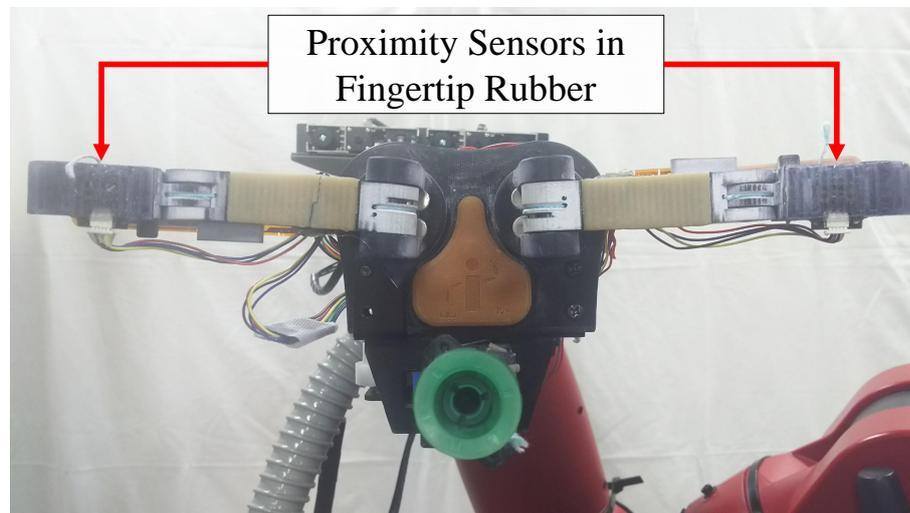


Fig. 5.27: 近接覚センサの位置 [70] .

5.4.2 カキャップ式把持動作制御

指先に搭載した近接覚センサを実行中のピッキング動作の調整のために用いた。直接的な円筒把握においてハンドや物体を傷つけないようにするため、近接覚センサが一つでも障害物を検知したら、手首を動かすことによるハンド全体での対象物への近接動作を停止し、指を動かすことによる把握動作を開始する。これにより、障害物との干渉により指に過大な力がかかることを防止しつつ（力のキャップ）、指を対象物に十分近づけた状態から把握動作を開始できる。ここで、環境を正確にモデリングしてそのモデル表面と指が近づくように動かすのではなく、指と物体の接触を検出するというより信頼性の高い方法を採用した。

センサシステム

近接覚センサの搭載方法については前述した通りである。以下ではこれ以外のセンサについて述べる。把握の単純化・適応化のため指は劣駆動となっているが、そのために指先関節の角度を固定できない。これにより、指先関節が意図せず曲がってしまうことがある。この屈曲が発生すると、指先から指根本関節までに必要な腱の長さが短くなるので、腱の長さを一定にしていると過剰になり、指根本関節が指を開く方向に回転してしまう。これにより、プリシェイピングが阻害される可能性がある。屈曲を検出してこの状況を回避するため、Fig.5.28 に示すように、指先関節の周りに曲げセンサを搭載する。屈曲を検出した場合

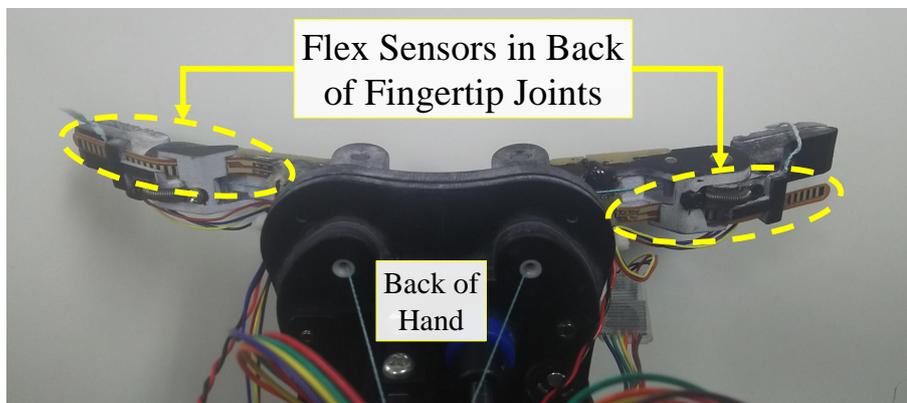


Fig. 5.28: ハンドにおける曲げセンサの位置 [70] .

は即座に腱を巻き取るという反射動作を実装することで、Fig.5.29 に示すように、ハンド形状を可能な限り保つことができるようになる。反射行動の閾値として、対象の関節が半分屈曲した時の対応する曲げセンサのセンサ値を設定する。この閾値をそのセンサのセンサ値が上回ったら、対象の関節が完全に屈曲すると余る長さだけ腱を巻き取る。この動作により、対象の関節が完全に屈曲した時 (Fig.5.29b) でも、その関節以外の関節の状態は屈曲前と同じになる。屈曲角度が最大でない時は他関節が少し動いてしまうが、反射動作を実装しない場合と比べれば角度の最大誤差は小さくなり、プリシェイピングを阻害する危険性は小さくなっている。

曲げセンサを指の背側に搭載して指と対象物の接触面から離れたことにより、センサ搭載前と同じ接触面が維持される。また、近接覚センサも指先の滑り止めゴムに埋め込むことで、同様の維持効果を得た。したがって、物体を安定に把持するハンドの能力をセンサ搭載により損なうことはなかったと考えられる。

近接覚センサを用いた把握の実験

近接覚センサを用いた直接的な円筒把握がハンドや多様な物体を傷つけないことを検証した。物体は、近接覚センサによる検出に必要な赤外線を照射するとよく反射して返ってくるものと、返ってきにくいものに分けられる。後者に指が近接する場合、前者に対する場合と比べて、近接覚センサの値の上昇は緩やかである。このため、近接覚センサの値が閾値以上になって手首が止まった時には、既に過大な力が指と物体の間に発生している可能性がある。

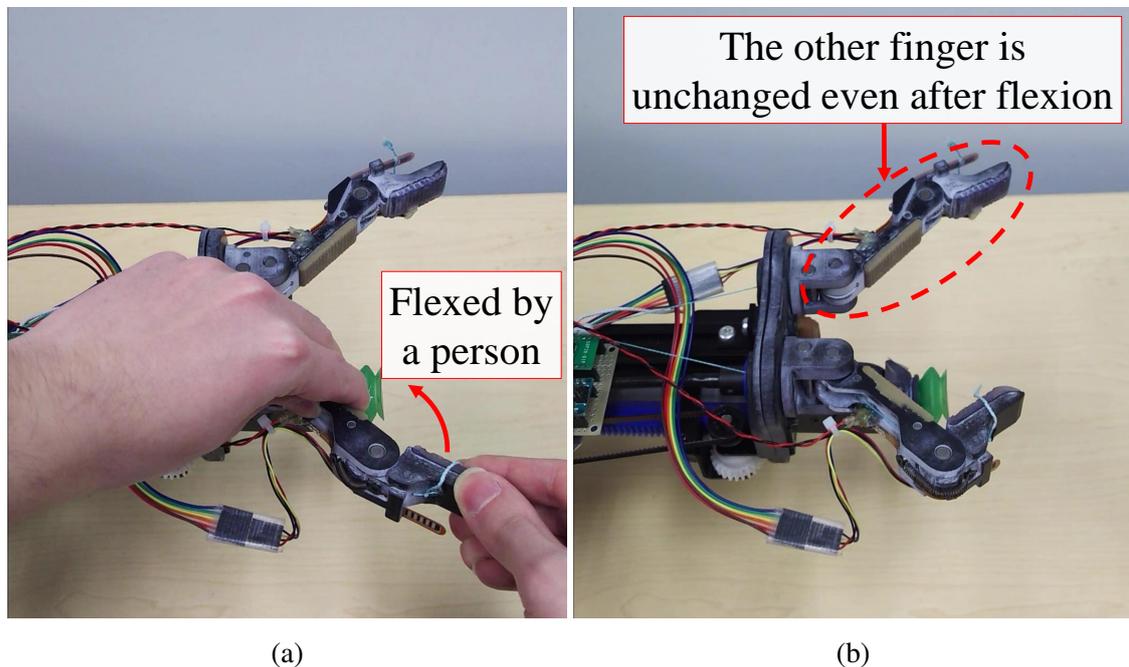


Fig. 5.29: 人が指先関節を曲げた (a) 後であっても、曲げセンサの反応に応じて余分な腱が巻き取られるため、他の指は変化しない [70] .

前者の Fig.4.16 における典型例は電球の箱 (ID: 25) である．これは、白くて赤外線を反射しやすいからである．後者の Fig.4.16 における典型例は鉛筆立て (ID: 27) である．これは、表面が網目状なため赤外線が当たりにくく、当たったとしても黒いため反射されにくく、反射されたとしても金属光沢があり鏡面反射になるためセンサとは別方向に反射される可能性が高く、センサに反射光が返ってきにくいという特性があるからである．これらの二物品に対して、Fig.5.30 と Fig.5.31 に示すように直接的な円筒把握を試行した．各物品の下に設置された電子天秤により、ハンドが加えた力を初期状態からの重量値の差分として計測した．

両物品とも壊さずに把握して持ち上げることに成功した．電球の箱に対する実験においては、指と箱が触れる前に手首が止まった．鉛筆立てに対する実験においては、指が鉛筆立てに $155 - 92 = 63$ g 重の力をかけたところで手首が止まった．Fig.5.32 から、この力が把握を始める前の最大値であったことが確かめられた．この力は、多くの日用品が傷つかないと考えられるほどの弱さであり、今回使用した鉛筆立てよりも照射した赤外線が返ってきにくい物体は日用品の中では考えにくいいため、今回の方法で多くの日用品を傷つけずに把握できると考えられる．以上から、近接覚センサを用いれば、物体の詳細なモデルを前提としなくて

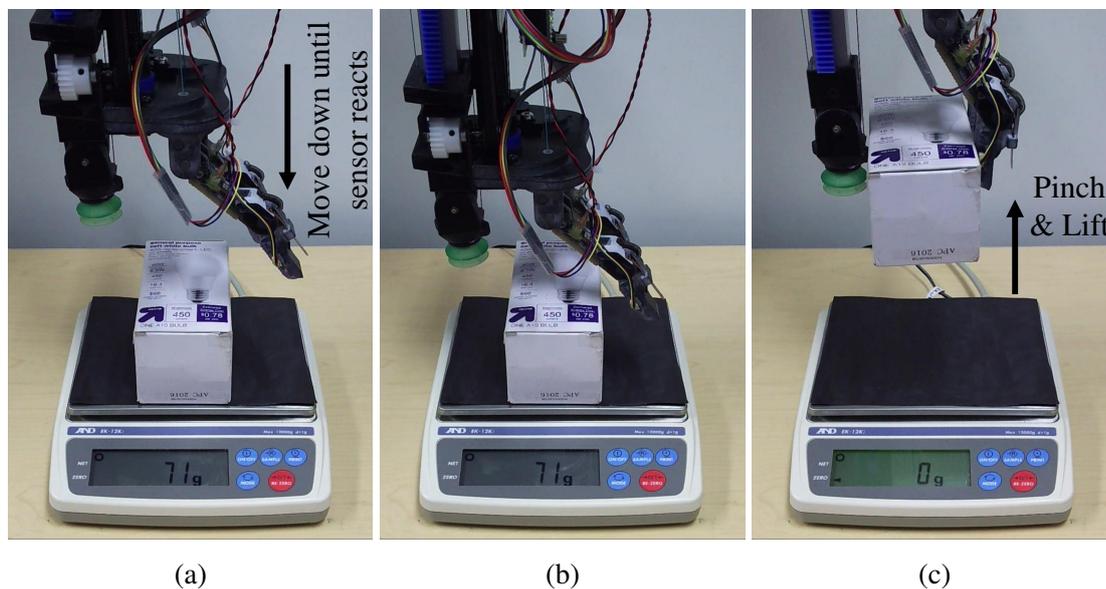


Fig. 5.30: 電球の箱に対する円筒把握動作 [70]. (b)において、近接覚センサが箱を検知し、指が箱に触れる前に手首が止まった．これにより、ハンドや箱が傷つくことは防がれた．

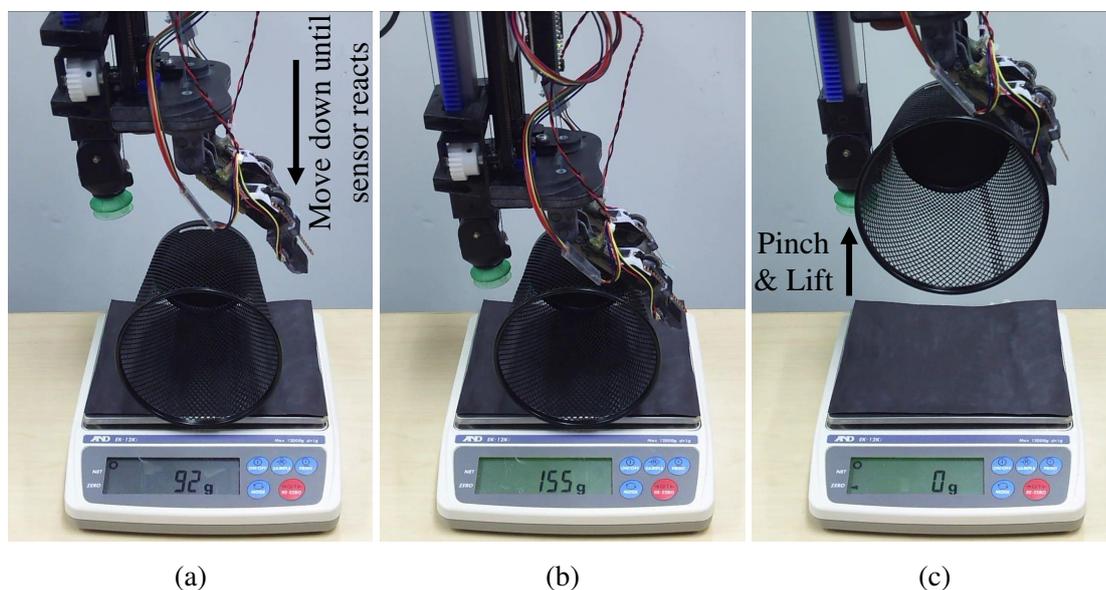


Fig. 5.31: 鉛筆立てに対する円筒把握動作 [70]. (b)において、近接覚センサが鉛筆立てを検知し、63 g 重の力を指が鉛筆立てにかけたところで手首が止まった．この力は、多くの日用品が傷つかないと考えられるほどの弱さである．

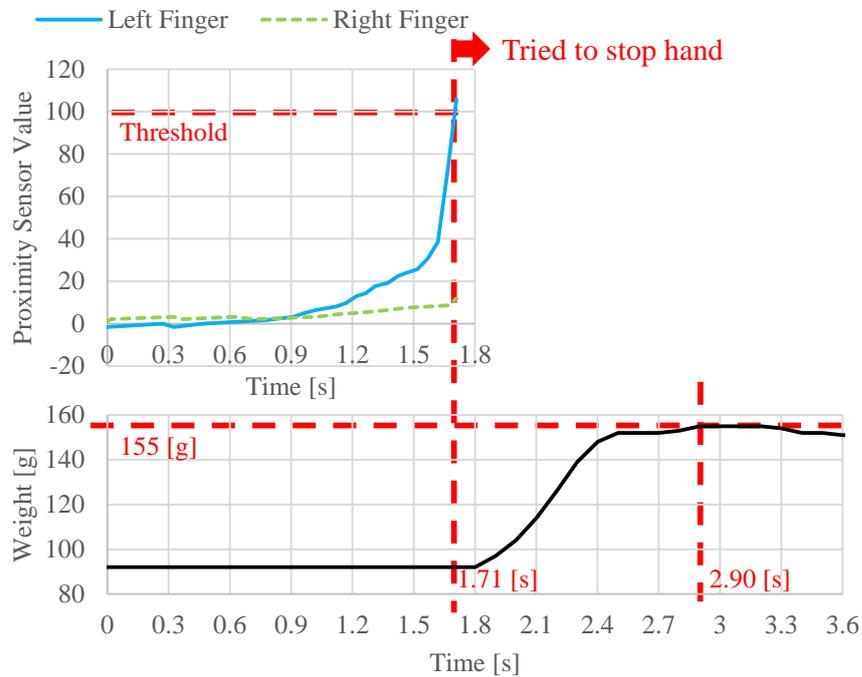


Fig. 5.32: 鉛筆立てに対する実験における、把握開始前までの近接覚センサ値と電子天秤計測値 [70]。左指の近接覚センサ値が閾値を超えて手首停止指令が出されてから最大重量が計測されるまでに 1.19 秒が経過した。この遅延は、指令から動作までの遅延や減速に要した時間、計測の遅延によって起きたと考えられる。

も、また近接覚センサでは検知しにくい物体に対しても、ハンドや物体を傷つけずに把握が行えることが確かめられた。

5.5 効果器距離覚と近接覚の融合に基づく把持動作の制御

5.5.1 力一定化式把持動作制御

ハンド指先にあり、至近距離まで計測できるが対象物体に依存する近接覚センサのモデルパラメータを、遠距離を計測できる距離センサを用いて物体把握動作中に獲得する手法を構築する (Fig.5.33)。ここで、モデルとは、センサからセンシングされた物体までの距離とセンサ出力との関係式のことである。至近距離まで計測できる近接覚センサと遠距離を計測できる距離センサで構成された近接覚センサモジュール (Fig.5.34) を開発し、パラメータ獲得に用いる。また、取得したモデルを、一定の弱い力による脆弱物体の精密把握や、極薄

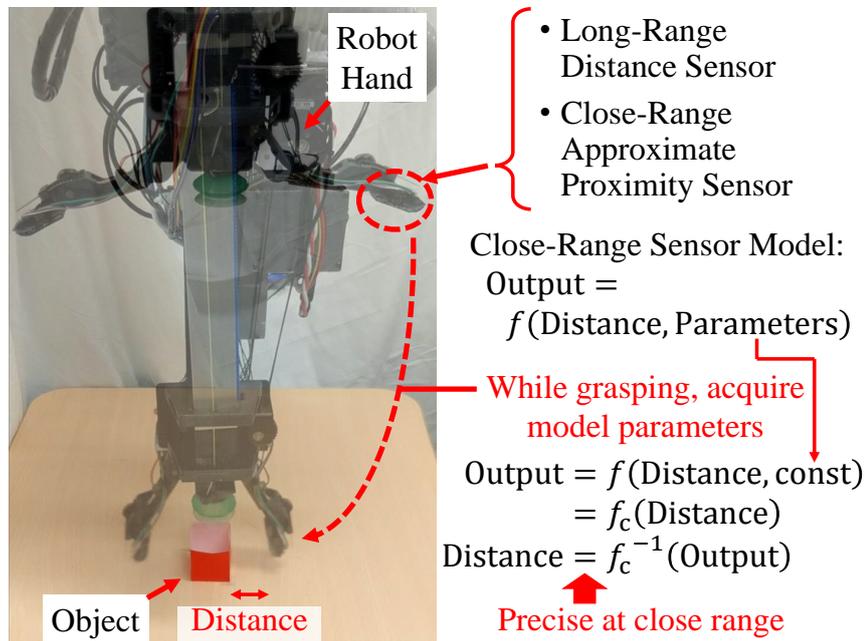


Fig. 5.33: 至近距離まで計測できる近接覚センサのモデルのオンライン獲得 [155] . ハンド指先にあり, 至近距離まで計測できるが対象物体に依存する近接覚センサのモデルパラメータを, 物体把握動作中に獲得する . 獲得したモデルを用いて, 至近距離においてセンサと物体との距離を精密に表す出力を計算する .

物体の把握の検証に応用する .

ロボットによる把握に関する多くの研究において, ハンドに搭載された近接覚センサが活用されてきた [156, 157, 26, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 44, 145, 164, 165] . これらのセンサは触覚情報を拡張して視覚情報と繋ぎ, マニピュレーションにおける切れ目のないセンシングを実現すると考えられる . このため, これまでに様々な種類の近接覚センサが用いられてきた . 反射光強度式センサ [156, 26, 158, 159, 162, 44, 165] , 静電容量式センサ [157, 161] , 環境雑音のスペクトル変化を利用するセンサ [160] , 複数光源の変調発光による受光信号の位相ずれを利用するセンサ [163] , 光学式 Time-of-Flight (ToF) センサ [145, 164] などが挙げられる . Table 5.5 にこれらのセンサの比較を示す . 最初の二種類である反射光強度式センサと静電容量式センサは至近距離 (< 10 mm) での計測が可能であるが, 光反射率や材質, 体積, 導電性のような物体特性に強く依存している [166] . さらに, これらのセンサの最大計測可能距離は短い . 環境雑音を利用するセンサや複数光源を利用するセンサは物体特性への依存性をほぼ克服しているが, やはり計測可能距離は短く, 前者は 3 mm, 後者は 20 mm

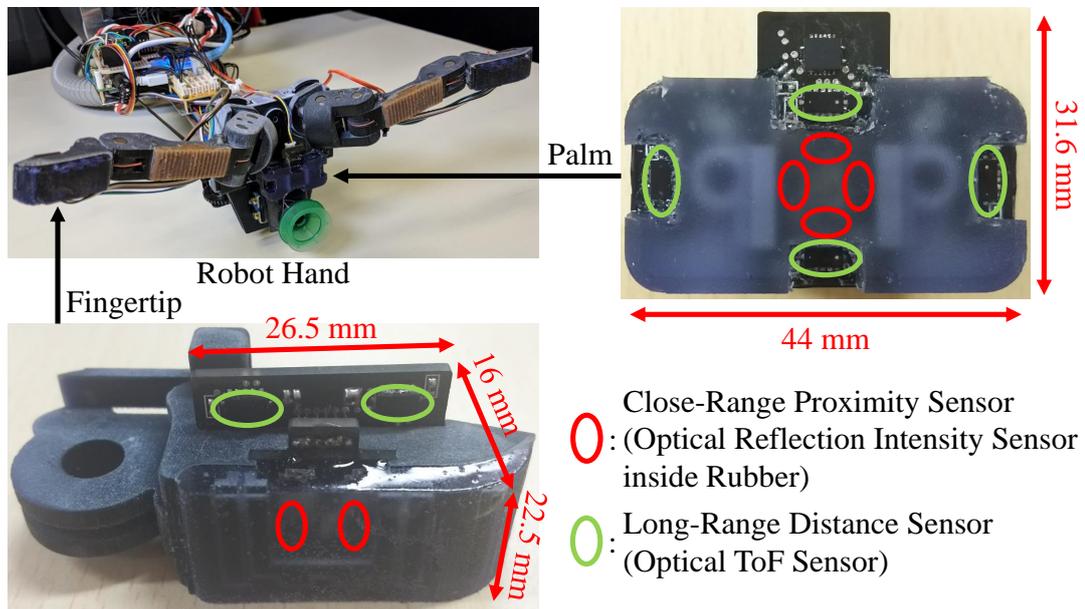


Fig. 5.34: 至近距離まで計測できる近接覚センサと遠距離を計測できる距離センサで構成された近接覚センサモジュール [155] . 指先用モジュールと掌用モジュールを開発した . このモジュールは , 複数の点において精密な至近距離計測が可能であるにも関わらず , 指先や掌の大きさに影響を与えない小ささである .

Table 5.5: ロボットによる把握において用いられる近接覚センサの比較 [155] . 物体特性に依存せずに広範囲を計測できるセンシングシステムを目指す .

| | Optical Reflection Intensity, Capacitive | Optical ToF | Sound [6], With Modulated Light [9] |
|---------------------------------------|--|-------------|-------------------------------------|
| Close-Range | ✓ | × | ✓ |
| Long-Range | × | ✓ | × |
| Little Dependent on Object Properties | × | ✓ | ✓ |

} This Study (Fusion)

である . 光学式 ToF センサは物体特性にほぼ依存せずに遠距離を計測できるが , 至近距離を精密に計測できない . この欠点に対処するため , センサの不感帯に物体が入らないようにすると , 指先が厚くなってしまいう問題が生じる . 以上から , 物体特性に依存せずに , 至近距離も遠距離も含んだ広範囲を計測できるセンサが存在しないことがわかる .

これらの特性を両立させる最も単純な方法として考えられるのは、複数種類のセンサを融合することである。至近距離まで計測できるが対象物体に依存する近接覚センサと遠距離を計測できる距離センサの融合は、一見すると至近距離で物体特性に依存したままだが、これを解決して目標の特性を両立させる方法を提案する。物体特性への依存性を克服する上で必要だったのは、二種類のセンサの計測可能範囲の重複領域に対象物体が存在する間に、至近距離センサの対象物体依存パラメータを獲得することであった。獲得されたパラメータを用いるモデルにより、至近距離センサの出力から、対象物体までの精密な距離値が生成できる。この値は、遠距離センサの計測が不正確になる至近距離でも精密なままである。以上のモデル獲得は一組のデータ入力で完了し、把握動作中にオンラインで行えるため、最新の環境に素早く適応できる。先行研究においても、至近距離まで計測できるセンサの物体依存性を解決する取り組み [26, 167, 165] がなされてきたが、必要なデータが多いなどの理由から、オンラインで行うことができなかった。また、提案手法によるセンサモジュールは、単純な至近距離センサと遠距離センサしか必要としないため、小型化できる。最終的に、Fig.5.34 に示したように、指先のモジュールの寸法は 22.5 mm × 26.5 mm × 16 mm になった。また、広範囲の検知（最低でも 5–400 mm）も可能になった。

さらに、獲得されたセンサモデルを脆弱物体の精密把握や紙のような極薄物体の把握の検証に応用する。Fig.5.35 に、センサモデル獲得と把握、検証の処理を示す。脆弱物体の把握においては、指先の至近距離センサから生成された距離値がヒューリスティックに定めた閾値を下回った時に指の動きを止めることで、物体を握り潰さずに持ち上げる。生成された距離値は対象物体にほぼ依存せず精密であるため、異なる特性を持つ物体に対しても共通の閾値を使用できる。ここで、脆弱物体の持ち上げをモジュールの応用先に選んだのは、脆弱物体を傷つけない把握を可能にすることが近接覚センサの利点の一つとされている [160, 163] からである。脆弱物体からの反力は小さく、一般的な圧力センサでは検知が難しいため、これらのセンサを使うと物体を握り潰してしまうまで指を止められないと考えられる。

極薄物体の把握の検証においては、オンラインで獲得した指先の至近距離センサの対象物体依存パラメータを用いて、指の間に物体があるかどうかを検出する。指の間に物体がなかった場合、センサは対向する指先を検知する。本研究において用いているセンサ内蔵指先は先行研究 [162] と同様に透明なゴムで覆われているので、それに対して獲得されるパラメータは紙に対して獲得されるパラメータとは大きく異なっているはずである。これに対し、従来の触覚情報を用いた把握検証 [168, 169, 170, 171, 172] は、極薄物体を把握した時と何も

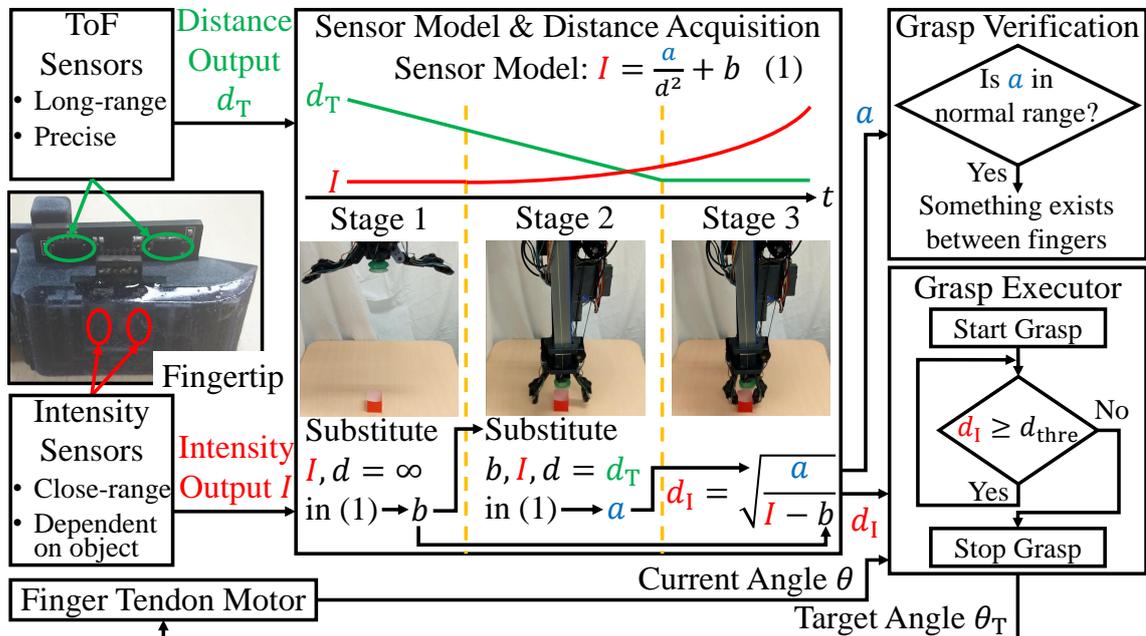


Fig. 5.35: センサモデル獲得と把握，検証の概要 [155] .

把握していない時を識別するのが困難である．なぜなら，極薄物体が指先表面形状に馴染んでしまい，ある時とない時で指先の変形がほぼ変わらない上に，薄いため指間距離もほぼ変わらないからである．

至近距離センサのモデル

至近距離センサとしては，透明なゴムに埋めた反射光強度式センサを用いる．センサモデルとして，光の減衰に関する逆二乗の法則に基づく以下のモデル [165] を仮定する．

$$I = \frac{a}{d^2} + b \tag{5.2}$$

ここで， I [digit] は強度センサの出力， d [mm] は対象物体までの距離， a [digit · mm²] は対象物体依存パラメータ， b [digit] は主にゴム内での光の反射により生じるオフセットパラメータである． I はセンサ内の A/D 変換器からのデジタル値 (digit) で表される．前者のパラメータは主に，対象物体の反射率やゴム内での光損失に影響される．センサ前のゴムの泡密度や表面粗さなどの状態はセンサごとに異なるため，パラメータもセンサごとに異なってくる．(5.2) は単純であるため，リアルタイムに計算できる．

モデルのオンライン獲得と距離計測

物体を把握する時、ハンドは最初対象物体から離れた位置にあり、そこから対象物体に近づいていくことが多い。この過程でまず、強度センサが検知できないほど対象物体が遠くにある時 ((5.2) において $d = \infty$) の強度センサ出力 I を、オフセットパラメータ b として獲得する。ついで、対象物体が強度センサと遠距離センサ (光学式 ToF センサ) の両方で検知されている時に、対象物体依存パラメータ a を獲得する。この獲得は、ToF センサの出力 d_T [mm] を (5.2) の d に代入することによって行う。まとめると、把握動作は以下の三段階に分けられる。

1. 物体が遠く、ToF センサのみが検知している時
2. ToF センサと強度センサが両方とも物体を検知している時
3. 物体が近すぎて ToF センサは正確に検知できず、強度センサが検知している時

以上の三段階とセンサモデル獲得の概要は Fig.5.35 に示されている。

ToF センサと強度センサが同じ方向を向いており、ToF センサから物体までの距離である d_T と強度センサから物体までの距離である d が等しくなるほど二つのセンサが近ければ、(5.2) と I, b, d_T を用いて a を獲得できる。このことは、二つのセンサが異なる平行な平面上にあって平面間の距離 d_0 [mm] が既知である場合にも拡張できる。拡張の際には、元々の ToF センサ出力から d_0 を引いたものを d_T として与えればよい。このことを利用して a を獲得する。また、段階 1 においても、時折 I が b を上回って a が計算できる時があるが、非常に小さな $I - b$ で計算された a は小さく信頼性が低いため、段階 1 では常に $a = 0$ とする。結果として、 a は以下のように計算できる。

$$a = \begin{cases} 0 & \text{(Stage 1)} \\ (I - b)d_T^2 & \text{(Stage 2)} \end{cases} \quad (5.3)$$

段階 2 における計算は、ほぼ同じタイムスタンプを持つ I と d_T が取得され、かつ、センサ選定や配置によって決まる段階 2 の条件が満たされている時、常に行われる。

段階 2 と 3 においては、最新の a と (5.2) を用いて精密距離出力 d_1 [mm] が強度センサ出力から計算される。この計算を明示的に書くと以下ようになる。

$$d_1 = \begin{cases} \infty & \text{(Stage 1)} \\ \sqrt{\frac{a}{I-b}} & \text{(Stages 2 and 3)} \end{cases} \quad (5.4)$$

検証付き精密把握

精密把握は、脆弱物体の握り潰しを防ぐために行われるものであり、指先の強度センサの出力から生成された精密距離出力 d_1 と、指の腱を牽引するモータの現在角度 θ を入力とし、そのモータの目標角度 θ_T を出力とする。Fig.5.35 に流れが示されている。まず、指を閉じきる目標角度を出力し、指を閉じている最中 ($\theta < \theta_T$) に、両指から送られてくる精密距離出力 d_1 を監視し続ける。全ての出力 d_1 がヒューリスティックに定めた閾値 d_{thre} [mm] を下回ったら ($d_1 < d_{\text{thre}}$)、両方の指先が対象物体に十分近いということなので、モータに停止を指令する ($\theta_T = \theta$)。ソフトウェア上位層から停止指令を出してから、指が実際に停止するまでには遅延があるため、この遅延後に指が物体に接触しているような閾値を設定する。接触センサと異なり、指が物体に接触していない状態のセンサ値を閾値に設定できるため、たとえ遅延が大きくても、柔らかい接触状態で指を停止させることが容易である。また、距離出力 d_1 が対象物体低依存であるため、異なる反射率を持つ物体に対して同一の閾値 d_{thre} を使用できる。

把握後に、指先の強度センサの対象物体依存パラメータ a を用いて、指の間に物体が存在するか検証する。全ての a がヒューリスティックに定めた範囲に収まっている場合、物体の存在を検知する。前述のように a はセンサごとに異なった値となるが、後述する実験においては一つの範囲のみを用いることができた。

センサ選定

これまで本研究において製作してきたハンドと同様に、反射光強度式センサとしてVCNL4040を用いる。センサを透明なゴムに埋め込んでLED電流を180mAに設定すると、計測可能範囲はおおよそ5–60mmであった。この範囲は、同じセンサファミリのセンサ(VCNL4010)を似た設定(透明なゴムに埋め込んでLED電流を120mAに設定)で用いた先行研究[162]において示された範囲であるおおよそ0.5–7cmに近い。一方で、この範囲は、VCNL4040のカタログ[149]における範囲(0–200mm)よりは狭い。この原因としては、ゴムが計測に誤差を生じさせる[162]ことと、カタログにおける範囲は複数の電流設定における範囲の和であることが考えられる。センサのパラメータを獲得するためには、強度センサとToFセンサ両方の有効な値が同時に取得できる必要があるため、ToFセンサの範囲は強度センサの範囲と十分に重複していなければならない。加えて、ToFセンサの最大計測可能距離は長いほう

がよい。センサには小ささも求められる。よって、STMicroelectronics社のVL53L0XをToFセンサとして用いる。VL53L0Xのキャリアボードの販売店の情報[173]とVL53L0Xのカタログ[174]を見ると、センサの寸法は4.4mm×2.4mm×1.0mm、計測可能範囲は最低でも30–400mmであることがわかる。多様な物体に対して実用した結果、実用上の最低計測可能距離は45mmであることがわかった。同じセンサファミリのVL53L1Xの最低距離は、カタログ[175]によると40mmである。実用上の最低距離がカタログ値よりも長くなると推測されることを考えると、この最低距離は長すぎる。同じセンサファミリにはVL6180Xも存在しているが、これの最大計測可能距離は100mmであり[176]、VL53L0Xの方が望ましい。

VL53L0Xの精度に関しては、カタログ[174]によると、タイミング・バジェットが20ms (High-speed range profile)の時の計測距離の標準偏差は5%である。この標準偏差は、(5.3)と(5.4)を通じて d_1 の標準偏差に取り込まれるため、 d_1 の標準偏差は5%を超えるはずである。VCNL4040の標準偏差も取り込まれ、より大きな標準偏差となるはずであるが、VCNL4040のカタログ[149]に標準偏差の記載がないため見積もれない。

近接覚センサモジュールを搭載した指先と掌

これまで製作してきたハンドと同様に、強度センサは指先及び掌の滑り止めゴムに埋め込んだ。これまで、指先には東レ・ダウコーニング株式会社の高透明度シリコン Sylgard 184を用いてきたが、今回は日新レジン社の透明ウレタンゴムであるグミーキャスト 透明を用いた。変更の目的は、摩擦係数を上げることと、紫外線を用いた3Dプリンタで製作した型でシリコンを硬化させると起こる硬化阻害[177]を回避することである。しかし、Projet3500 HDで造形し、通常の後処理を行った型でグミーキャストを造形すると、型にグミーキャストが貼り付いて剥がれなくなる問題が発生した。通常の後処理では、恒温器に入れてサポート材の多くを落とした後、油で満たした超音波洗浄器に入れて残ったサポートを落とし、最後に中性洗剤で油を落として仕上げている。この最終段階で油が落ちきらず、造形物表面の微細な穴にたまったままになり[178]、油と親和性の高いグミーキャストが微細な穴に引き込まれて貼り付いてしまうのではないかと考えられる。離型材[179]を使用したのが、効果が見られなかったため、油を使用せずにサポート材を十分に落とすことで、グミーキャストが貼り付かない型に仕上げた。具体的な手順としては、まず恒温器に3時間程度入れてサポートの多くを落とした後、型の下にキッチンペーパーを敷いて12時間程度温める。途中、3回程度部品表面を拭いてサポート除去を促進する。窪みや穴内部のサポートは自然には抜けに

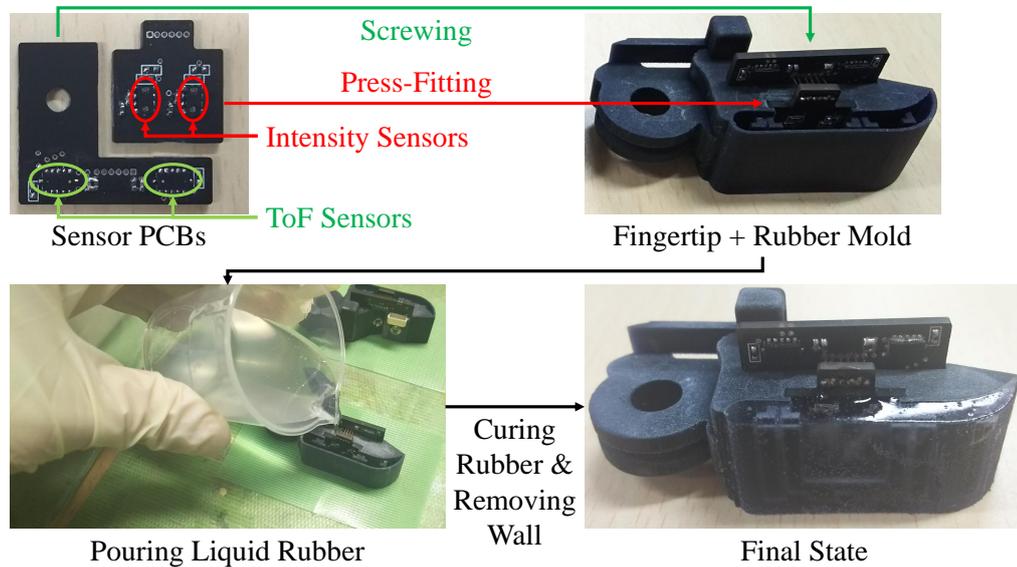


Fig. 5.36: 指先の製造工程 [155]. 指先には、二個の強度センサが載った基板が一枚と、二個の ToF センサが載った基板が一枚搭載されている．基板は、ゴムの型としても機能する指先に圧入されるか、ねじで固定される．

くいので、綿棒で吸い取る．

ToF センサのゴムへの埋め込みも試したが、常に約 20 mm を出力するようになってしまった．これは主にゴム内の小さな気泡によるものと考えられる．しかし、ゴムの可使用時間が 10 分未満と短かったため、十分なガス抜きが困難であった．そこで、ToF センサを実装するために以下の二つの方法を考案した．

1. ゴム側面に突起部を設け、そこに ToF センサを載せる
2. ゴム領域を削って窪みを作り、そこに ToF センサを載せる

指先に対しては、安定した物体操作に必要な摩擦力を保つため、方法 1 を採用する．掌に対しては、元々の面積が指先に比べて大きく、削っても大きな影響がないため、方法 2 を採用する．

Fig.5.36 に指先とその製造工程を示す．各指先には二枚の基板が用いられる．片方には二個の強度センサが載っており、ゴム内に埋め込まれる．もう片方には、指先の背側にねじで固定すると指側面から飛び出す突起部があり、そこに二個の ToF センサが載っている．背側への固定により強度センサと ToF センサの範囲の重複は 6 mm 広がった ($d_0 = 6 \text{ mm}$)．前述の通り、この拡大によりセンサモデル獲得は行いやすくなる．基板はポリウレタン被覆線を

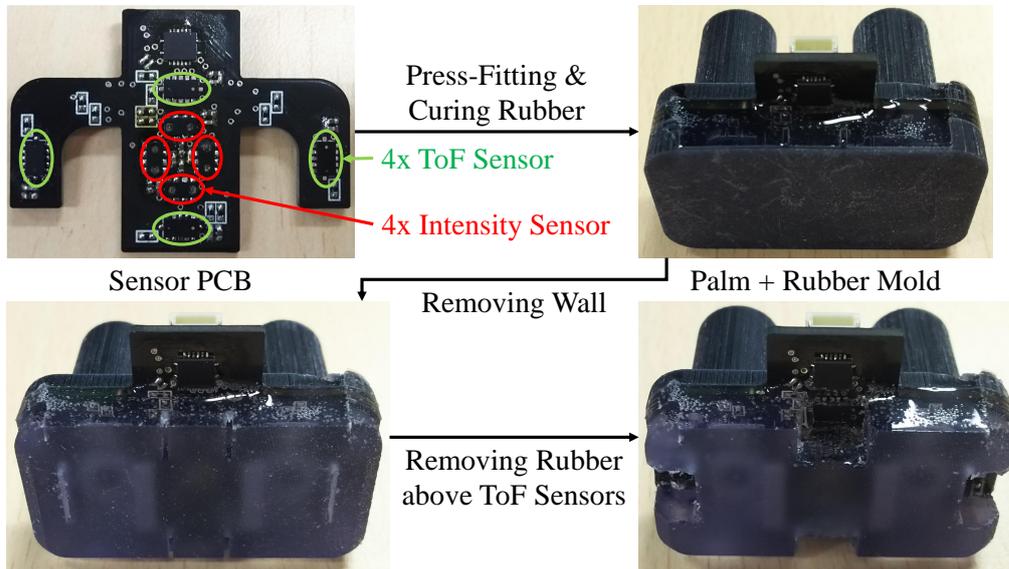
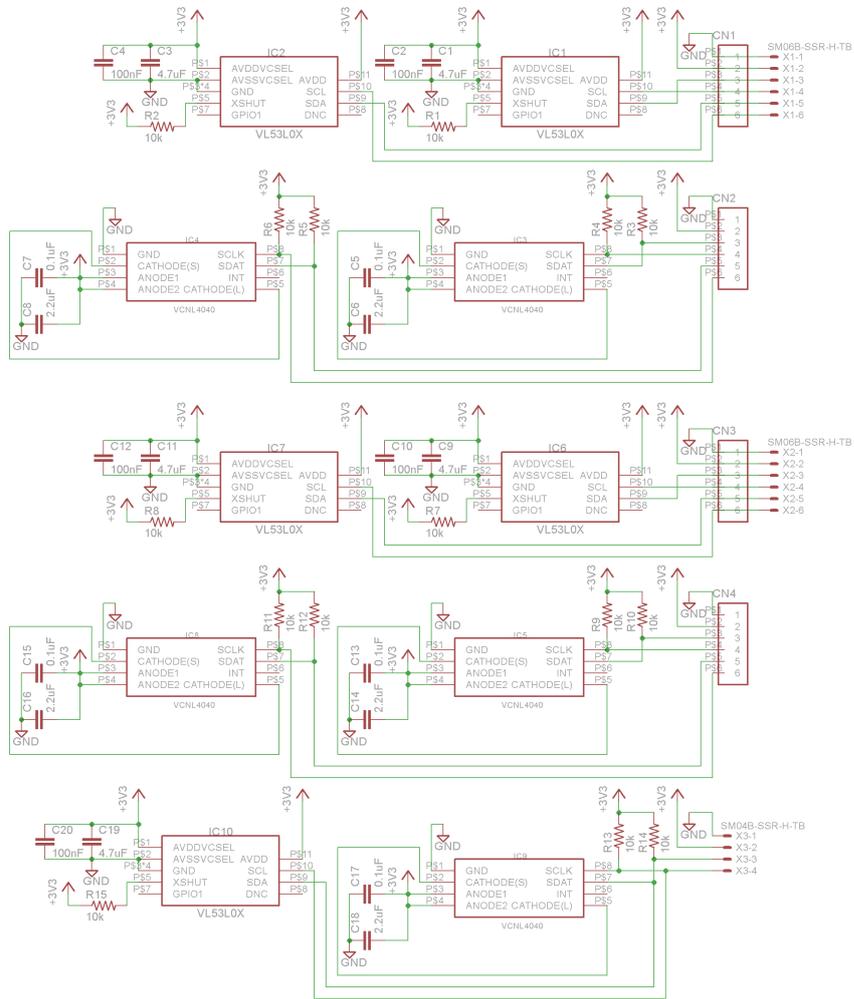


Fig. 5.37: 掌の製造工程 [155] . 掌には、四個の強度センサと四個の ToF センサが載った基板が一枚搭載されている . 基板は、ゴムの型としても機能する掌に圧入される . ゴムの硬化と型の壁の除去の後で、各 ToF センサ上のゴム領域を除去して、センサが距離を正確に計測できるようにする .

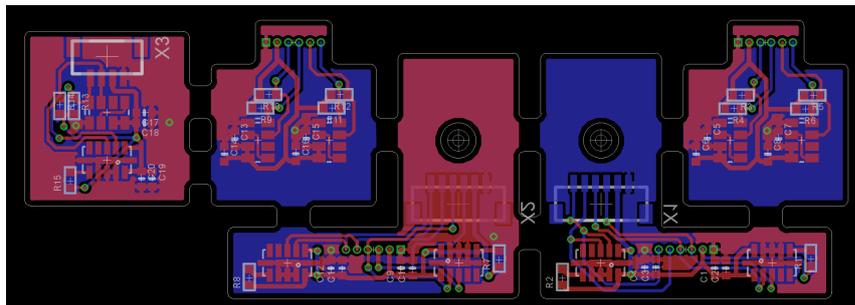
介して接続される . 強度センサと ToF センサは異なるスレーブアドレスの I²C インタフェースを持つため、一つの I²C ラインに強度センサと ToF センサを一つずつ繋ぎ、指先ごとに二つの I²C ラインを設ける . 結果として、各指先からは 6 本のケーブルが延び、ハンドのコンピュータ (AAEON 社の UP Board) に接続される .

Fig.5.37 に掌とその製造工程を示す . 使用した基板には中心付近に四つの強度センサが、外縁に四つの ToF センサが載っている . センサは全て同一平面上にあるので、 $d_0 = 0$ mm である . 基板上でゴムが硬化した後、型でゴムにつけておいた窪みをカッターとマイナスドライバで深くすることにより、各 ToF センサ上のゴム領域を除去する . この際、ToF センサの発光部の窪みにゴムが詰まっていると、検知範囲に物体がない状態でも距離が計測されるという問題が発生したので、詰まったゴムを裁縫用の待ち針で除去した . 掌基板には Texas Instruments 社の I²C マルチプレクサ PCA9546A を搭載し、全てのセンサをそのマルチプレクサに接続する . 結果として、掌からは四本のケーブルが延び、コンピュータに接続される .

指先用基板の回路図及び配線図を Fig.5.38 に、掌用基板の回路図及び配線図を Fig.5.39 に示す . 基板製造コストを下げるため、複数の基板を一枚の基板に面付けしたものとなっている . なお、指先用基板の一番左側に面付された基板は、掌の試作に用いたものであり、最終

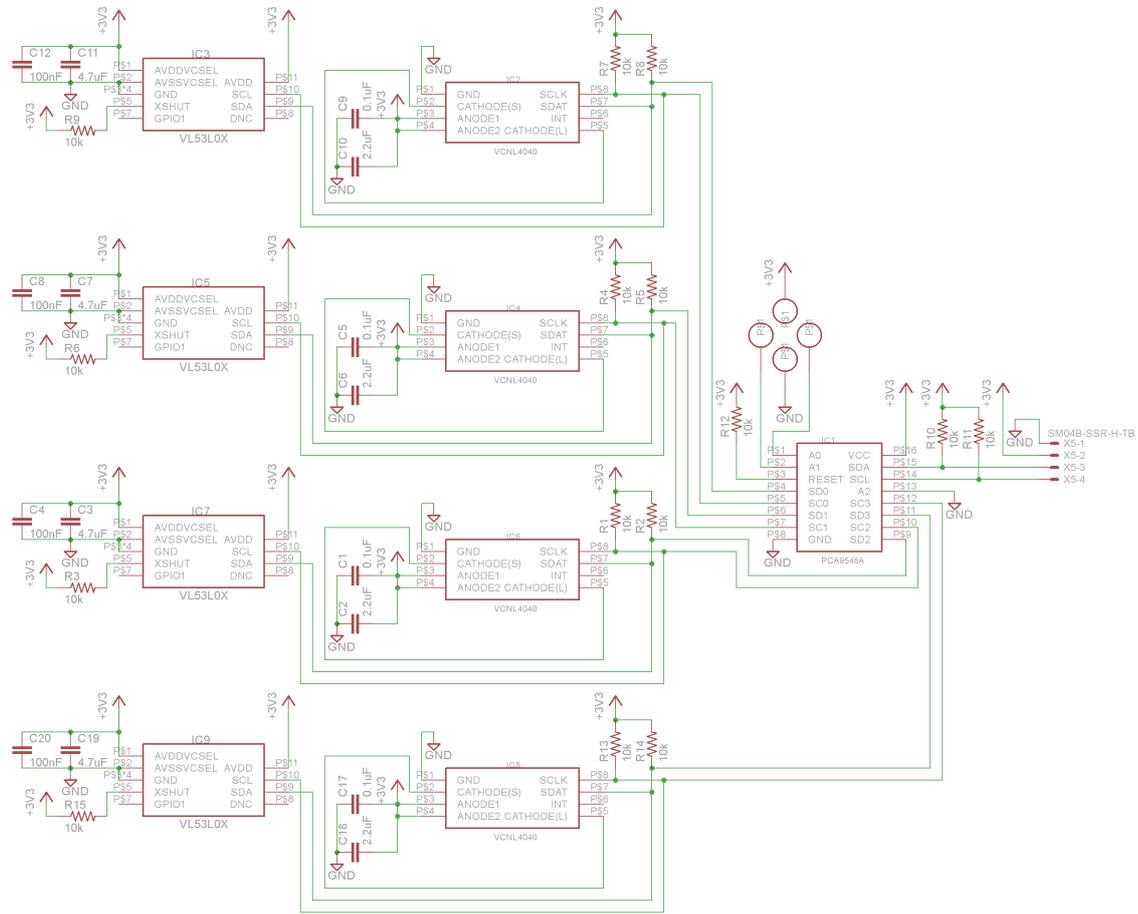


(a) 回路図 .

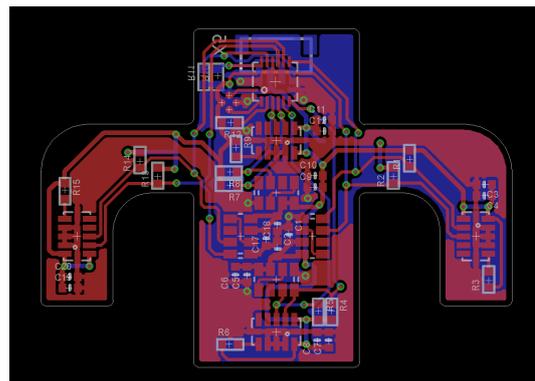


(b) 配線図 .

Fig. 5.38: 指先用基板の回路図及び配線図 [130] .



(a) 回路図 .



(b) 配線図 .

Fig. 5.39: 掌用基板の回路図及び配線図 [130] .

的には使用しない。回路製作については、Fig.5.38b 及び Fig.5.39b の配線図から作ったデータで業者に基板を製作してもらい、その上に自力で部品を実装した。特に、効果器距離覚センサを手実装するのが困難であったため、Fig.5.40 のようなステンシルを作り、それを用いて Fig.5.41 のようにクリーム半田を印刷、効果器距離覚センサを載せて、Fig.5.42 のように裏側からヒートガンで炙ることで半田付けした。この状態で動作テストを行い、動作しなかった場合はクリーム半田不足で浮いているパッドがあると判断し、半田を追加で流し込むことで対処した。

指先用基板に関しては、部品実装後に、Fig.5.43 のように切り離す。

センサ出力の取得

ToF センサと強度センサの値を 20 Hz で取得した後、以下のローパスフィルタを適用した。

$$F[T] = 0.3f[T] + 0.7F[T - 1] \quad (5.5)$$

ここで、 T は現在の時間ステップ、 $f[T]$ は現在の生のセンサ値、 $F[T - 1]$ は一つ前の時間ステップにおけるローパスフィルタの出力である。

ToF センサのローパスフィルタ出力に対しては、さらに前述のオフセット d_0 を以下のように適用した。

$$d_T = d_{\text{filtered}} - d_0 \quad (5.6)$$

ここで、 d_{filtered} が ToF センサのローパスフィルタ出力を表す。前述のように、 d_0 は指先センサの場合 6 mm で、掌センサの場合 0 mm である。以上のように計算された d_T を最も近くにある強度センサのモデル獲得に用いる。

至近距離センサのモデル獲得システムの評価実験における共通条件

全実験において、段階 2 は $20 \text{ digit} \leq I - b \leq 1000 \text{ digit}$ と $45 \text{ mm} - d_0 \leq d_T \leq 60 \text{ mm}$ が満たされる時であるとし、(5.3) に使われる I と d_T のタイムスタンプの許容誤差は 0.02 秒と、精密把握の閾値 (d_{thre}) は 25 mm と、把握検証の範囲は $10000 \text{ digit} \cdot \text{mm}^2 \leq a \leq 2000000 \text{ digit} \cdot \text{mm}^2$ とした。また、各指において、指の先端に最も近い ToF センサー一個と強度センサー一個を用いた。複数の実験において、Fig.5.44 に示す 12 種類の色紙を用いた。色紙は両面同色であり、厚さ 0.19 mm である。

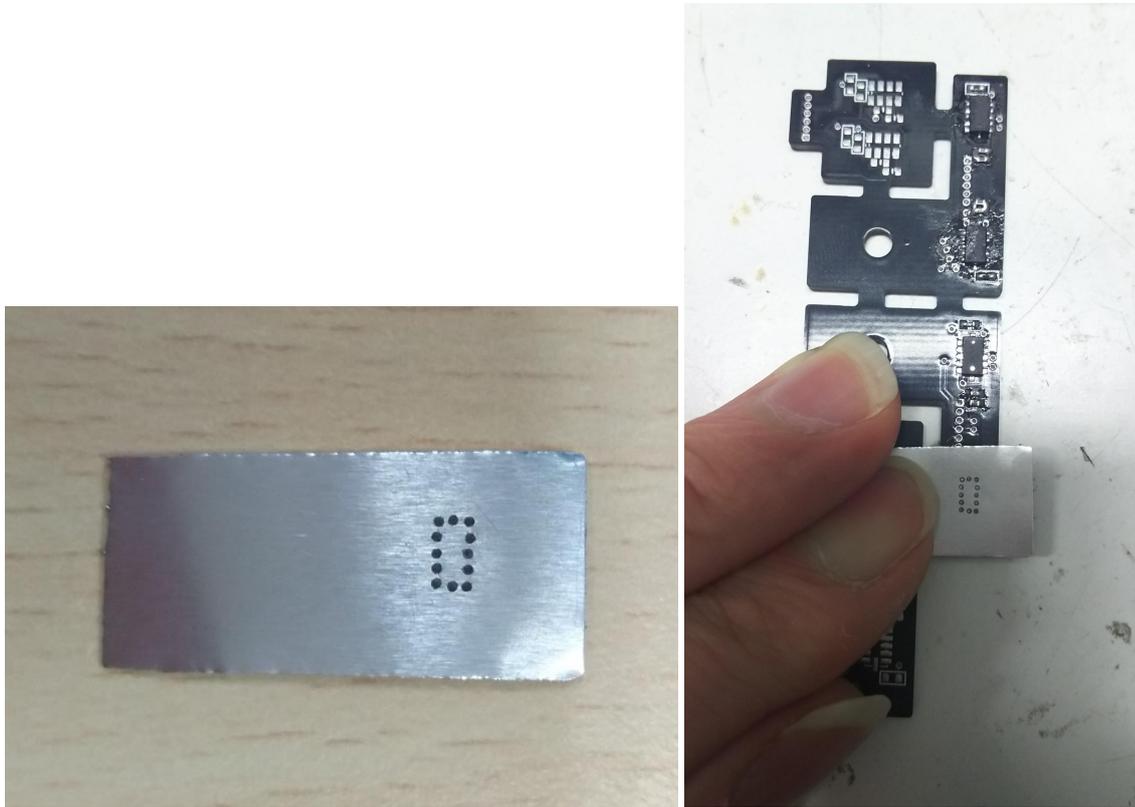


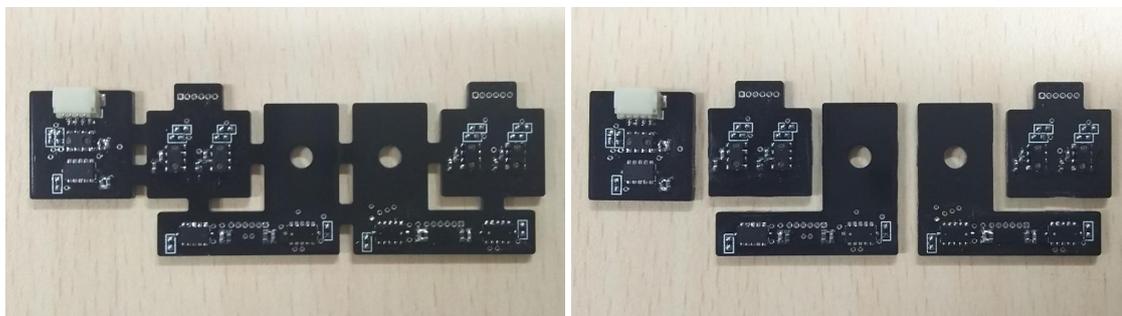
Fig. 5.40: 効果器距離覚センサ実装用ステンシル [130] .Fig. 5.41: クリーム半田の印刷 [130] .



Fig. 5.42: ヒートガンでの炙りによる半田付け [130] .

距離計測実験

構成したセンサモジュールが Fig.5.44 に示す 12 種類の色紙に対して距離を計測できるか確認する実験を行った．それぞれの色紙に対し，9 種類の距離の測定を 10 回ずつ，紙に平行



(a) 切り離し前の基板 .

(b) 切り離し後の基板群 .

Fig. 5.43: 指先用基板の切り離し [130] .

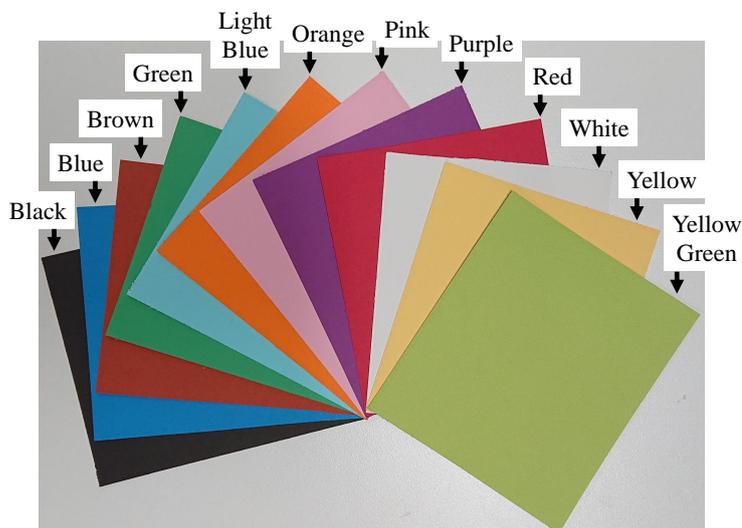


Fig. 5.44: 複数の実験で使用した色紙 [155] . 12 枚の色は全て異なる . 両面同色であり , 厚さ 0.19 mm である .

にした指先の一組の強度センサと ToF センサを用いて行った . 指先において , 強度センサからゴム表面までの距離は 5.4 mm であったため , これを測定対象距離の下限に設定した . この距離から 85.4 mm までを , 10 mm 刻みで測定対象距離とした . 実験中の動作としては , 強度センサ出力 I の最小値をオフセットパラメータ b として設定する必要があるため , まず指先と紙を 285.4 mm 離れた状態で I を計測して b とし , その後指先を近づけて距離を 85.4 mm としてから , 計測と 10 mm ずつの接近を繰り返した . 各計測におけるゴム表面から紙までの距離 (例えば 80 mm) は 1 mm 目盛の定規で確かめられたため , 距離の正解値の誤差は ± 0.1 mm である .

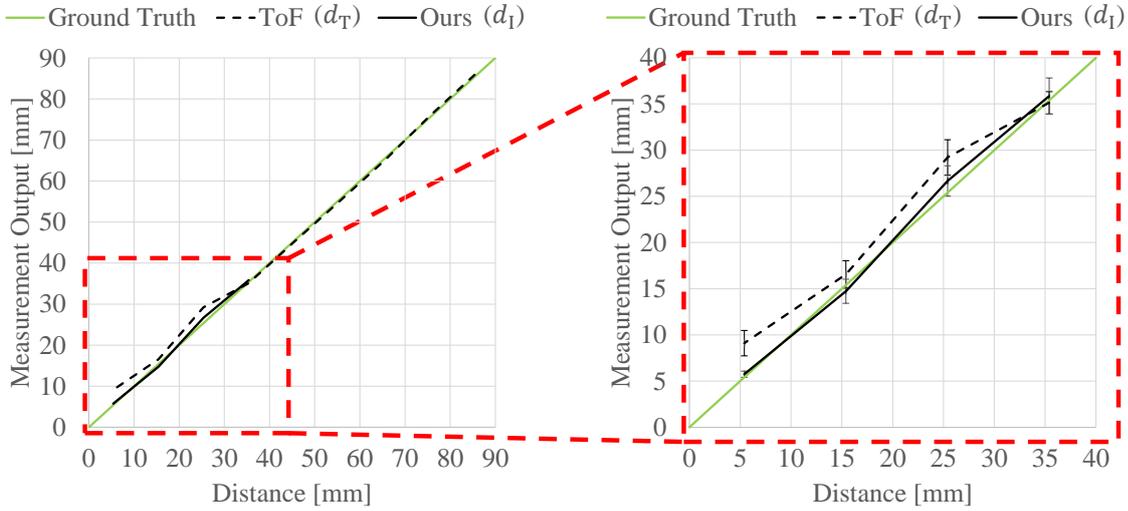


Fig. 5.45: センサモジュールの距離出力 [155] . 黒の実線が強度センサから生成された距離出力 (d_I) を示す . 黒の破線が ToF センサ出力 (d_T) を示す . これらの線は , 各距離における 120 回の計測 (10×12 色) の平均値を線形補間して描いたものである . 緑の線が正解値 (センサにとっての理想値) を示す . 右のグラフは左のグラフの拡大図である . 右のグラフのエラーバーは 120 回の計測の標準偏差を示す . d_I の線は正解値の線に近いのに対し , d_T の線は距離 ≤ 25.4 mm では上向きにずれている . 5.4 mm の時 , d_I のエラーバーは非常に小さい .

Table 5.6: センサモジュールの距離出力の表 [155] . MEAN , STD , E_{\max} はそれぞれ , 平均値 , 標準偏差 , 120 回の計測における最大絶対誤差を表す . N/A は , 最低一色においてセンサモデルが完全には獲得できていないことを意味する .

| Distance [mm] | d_T | | | d_I | | |
|---------------|-------|-----|------------|-------|-----|------------|
| | MEAN | STD | E_{\max} | MEAN | STD | E_{\max} |
| 85.4 | 85.9 | 1.3 | 4.6 | N/A | N/A | N/A |
| 75.4 | 75.8 | 1.3 | 3.6 | N/A | N/A | N/A |
| 65.4 | 64.9 | 1.3 | 2.6 | N/A | N/A | N/A |
| 55.4 | 55.0 | 1.4 | 3.4 | N/A | N/A | N/A |
| 45.4 | 45.2 | 1.1 | 3.4 | N/A | N/A | N/A |
| 35.4 | 35.1 | 1.2 | 3.4 | 35.9 | 2.0 | 6.8 |
| 25.4 | 29.2 | 1.9 | 7.6 | 26.7 | 1.6 | 5.0 |
| 15.4 | 16.6 | 1.5 | 4.6 | 14.7 | 1.3 | 2.7 |
| 5.4 | 9.1 | 1.4 | 8.6 | 5.7 | 0.3 | 1.2 |

Fig.5.45 と Table 5.6 に距離計測結果を示す . 段階 3 に当たる距離 (35.4, 25.4, 15.4, 5.4 mm) において , 距離出力 d_I が強度センサから想定通りに生成された . それらの距離のうち , 35.4 mm を除いた全ての距離において , d_I は ToF センサ出力 d_T よりも小さな標準偏差と平均値の正解値からの誤差を示した . この実験中に得られたオフセット後の強度センサ出力 ($I-b$) を

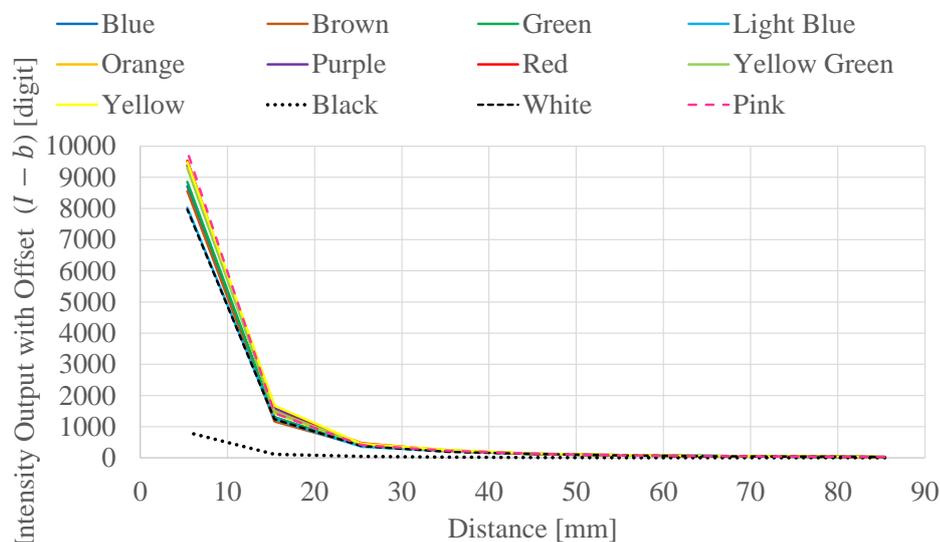


Fig. 5.46: Fig.5.44 の色紙に対するオフセット後の強度センサ出力 ($I - b$) [155]．ピンクの紙に対する出力（ピンクの破線）は黒の紙に対する出力（黒の点線）の約 10 倍大きい．よって、接触検知のために同じ閾値を使うなどのような、これらの値を同様に扱おうとする手続きは難しい．

Fig.5.46 に示す．黒の紙以外の紙は似た特性を示したので、強度センサで用いられている赤外線反射率は似通っていることがわかる．それに対し、黒の紙は他とは大きく異なる反射率を示した．例えば、ピンクの紙に対する強度値は黒の紙に対する強度値の約 10 倍となっており、二つの紙の対象物体依存パラメータ (a) も同じ比になっていると考えられる．このように、強度値の違いが非常に大きいため、接触検知のために同じ閾値を使うなどのような、これらの値を同様に扱おうとする手続きは難しい．対照的に、構成したモジュールはピンクの紙と黒の紙のどちらに対してもほぼ同じ d_1 を生成できたため、構成したモジュールは反射率にほぼ依存せず、 d_1 は強度センサ値より優れていることが示された．

脆弱物体の持ち上げ

精密把握により、12 種類の極薄物体でできた色付きの箱 (Fig.5.47) を持ち上げる実験を行った．箱の壁は 0.07 mm と薄く、過剰な力が働くと大きく歪むことから、把握後の箱の歪みを観測することで力が適切かを確認できる．各箱に対して 5 回ずつ持ち上げ試行を行った．Fig.5.48 に、実験中のロボット動作を示す．Fig.5.48 c における箱の状態から、箱を握

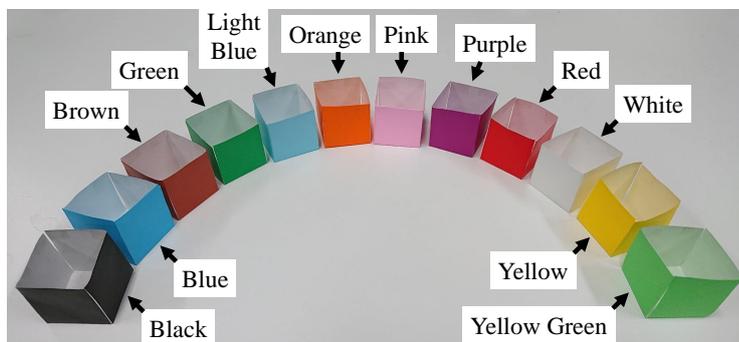


Fig. 5.47: 実験で脆弱物体として用いた紙箱 [155] . 箱は折り紙から作られ、壁の厚さ 0.07 mm , 大きさ 35 mm × 35 mm × 35 mm である .

り潰さず優しく把握できたかが確認できる . 把握後に Fig.5.48 d の持ち上げ動作を行うことで、箱を持ち上げられる程度の最低限の力がかかっているかを確認できる . また、比較のため、強度センサのみを用いた把握・持ち上げを黒色の箱とピンク色の箱に対して、圧力センサを用いた把握を赤色の箱に対して行った . 前者の実験では、各強度センサ固有の閾値（左指先は 336 , 右指先は 840）を全てのセンサがそれぞれ下回った時に指を停止させた . 後者の実験では、Willow Garage 社の PR2 の指先圧力センサを用い、PR2 標準のグリッパセンサコントローラを先行研究 [160] と同じ閾値（High-passed pressure readings: 0.05 N, Unfiltered pressure: 0.4 N）で用いた .

Table 5.7 と Table 5.8 に実験結果を示す . Table 5.7 に示されたように、精密把握により生じる箱の歪みは他手法に比べて小さく、過剰な力をかけにくいことが実証された . また、Table 5.8 を見ると、強度センサのみを用いた場合は色によって結果が変わった一方、精密把握は異なる色の物体を同様に、優しくかつしっかりと把握できていることがわかる .

極薄物体の把握の検証

Fig.5.49 に、実験中のロボット動作を示す . 紙は机中央の治具にセットされて垂直となっており、これに対してロボットハンドを下ろし、把握する . この把握動作の間に獲得された対象物体依存パラメータ a を記録する . この動作を、12 種類の紙（Fig.5.44）それぞれに対して 5 回ずつ行った . また、治具に紙をセットしない状態に対しても 5 回行い、紙を把握した場合と何も把握しなかった場合とを識別できるか確認する .

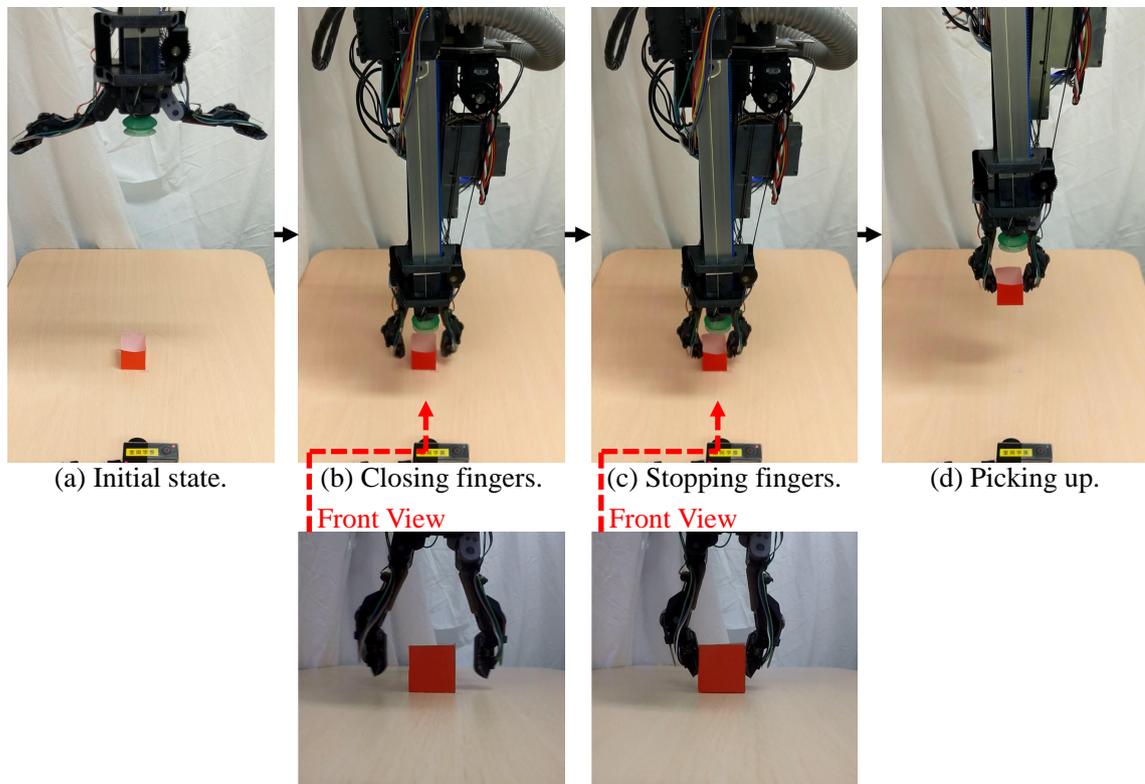


Fig. 5.48: 脆弱物体を持ち上げる動作 [155]. (a) オフセットパラメータ b を獲得し, (b) 指を閉じ始め, (c) 精密把握システムにより指が止まり, (d) 物体がしっかり握られているか確認するため持ち上げる.

Fig.5.50 に, 実験中に獲得された対象物体依存パラメータ a をプロットしたものを示す. 紙を把握した場合のパラメータのほとんどと, 何も把握しなかった場合のパラメータには差があり, 識別が可能であることが確かめられた. 前者の場合は把握検証の範囲 ($10000 \text{ digit} \cdot \text{mm}^2 \leq a \leq 2000000 \text{ digit} \cdot \text{mm}^2$) に収まり, 後者では外れていたため, 検証が正しく行えることが確かめられた. 右指先と左指先でパラメータが大きく異なるのは, パラメータが対象物体に依存するだけでなく, 強度センサが埋まっている透明ゴム内での光損失にも影響されるからである. ゴム内気泡密度やゴム表面粗さなどは不均一なため, センサ正面のゴム状態はセンサごとに異なり, 光損失も異なってくる. しかし, 本実験の結果から, 物体存在認識で用いるパラメータ範囲なら共有しても問題ないことがわかったため, 一つの範囲のみを用いる. 紙を把握していたにも関わらず, どちらかの指先のパラメータがこの範囲から外れてしまったのは, 黒い紙に対する一試行のみである. 一試行のみの失敗ではあるが, 赤外線反射率の

Table 5.7: 把握動作により生じた物体変形 [155]. 各手法の全試行の中から, 物体の変形が最も小さかった場合と最も大きかった場合の写真を選び出した. 精密把握による変形は, 他手法による変形と比べて小さかった.

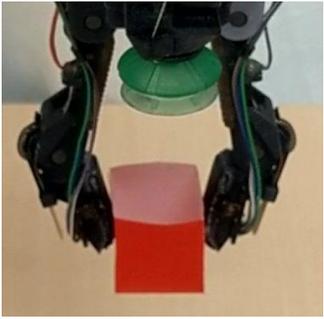
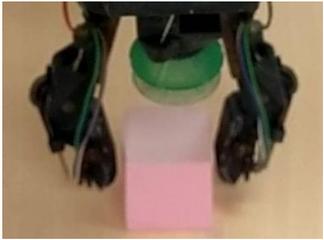
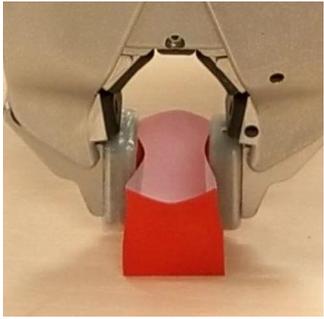
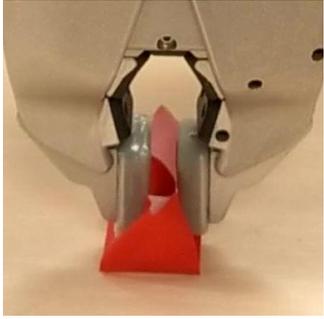
| | Our Method (with d_I) | Intensity Only (with I) | Pressure Sensor |
|----------------|--|---|---|
| Least Deformed |  |  Fingers did not touch box → Picking up failed |  |
| Most Deformed |  |  |  |

Table 5.8: 脆弱物体の持ち上げにおける致命的な失敗の割合 [155]. 「Crushing the box」は箱の壁の一つが反対側の壁に接触してしまった場合である. 「Dropping the box」は 110 mm 持ち上げられる前に箱が落ちてしまった場合である. 全ての圧力センサによる試行において大きな変形が確認され, 持ち上げを試さなかったために N/A が存在する. 精密把握では致命的な失敗は一つもなかった. 強度センサのみを用いた持ち上げでは常に黒の箱を握り潰し, ピンクの箱をほとんど落とした. 圧力センサを用いた場合, しばしば箱を握り潰した.

| | Our Method | Intensity Only | Pressure Sensor |
|------------------|------------|----------------|-----------------|
| Crushing the box | 0/60 | 5/10 | 2/5 |
| Dropping the box | 0/60 | 4/10 | N/A |

低い黒色物体の扱いが難しいことが表れていると言える. また, 何も把握しなかった場合, パラメータは常時 0 となった. しかし, 0 はパラメータの初期値であるため, パラメータの獲得に失敗していることが示されている. これは, 対向する指先を検出した時の強度センサ出力 I が, 物体を検出した時に比べて違いすぎ, センサモデル獲得が動作する条件を満たさなかったからだと考えられる. センサモデル獲得に失敗するほどの赤外線反射特性の違いを

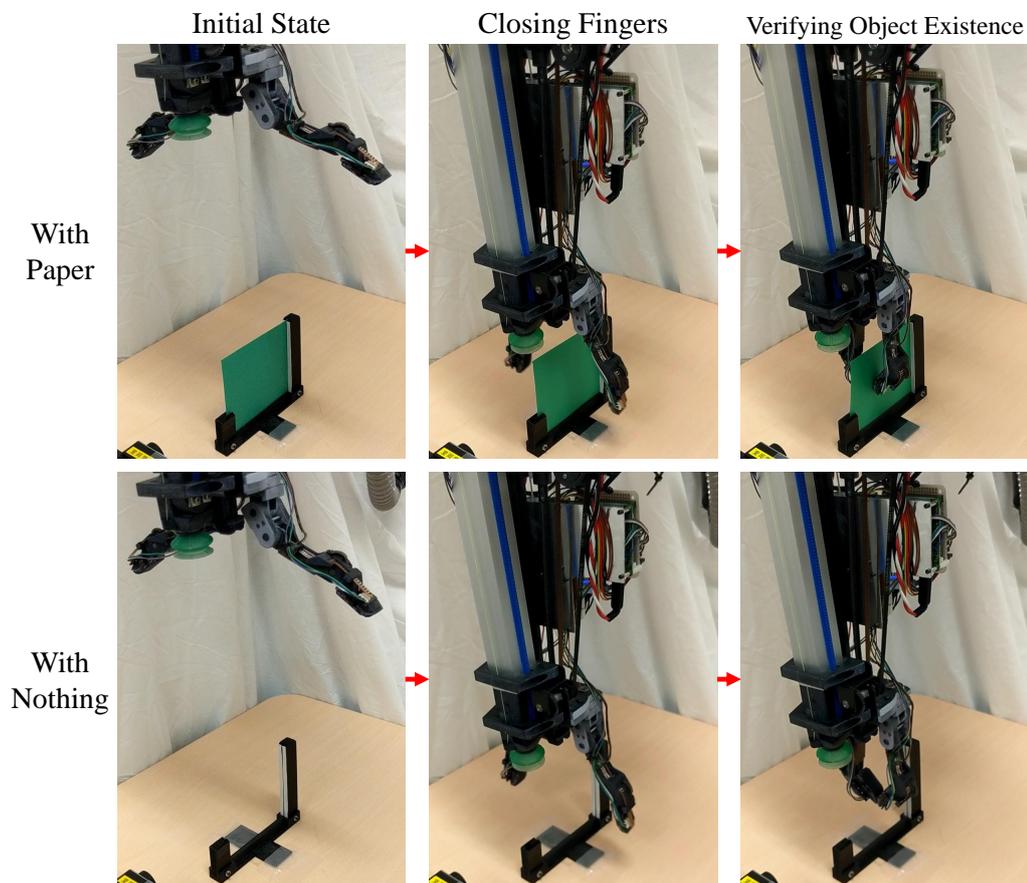


Fig. 5.49: 極薄物体把握動作 [155]．開発した検証システムが上の場合（「With Paper」）と下の場合（「With Nothing」）の識別を試みた．上の場合においては，色紙（Fig.5.44 の一枚）がテーブル上の治具のスリットに挿入されている．初期状態ではオフセットパラメータ（ b ）が獲得される．指が閉じる間に対象物体依存パラメータ（ a ）が獲得される．これらのパラメータが指の間の紙の存在を検証するのに用いられる．

検出できたと言え，指先と紙の識別においては問題ないが，指先と似た特性を持つ物体（透明な層で不透明な物を覆った物体）に対してセンサモデル獲得が失敗し，距離が出力できないことが予想される．

人からの干渉を考慮した紙ファイリング支援実験

精密把握と把握検証を用いて，人からの干渉に対応しながら紙のファイリングを代行する実験を行った．Fig.5.51 に実験の様子を示す．この実験では，0.10 mm 厚のルーズリーフを用いた．文書を書いている人が書き終わった紙をロボット前に置き，ロボットはその紙を滑

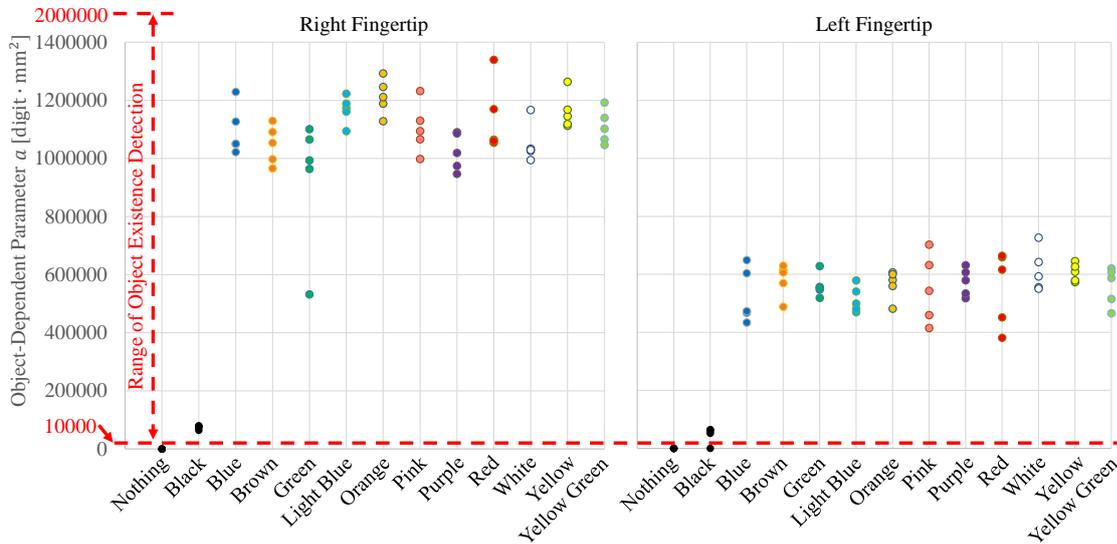


Fig. 5.50: 極薄物体の把握におけるセンサモジュールからの対象物体依存パラメータ a 出力 [155]. 各点が一回の把握試行で獲得された a を示す. 一回の把握試行で, 左指先と右指先の両方においてパラメータが獲得されるため, グラフには 130 点ある. 紙が指の間にある場合, パラメータはほとんど把握検証の範囲に収まったため, 紙が指の間にあることを検出できた. 唯一の例外は黒の紙に対する試行のうちの一回であった. 一方で, 指の間に何もなかった場合, パラメータは 0 になって範囲外となった.

らせ, 机からはみ出した部分を三本指で把持し, レバーファイルまで運搬する. ここで使用したハンドは空気吸引可能であるが, 紙に対して空気吸引を行うと皺が入ってしまうため, 空気吸引は行わなかった. 把持検証は Fig.5.51 c, g において用いた. 何も把握できていないことを検出する (Fig.5.51 g) ことで, 人が書き直しのために紙を取り返してしまった場合 (Fig.5.51 f) に対応し, 視覚認識待ちの状態 (Fig.5.51 a) へと戻ることができた. 精密把握は Fig.5.51 c, g, j において用いた. 使用したハンドでは, 親指が真空パッドとなっていて柔軟性が高いため, 精密把握をせず高把握力で紙を把握すると, 真空パッドが大変形して紙もそれに追従し, 皺が入ってしまうが, それを防ぐことができた. Fig.5.51 i では, 精密距離出力 d_f を別の用途に用いた. 運搬中の紙を人が書き直しのために取り返した場合, その紙に対して最適化されていた距離出力は大きく変動した. この変動を検出することで, 書き直した紙を人が指に挿入してくれるまで待機する状態に移行できた. 挿入された際も, 距離出力が以前の状態に戻ったことを検出することで挿入を感知することができ, 再び把持を行って運搬に戻ることができた.

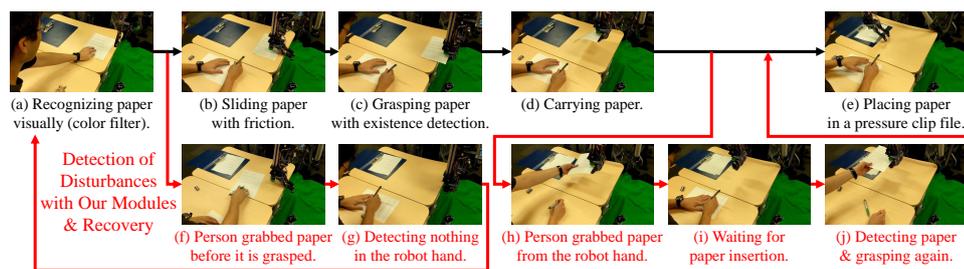


Fig. 5.51: 人からの干渉を考慮した紙ファイリング支援実験の様子 [155] . 0.10 mm 厚のルーブリーフを用いた .

第6章

吸引着把握併用マニピュレーション実験

本章では、本研究で提案した動作構造同時設計論に基づき構築したハンドを本研究で提案した融合感覚把持制御で動作させることにより、倉庫物品棚という狭隘空間でのピッキング・ストーイング実験において、壁に物体を押し付けることによる吸引成立動作が実行可能であるだけでなく、それが不可能な場合の代替動作の実行や、吸引成立後の把握の併用が可能であることを示す。また、可変形状物体の把持操作実験において、物体の変形を矯正可能で収納まで実現しやすい把持までの遷移が可能であることを、薄く脆弱な物体の把持操作実験において、物体を傷つけにくい把持が実行可能であることを、それぞれ示す。

6.1 狭隘空間におけるピッキング実験

物体が詰まった棚からロボットが物体をピッキングする実験を行い、構成したハンドと動作戦略が狭隘空間から物体をピッキングできるか評価した。実験環境を Table 6.1 の一番左の列に示す。目標物体と物体配置の両方が異なる 8 つの環境に対して実験を行った。次に、実験手順を説明する。まず、ハンドに取り付けられたカメラから取得した RGB-D 画像を使ってピン内の状況を認識した。認識結果を動作戦略に入力し、ピンから目標物体を取り出した。最後に、棚の前に指定した目標位置に物体を配置した。Fig.6.1 に Layout 5 における実験の様子を示す。

Table 6.1 に全実験結果を示す。全ての目標物体が、推定された物体位置と寸法に基づいて正しくピッキングできた。

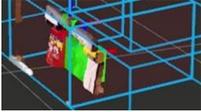
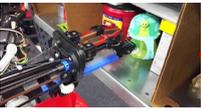
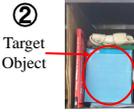
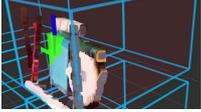
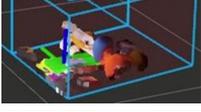
ハンドは、他物体に囲まれた物体のピッキングに成功した。Layout 1, 2, 5 では、目標物体の両側面が他物体に接触している。Layout 6, 7, 8 では、目標物体が棚の横壁に接触している。

吸引指の伸展性と屈曲性が狭隘空間では重要であることが確かめられた。Layout 3 と 4 では、吸引指が伸展し屈曲することで、他物体の下敷きになっている薄い目標物体のピッキングに成功している。

吸引把握併用による物体把握が有効であることが確かめられた。Layout 3 と 4 では、把握機構により、目標物体の上に載った他物体の重みで目標物体を落としてしまうことが防がれている。Layout 7 では、目標物体が重い上に吸引点が物体の重心から離れた位置になってしまったが、吸引把握併用によりピッキングに成功している。

棚からのピッキングは失敗する可能性があるため、エラー回復が重要になる。構成した動作戦略では、動作の失敗が検知された場合、物体認識と把握動作を再試行する。Layout 8 で

Table 6.1: 棚のピンに対するピッキング実験の結果 [98].

| Layout | Recognition Result | Motion | Suctioning | Pinching or Releasing |
|--|---|--------|---|--|
|  ① Target Object |  | (A) |  |  |
|  ② Target Object |  | (A) |  |  |
|  ③ Target Object |  | (B) |  |  |
|  ④ Target Object |  | (B) |  |  |
|  ⑤ Target Object |  | (B) |  |  |
|  ⑥ Target Object |  | (B) |  |  |
|  ⑦ Target Object |  | (B) |  |  |
|  ⑧ Target Object |  | (C) |  |  |
|  ⑧ Target Object |  | (B) |  |  |

「Layout」列は対象環境を示す。Layout 1 から 8 の目標物体はそれぞれ、カップ (ID: 6)、ティッシュ箱 (ID: 24)、絵本 (ID: 23)、針金パック (ID: 31)、ボール (ID: 2)、のり (ID: 20)、靴下パック (ID: 30)、クレヨンの箱 (ID: 9) である。「Recognition Result」列は物体認識結果を示す。各画像において、緑の箱がバウンディングボックスであり、赤緑青の軸が重心の座標系の xyz 軸である。「Motion」列は Fig.4.5 に示した動作の中から動作戦略によって選択された動作を示す。「Suctioning」列は目標物体を吸引した時の様子を示す。「Pinching or Releasing」列は目標物体を把握、もしくは手放した時の様子を示す。Layout 8 では、二回の試行で目標物体をピッキングした。

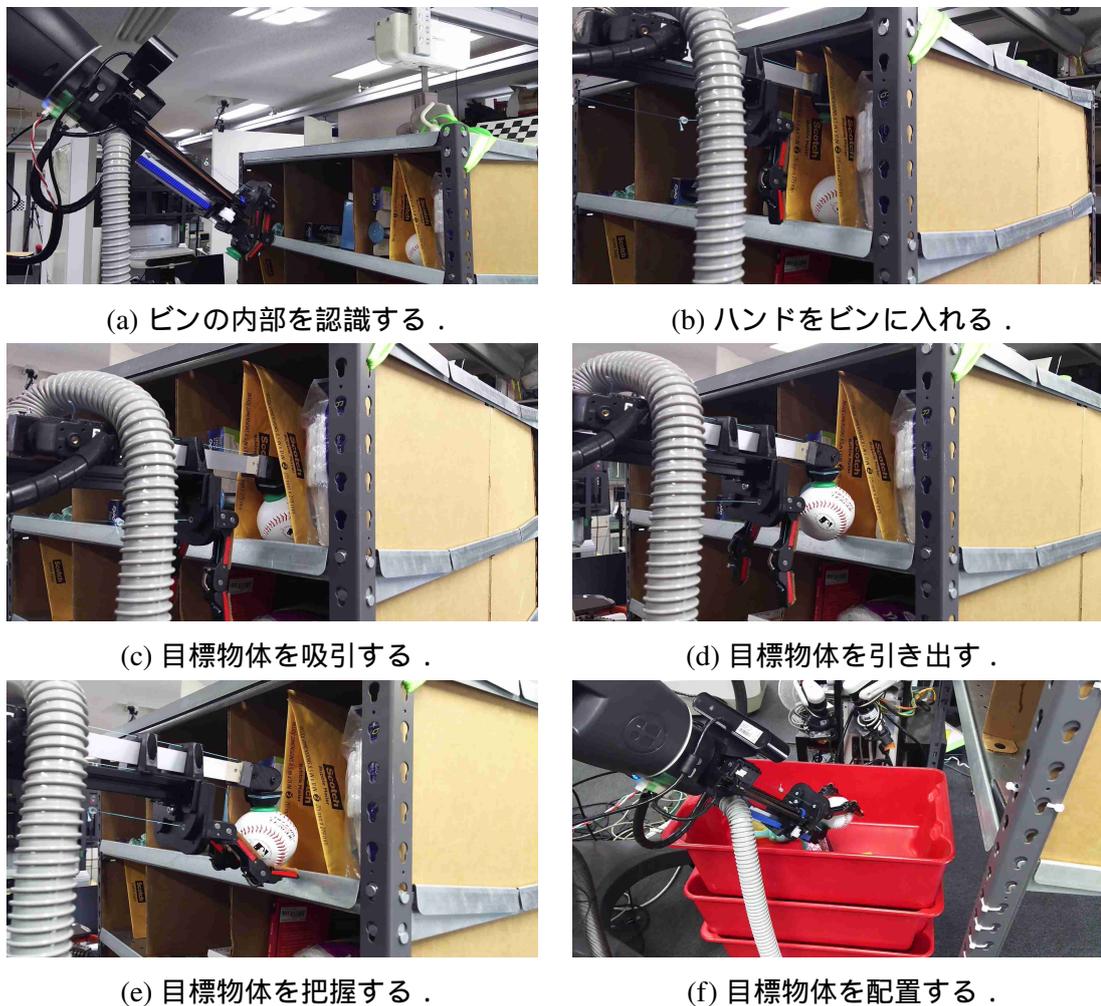


Fig. 6.1: Layout 5 における実験の様子 [98] .

は、最初の試行において、ピンの入口近くまで目標物体を引き出す。目標物体を手放した際に、目標物体が倒れて姿勢が変わってしまったが、次の試行においてピッキングに成功した。

6.2 狭隘空間におけるピッキング・ストーイング実験

6.2.1 ピッキング実験

構成したハンドと UST 戦略がピッキング段階において機能することを検証した。実験環境を Table 6.2 と Table 6.3 の一番左の列に示す。Table 6.2 の 8 環境は、前述の狭隘空間にお

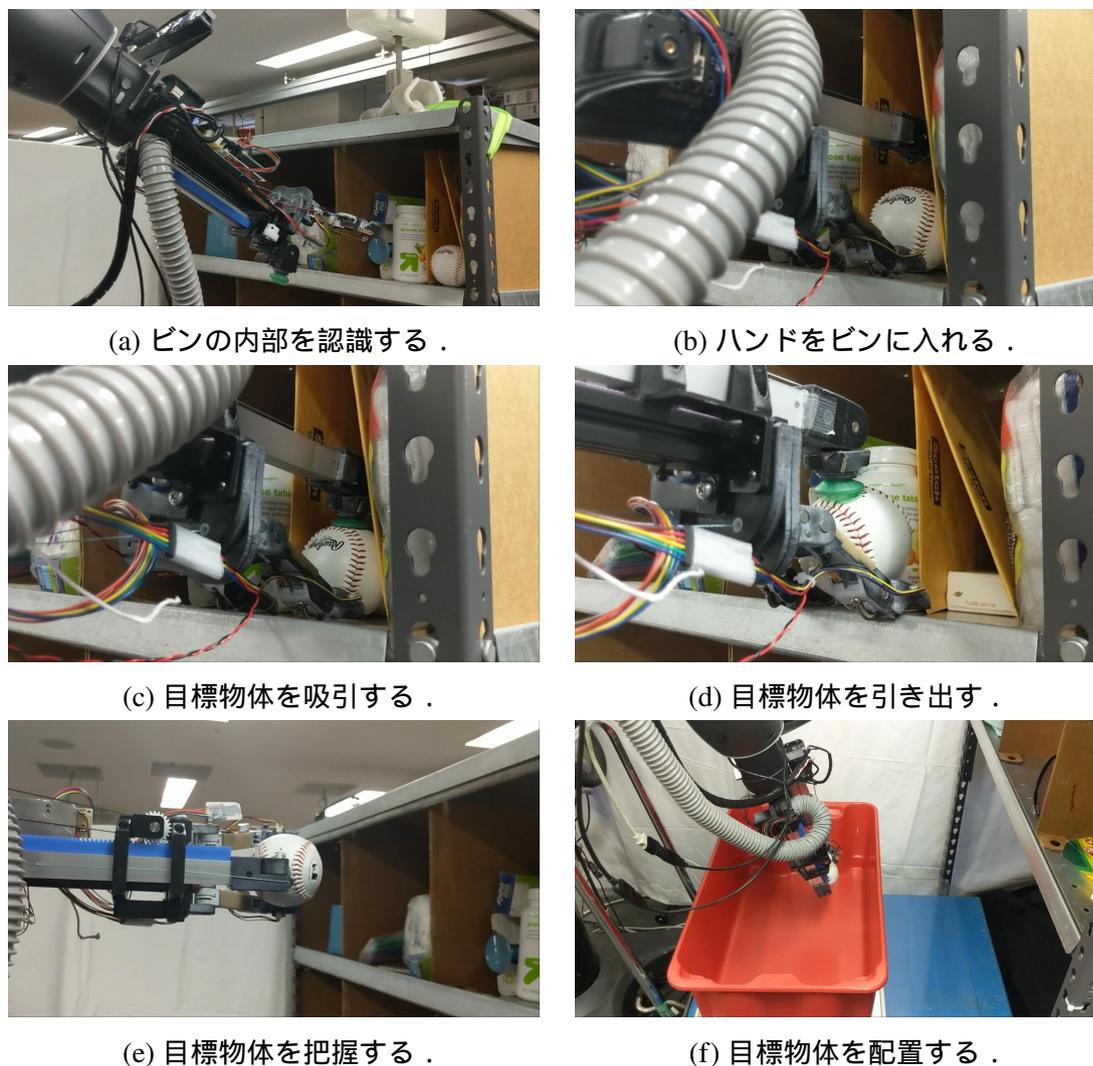
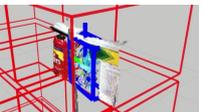
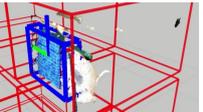
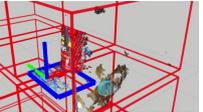
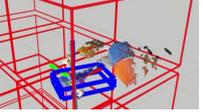
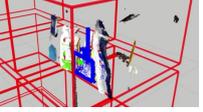
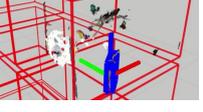


Fig. 6.2: Layout 5 における実験の様子 [70] .

けるピッキング実験で用いた環境に似せてある．一方で，Table 6.3 の二環境は，目標物体が吸引で移動させられない物体であるため，前述の実験における手法の適用が難しい環境である．次に，実験手順を説明する．まず，ハンドに取り付けられたカメラから取得した RGB-D 画像を使ってビン内の状況を認識した．認識結果を UST 戦略に入力し，ビンから目標物体を取り出した．最後に，棚の前に設置したトートに物体を入れた．Fig.6.2 に Layout 5 における実験の様子を示す．Table 6.2 と Table 6.3 にピッキング実験の全結果を示す．10 個中 9 個の目標物体がピッキングできた．

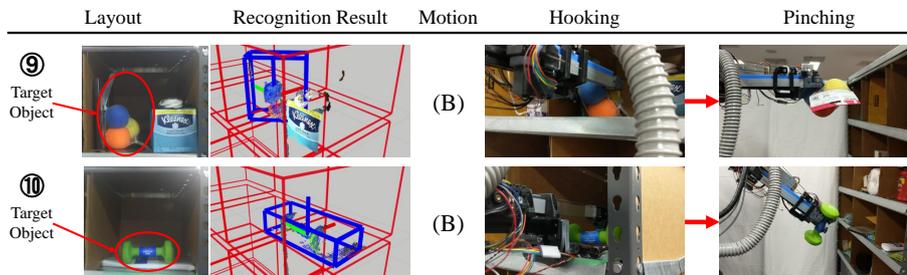
Table 6.2: ピッキング段階の実験の結果 [70].

| Layout | Recognition Result | Motion | Suctioning | Pinching |
|--|---|-----------------|--|---|
|  ① Target Object |  | (D) ↓ (E) |  |  |
|  ② Target Object |  | (C) ↓ (E) |  |  |
|  ③ Target Object |  | (D) ↓ (F) |  |  |
|  ④ Target Object |  | (D) ↓ (F) |  |  |
|  ⑤ Target Object |  | (D) ↓ (F) |  |  |
|  ⑥ Target Object |  | (D) ↓ (F) |  |  |
|  ⑦ Target Object |  | (D) ↓ (F) |  |  |
|  ⑧ Target Object |  | (D) ↓ (F) |  |  |

「Layout」列は対象環境を示す。Layout 1 から 8 の目標物体はそれぞれ、カップ (ID: 6)、ティッシュ箱 (ID: 24)、絵本 (ID: 23)、針金パック (ID: 31)、ボール (ID: 2)、のり (ID: 20)、靴下パック (ID: 30)、クレヨンの箱 (ID: 9) である。「Recognition Result」列は物体認識結果を示す。各画像において、小さい箱がバウンディングボックスであり、三本の直交軸が重心の座標系の xyz 軸である。「Motion」列は Fig.4.22 に示した動作の中から UST 戦略によって選択された動作を示す。「Suctioning」列は吸引試行時のハンドの様子を示す。「Pinching」列は把握試行時のハンドの様子を示す。Layout 1 では、吸引が失敗し、把握は行われなかった。

吸引把握併用による物体把握が有効であることが確かめられた。Layout 2, 3, 4 では、目標物体の上に他物体が載っているにも関わらず、把握機構によって目標物体を落とさず把握できている。Layout 7 では、目標物体が重い上に吸引点が物体の重心から離れた位置になり、重力によるモーメントが吸引を剥がす危険があったが、吸引把握併用によりピッキングに成

Table 6.3: ピッキング段階の実験の結果 [70] .



「Layout」列は対象環境を示す．Layout 9 と 10 の目標物体はそれぞれ，ボールパック（ID: 12）とダンベル（ID: 35）である．「Recognition Result」列は物体認識結果を示す．各画像において，小さい箱がバウンディングボックスであり，三本の直交軸が重心の座標系の xyz 軸である．「Motion」列は Fig.4.22 に示した動作の中から UST 戦略によって選択された動作を示す．「Hooking」列は押し操作による物体揺き出し時のハンドの様子を示す．「Pinching」列は把握試行時のハンドの様子を示す．

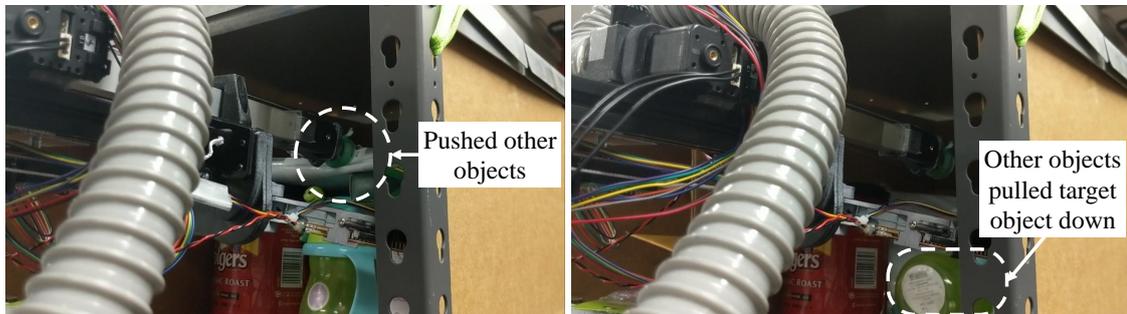
功している．これらの環境は，吸引把握併用が行えない先行研究の手法 [15, 14] では難しい．吸引把握併用を行える手法 [139] もあるが，吸引のみ狭隘空間で行ってから把握に切り替えることができないため，やはり困難である．

前述の狭隘空間におけるピッキング実験で用いた手法では取扱困難だった二つの目標物体を，押し操作による揺き出しを用いてピッキングできた．Layout 9 と 10 においては，過度な空気漏れが発生するボールパック（ID: 12）と吸引指の吸引力を上回る重さを持つダンベル（ID: 35）をピッキングできた．

ハンドは，他物体に囲まれた物体のピッキングに成功した．Layout 2, 5 では，目標物体の両側面が他物体に接触している．Layout 6, 7, 8, 9 では，目標物体が棚の横壁に接触しているか，非常に近い．

吸引指の伸展性と屈曲性が狭隘空間では重要であることが確かめられた．Layout 3 と 4 では，吸引指が伸展し屈曲することで，他物体の下敷きになっている薄い目標物体のピッキングに成功している．

Fig.6.3 に Layout 1 で吸引に失敗した原因を示す．Layout 1 の認識結果から，目標物体のバウンディングボックス上面の奥行きは真空パッドの直径より長く，ピンの壁と上面の間の距離は吸引指が入れる距離であると判定された．これにより，UST 戦略実行器は Fig.4.22 における動作 (D) を選択した．動作 (D) の実行中に，吸引指は目標物体の上にあった他物体を Fig.6.3a のように押しのけた．すると，Fig.6.3b のように，押しのけられた物体と目標物体が擦れて一緒に倒れてしまった．結果，目標物体が元々の位置から動いてしまったため，吸



(a) 目標物体以外の物体を吸引指が押しつけ (b) 押しつけられた物体と目標物体が擦れて一緒に倒れる様子。

Fig. 6.3: Layout 1 における吸引失敗の原因 [70] .

引に失敗した。仮に動作 (C) が選択されていれば、前述の狭隘空間におけるピッキング実験と同様に、目標物体を正しく吸引できていたと推測される。

以上の分析から、物体間の物理的干渉が失敗を引き起こしたことが示された。狭隘空間にある物体は頻繁に他物体と接触するため、このような失敗は時折起こると考えられる。このような失敗に対する最も信頼性の高い解決策は、全ての他物体を避けながらピッキング動作を行うことであるが、この解決策は実行可能なピッキング動作を著しく減少させる。例えば、Layout 5, 6, 8, 9 におけるピッキング動作では、目標物体以外の物体に接触したり、それを押しつけたりしている。よって、狭隘空間においては、障害物を押しつけてどかすのは目標物体に影響しない時のみに限定するべきである。このような限定された押し操作を実装するためには、目標物体以外の物体について押せるか押せないかを認識し、押せると認識された物体のみを押すようなシステムを構築するべきである。

6.2.2 ストーイング実験

構成したハンドと UST 戦略及び EP 戦略がストーイング段階において機能することを検証した。Fig.6.4 に示す二種類の環境を用意した。Layout 1 は吸引機構か把握機構しか持たないエンドエフェクタ [4, 13, 180, 102, 103] では困難な環境であり、この環境にある全ての物体をピッキングすることで、それらのエンドエフェクタよりも優れた性能を示すことができる。Layout 1 には、過度の空気漏れが起きて吸引できない鉛筆立て (ID: 27) が含まれている。加えて、その他の物体は壁際に置かれている。これらの物体を把握機構でピッキングしようとしても、壁との干渉が発生するためピッキング困難である。一方、Layout 2 は、UST



(a) Layout 1 .

(b) Layout 2 .

Fig. 6.4: ストーイング段階の実験の環境 [70] .

戦略における吸引から把握への切り替えを試験するための環境である．Layout 2 には，正面吸引後の対向把握が実行可能な物体の最低高さに近い高さを持つ物体が二つ含まれている．ここで，真空パッド中心から把握機構中心までの高さが 62 mm なので，最低高さは 124 mm である．これは，ティッシュ箱 (ID: 24) の高さ 130 mm やのり (ID: 20) の高さ 145 mm に近く，これらの物体に対する実験を行うことで，把握への切り替えを正しく判断できるかが検証できる．Layout 2 のもう一つの物体は，重心が壁際にならないよう置いた針金パック (ID: 31) であり，この物体のピックアップにおいて吸引から把握への切り替えが正しく行われるか検証する．Layout 1 にも同じ物体が含まれているが，壁際に置かれており，吸引時のハンド姿勢が限定される．その状況では，物体に対する指の位置が把握に適さなくなる．よって，Layout 1 では把握への切り替えが行われないことが期待される．さらに，Layout 1 と 2 で共通な物体により EP 戦略を検証する．針金パックは長すぎて，Fig.4.26 における動作 (Ia) や (IIa)，(IIIa) のような通常のストーイング動作では棚のビンの壁に干渉してしまう．したがって，その物体により，(b) の動作の有効性を検証できる．

次に，実験手順を説明する．まず，ハンドに取り付けられたカメラから取得した RGB-D 画像を使ってトート内の状況を認識した．認識結果を UST 戦略に入力し，トートから物体を一つ取り出した．最後に，取り出した物体を，EP 戦略を用いて棚のビンに収納した．この手順を各環境の全ての物体が取り出されるまで繰り返した．Fig.6.5 に，Layout 2 から針金パック (ID: 31) を取り出して収納する様子を示す．Table 6.4 にストーイング実験の全結果を示す．全ての目標物体が収納できた．

近接覚センサを用いた直接的な円筒把握がトート内で機能することが確かめられた．Layout

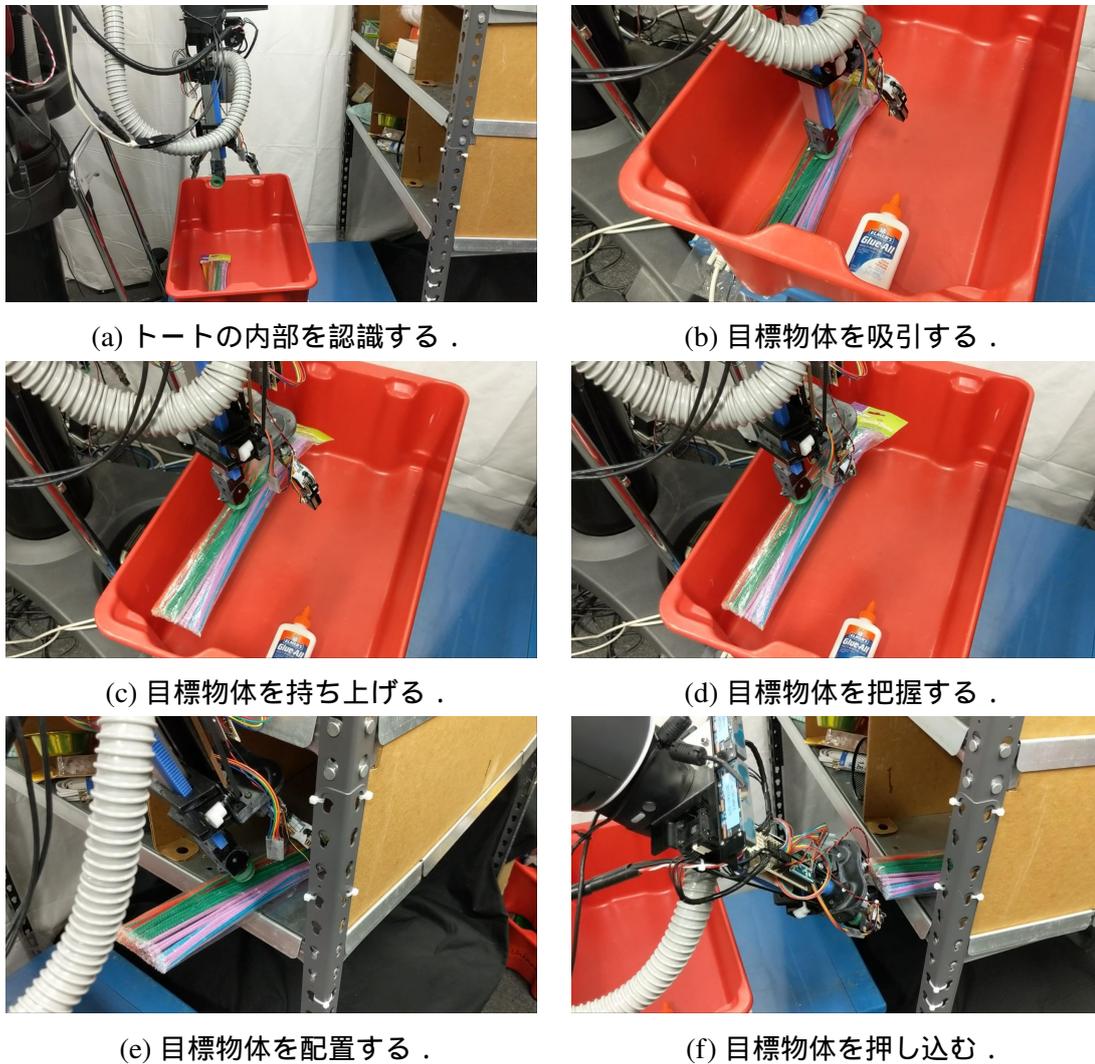


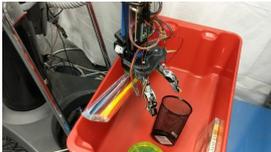
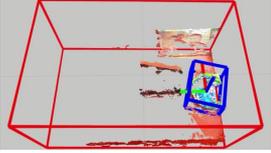
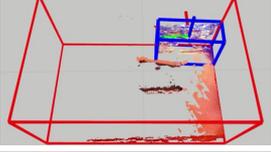
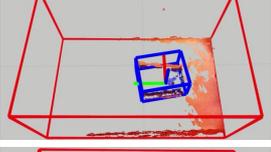
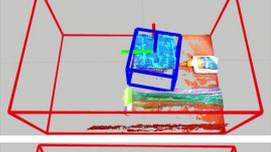
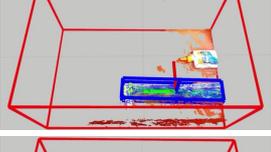
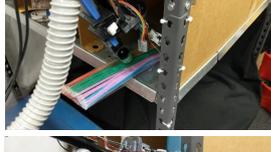
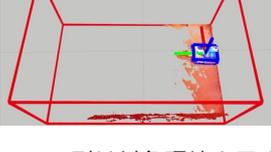
Fig. 6.5: Layout 2 から針金パックを取り出して収納する様子 [70] .

1 に対する四回目のピッキング試行において、過度な空気漏れと近接覚センサによる検知のしにくさが問題の鉛筆立て (ID: 27) をピッキングすることに成功した .

EP 戦略により長い物体を収納できることが確かめられた . Layout 1 に対する一回目のストーイング試行と Layout 2 に対する二回目のストーイング試行において、長い針金パックを収納するのに、動作 (Ib) と (IIb) がそれぞれ用いられた .

UST 戦略により吸引から把握への切り替えが行えることが確かめられた . Layout 1 に対する三回目のピッキング試行と Layout 2 に対する一回目のピッキング試行において、円筒把

Table 6.4: ストージング段階の実験の結果 [70].

| Layout | Recognition Result | Picking Motion | Picking | Stowing Motion | Stowing |
|--------|---|-----------------|---|----------------|---|
| ① |  | (C) ↓ (G) |  | (Ib) |  |
| |  | (C) ↓ (G) |  | (Ia) |  |
| |  | (D) ↓ (F) |  | (IIIa) |  |
| |  | (A) |  | (IIIa) |  |
| ② |  | (C) ↓ (E) |  | (IIa) |  |
| |  | (C) ↓ (E) |  | (IIb) |  |
| |  | (C) ↓ (G) |  | (Ia) |  |

「Layout」列は対象環境を示す。「Recognition Result」列は物体認識結果を示す。各画像において、小さい箱がバウンディングボックスであり、三本の直交軸が重心の座標系の xyz 軸である。「Picking Motion」列は Fig.4.22 に示した動作の中から UST 戦略によって選択された動作を示す。「Picking」列はトートからのピッキング時の手の様子を示す。「Stowing Motion」列は Fig.4.26 に示した動作の中から EP 戦略によって選択された動作を示す。「Stowing」列は棚のピンへの収納時の手の様子を示す。

握への切り替えと対向把握への切り替えがそれぞれ行われた。特に後者では、ティッシュ箱 (ID: 24) の角を把握できたことから、把握が適応的であることが改めて確かめられた。

一方で、吸引から把握への切り替えにおける失敗を、UST 戦略が回避できることが示された。Layout 1 に対する一回目のピッキング試行や二回目のピッキング試行、Layout 2 に対する三回目のピッキング試行において、UST 戦略実行器は、吸引された物体が対向把握するには低すぎると判断し、切り替えを取りやめた。しかし、この判断の一部は誤りである。実際には、Layout 2 に対する三回目の試行においてピッキングされたのりは、対向把握に必要な最低高さを上回っている。誤った判断の原因は認識失敗である。Table 6.4 の最下行の認識結果を見ると、のりの赤い蓋がのりとして認識されていないことがわかる。これにより、のりの高さが過小評価されたと考えられる。

この結果から、現在の UST 戦略における対向把握への切替判断は物体寸法の過小評価に弱いことがわかった。ピッキング段階の実験において物体寸法の過小評価は頻繁に起こったため、より乱雑な環境でのストーイングにおいては、切替判断はより失敗しやすくなることが予想される。この弱点を補うためには、より正確な結果を出力する物体認識システムを構築する必要がある。考えうる解決策の一つは、能動知覚を導入することである。

6.3 可変形状物体の把持操作実験

6.3.1 視覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験

実験環境

本節の実験では、Fig.6.6 に示すように、ロボット正面に設置した机の上に折り畳まれた物体を重ねて配置する。この物体群の中から目標物体を把持して持ち上げ、物体群前方に設置してあるファイルスタンドに収納する操作をロボットに行わせる。物体群の存在する領域及びファイルスタンドの位置は、事前にロボットシステムに入力する。対象物体として 5 種類の物品 (Fig.6.7) を用いる。以下では、物体の種類を表す上で、Fig.6.7 で各物体に振った Object ID も用いる。

実験結果

全実験結果をまとめたものを Table 6.5 に示す。物体群は、Table 6.5 最左列に示す 5 種類を用意した。物体群 1 から 5 の目標物体はそれぞれ、二つ折り財布 (ID: 1)、フリップカバー

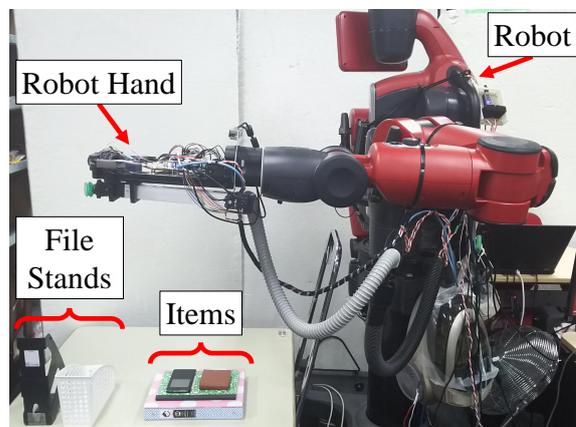


Fig. 6.6: 視覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験の環境 [130] .

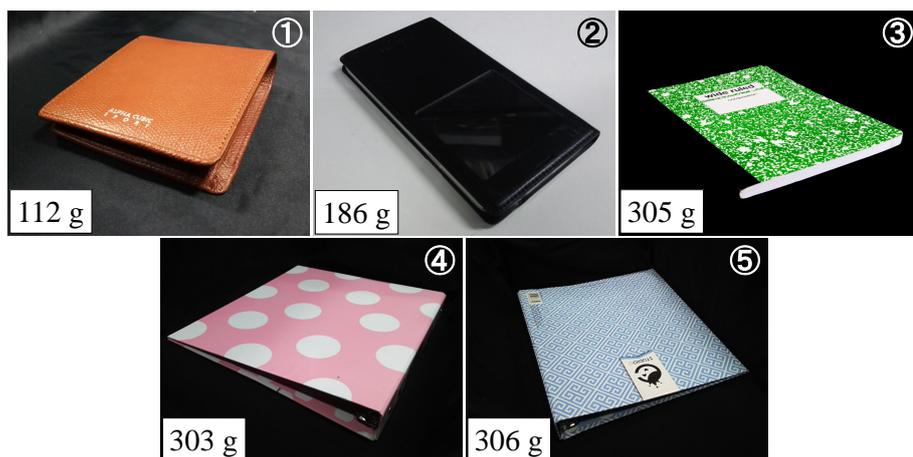


Fig. 6.7: 視覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験の対象物品 [130] . ID 1 から順に、二つ折り財布、フリップカバー付き携帯電話、ノート、ピンクのバインダー、青いバインダー .

付き携帯電話 (ID: 2) , ノート (ID: 3) , ピンクのバインダー (ID: 4) , 青いバインダー (ID: 5) である . 以下では、物体群 1 から 5 のある環境をそれぞれ環境 1 から 5 と呼ぶ . 全環境において、目標物体を把持・収納することができた . この内、環境 4 での操作の様子を Fig.6.8 に示す . 環境 4 での実験において、把持操作戦略の全ての要素が実行されていることがわかる .

環境 3, 4, 5 での実験において、垂れ下がり解決後に狭いファイルスタンドに挿入できていることから、Fig.2.7 の面垂れ下がり解決動作が成功すれば、収納が可能であることが確かめられた .

Table 6.5: 視覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験の結果 [44].

| | Environment | → | Recognition Result | → | Failure Prediction | → | Returning or Folding | → | Placing |
|---|-------------|---|--------------------|---|--------------------|---|----------------------|---|---------|
| ① | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| ② | | | | | | | | | |
| ③ | | | | | | | | | |
| ④ | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| ⑤ | | | | | | | | | |

Environment 列は対象環境を示す．環境 1 から 5 の目標物体はそれぞれ，二つ折り財布，フリップカバー付き携帯電話，ノート，ピンクのバインダー，青いバインダーである．Visual Recognition 列は視覚認識の結果を示す．左の画像は吸引領域の確信度マップである．右の画像それぞれにおいて，赤い箱がバウンディングボックス，赤・緑・青の軸の交点が吸引位置を示す．Dangling Recognition 列は垂れ下がり面認識時のハンド状態を示す．Returning or Lifting 列は物体を元の場所に戻す際や垂れ下がり面を持ち上げる際のハンド状態を示す．Placing 列は物体収納の様子を示す．環境 1 では 3 回の試行で，環境 4 では 2 回の試行で垂れ下がり面を持ち上げられた．

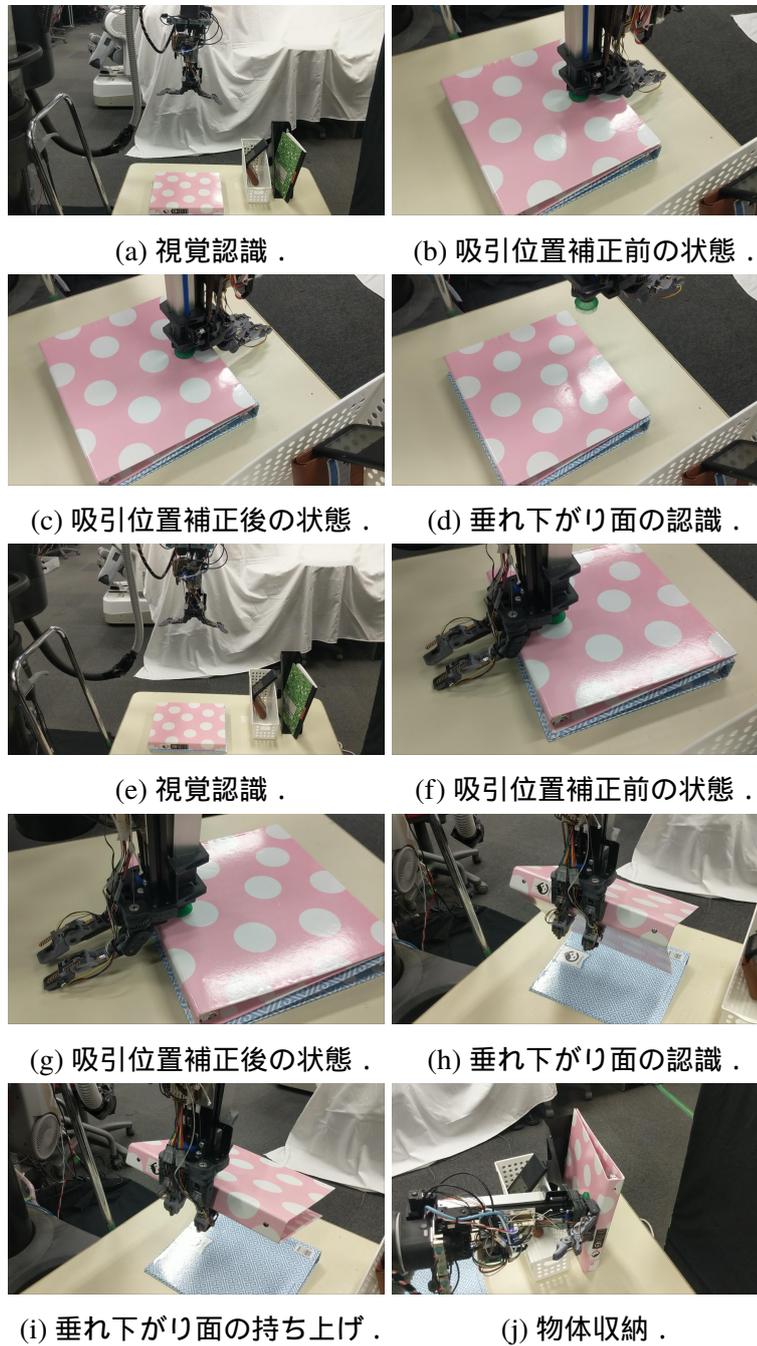


Fig. 6.8: 環境 4 での操作の様子 [44] . (d) では , 物体落下のため , 垂れ下がり面の認識がスキップされている .

曲げセンサで指先関節の屈曲を検知した場合に腱を引くことで、環境4,5での実験において正しく操作を遂行できた。それらの実験における垂れ下がり面の認識の際には、指先関節が屈曲しており、腱がそのままだと指先が物体から大きく離れてしまうが、追加牽引によってFig.5.26aのような状態になり、認識が正しく行われている。

携帯電話やノート、青いバインダーの吸引位置は正しく認識できたが、財布やピンクのバインダーの吸引位置は認識できなかった。財布では吸引領域がネットワークから出力されておらず、ピンクのバインダーでは正しい位置を出力しているものの、確信度が低すぎた。これらはそれぞれ対称的な柄を持っており、画像による認識が困難であったものと考えられる。このような状態でも、再試行と未試行物体側面の選択により、操作を遂行することができた。

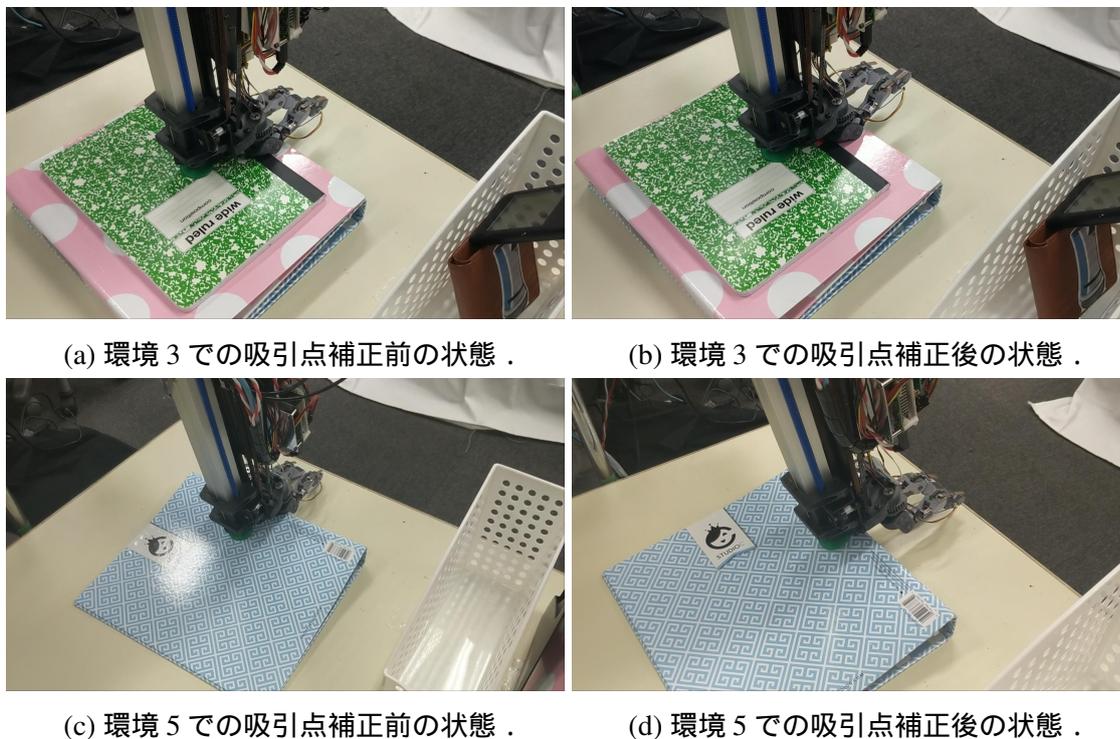
Fig.6.8dでは、垂れ下がり面の認識前に物体を落としたため、認識がスキップされている。これにより、気圧センサによる物体落下検知が機能していることが確かめられた。

環境4,3,5での実験において、Fig.6.8b, Fig.6.8c, Fig.6.8f, Fig.6.8g, Fig.6.9に示すように、吸引位置補正が機能していることが確認された。特に、環境5での実験では、平面検出によってバインダー上面にハンドを沿わせたことにより、補正が成功している。しかし、環境1,2での実験においては、補正がほぼスキップされてしまった。これについては、後で詳述する。

6.3.2 視覚・効果器距離覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験

実験環境

本節の実験では、前節の実験で物体群を配置した場所に対象物品を一つずつ配置する。ロボットは、その物体を持ち上げて垂れ下がり問題を解決した後に、把持安定性の確認動作を行う。この動作は、物体を把持したまま、二つの回転軸回りにそれぞれ20度の振幅、0.4sの周期で7.5周期分振るものである。回転軸として、指関節軸に平行で吸引パッド中心を通る軸と、吸引パッドリップ面に垂直でパッド中心を通る軸を用いる。把持安定性の確認動作の後も物体を落としていなければ、垂れ下がり部分を安定に支えられているということであり、面垂れ下がり解決動作が成功していることがわかる。対象物体として、前節の実験で用いたFig.6.7の5物品に加え、Fig.6.10に示す4物品も用いる。



(a) 環境 3 での吸引点補正前の状態 .

(b) 環境 3 での吸引点補正後の状態 .

(c) 環境 5 での吸引点補正前の状態 .

(d) 環境 5 での吸引点補正後の状態 .

Fig. 6.9: 環境 4 以外での吸引点補正前後の比較 [44] . 環境 4 に関しては, Fig.6.8b , Fig.6.8c , Fig.6.8f , Fig.6.8g を参照 . 環境 1, 2 では, 吸引点補正がスキップされた .

実験結果

全実験結果をまとめたものを Table 6.6 及び Table 6.7 に示す . 全ての目標物体において, 把持安定性確認動作後も物体を落とさなかったため, 面垂れ下がり解決動作が成功していることが確認された . この内, ピンクのバインダーを操作する様子を Fig.6.11 に示す .

効果器距離覚を使わない前節の動作とは異なり, 効果器距離覚を用いることで低い持ち上げでも全ての物品の垂れ下がりを解決することができた . この比較については, 次節で詳述する .

前節の実験と同様, 財布やピンクのバインダーの吸引位置は認識できなかったが, 再試行と未試行物体側面の選択が機能してタスクを遂行できることを確認した . しかし, 再試行した際の視覚認識において, バウンディングボックスが実際の物体に対して大きくずれる現象が確認された . それぞれ以下の理由により, 実際の物体とは違う点群から主成分分析が行われ, 主軸がずれてしまったものと考えられる .



Fig. 6.10: 視覚・効果器距離覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験で追加された対象物品 [130]. ID 6 から順に，雑誌，ハードカバー本，フリップカバー付きタブレット，新聞．ID は，Fig.6.7 からの通し番号である．

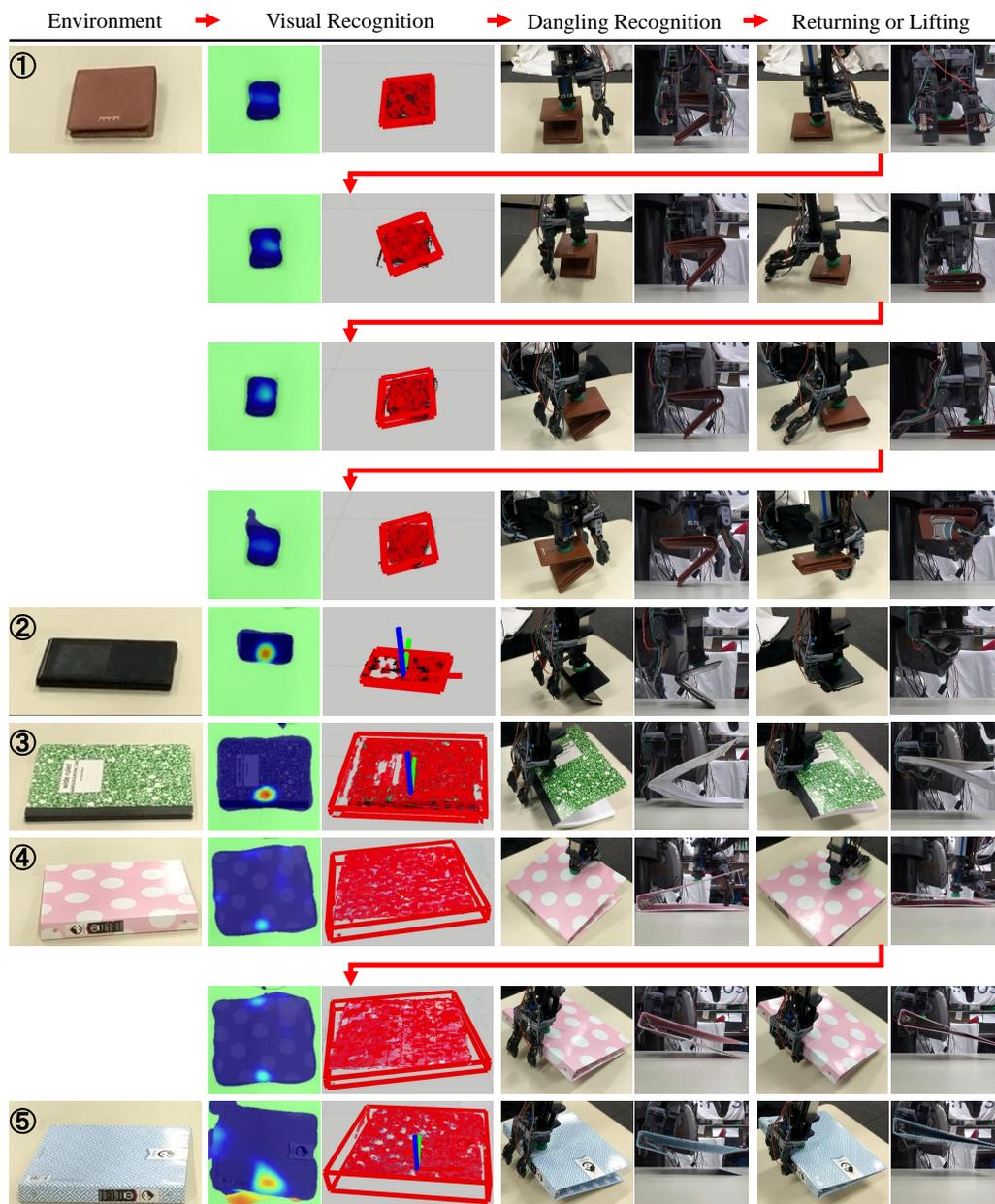
- Table 6.6 二行目では，財布左下部分の点群が欠損している
- Table 6.6 三行目では，財布右上部分の点群が欠損している
- Table 6.6 四行目では，推定された画像内物体領域が机にはみ出して机の点群を巻き込んでいる

一方で，多くの場合で吸引位置補正が機能したため，財布のバウンディングボックスがずれていても操作は成功した．唯一，二回目の試行における補正では，両方向に動いても掌距離覚センサ値の変化を検出できず，補正としては失敗してしまった．これは，センサが財布側面近くにあったため，一回目の補正に失敗して掌を戻した際に，センサが側面をまたいでしまい，二回目の補正でも発見できなくなったからだと考えられる．この場合は，センサが元々側面近くにあるため，補正が失敗しても元の場所を吸引すれば問題ない．他物体の吸引位置補正については，前節の実験と比較して次節で詳述する．

6.3.3 効果器距離覚の有無の比較

一つ目のハンドによる環境 1 での実験において，再試行の度に物体の位置姿勢が変化している．これは，各試行で物体を持ち上げてしまうため，元の場所に戻した際に垂れ下がり部分が元の状態に戻らず，物体を手放すとその部分に引かれて物体全体が移動してしまうからである．この実験においては，再試行毎の視覚認識により移動に対応しているが，移動量が

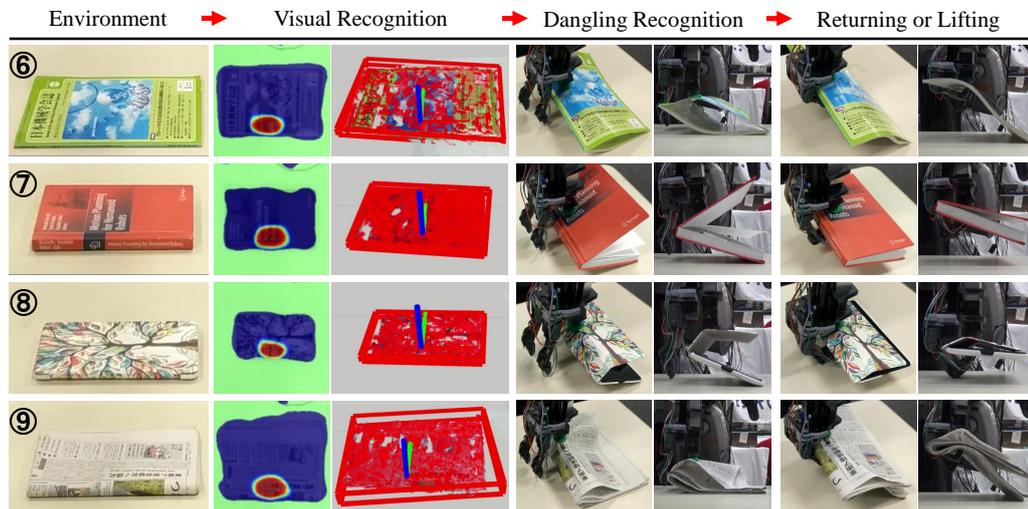
Table 6.6: 視覚・効果器距離覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験の結果 [130].



表の各列の意味は Table 6.5 と同様である。Dangling Recognition 列及び Returning or Lifting 列において、左右の画像は同じ状態を別視点から見たものである。環境 1 では 4 回の試行で、環境 4 では 2 回の試行で垂れ下がり面を持ち上げられた。

大きすぎると、元々あった物体の上から転落するなどの不都合が生じる可能性がある。これに比べて、効果器距離覚の導入により持ち上げ量を削減する手法を実験した二つ目のハンド

Table 6.7: 視覚・効果器距離覚・近接覚を持つハンドによる把持運搬操作実験の結果 [130].



表の各列の意味は Table 6.6 と同様である。

による実験においては、環境 1 での再試行毎の位置姿勢変化が小さくなっている。よって、効果器距離覚が有効であることがわかる。

また、二つ目のハンドによる実験で追加された物品の内、雑誌・新聞については、吸引した物体上面が柔らかく、持ち上げた際に山なりになっていることが、Table 6.7 からわかる。効果器距離覚なしでは更なる持ち上げが必要とされるが、これを行うと山の突出が激しくなって、峰の部分にシワが入る恐れがある。さらに、新聞は、このまま持ち上げると内部に折り込まれた部分が開き、構造が崩壊する恐れがある。ゆえに、物体の素材や構造の破壊回避という点でも、効果器距離覚が有効である。

一つ目のハンドによる環境 1, 2 での実験において、近接覚センサのみを用いた吸引位置補正がほぼスキップされてしまった。この実験においてはタスク実行に支障を来さなかったが、補正がスキップされてしまうと指が物体上面に衝突する恐れがある。スキップが生じた理由は、財布 (ID: 1) や携帯電話 (ID: 2) が反射する赤外線強度が小さく、机表面と区別できないと判断されたからである。これに対し、効果器距離覚センサも用いた吸引位置補正の結果を Table 6.8 に示す。全 16 回の試行の内、11 回で吸引位置を補正することができ、財布や携帯電話においても効果器距離覚を用いて補正が行えたため、赤外線反射強度が小さい物体に対して効果器距離覚が有効であることがわかった。そのうち 5 回の試行で、まず近接覚に

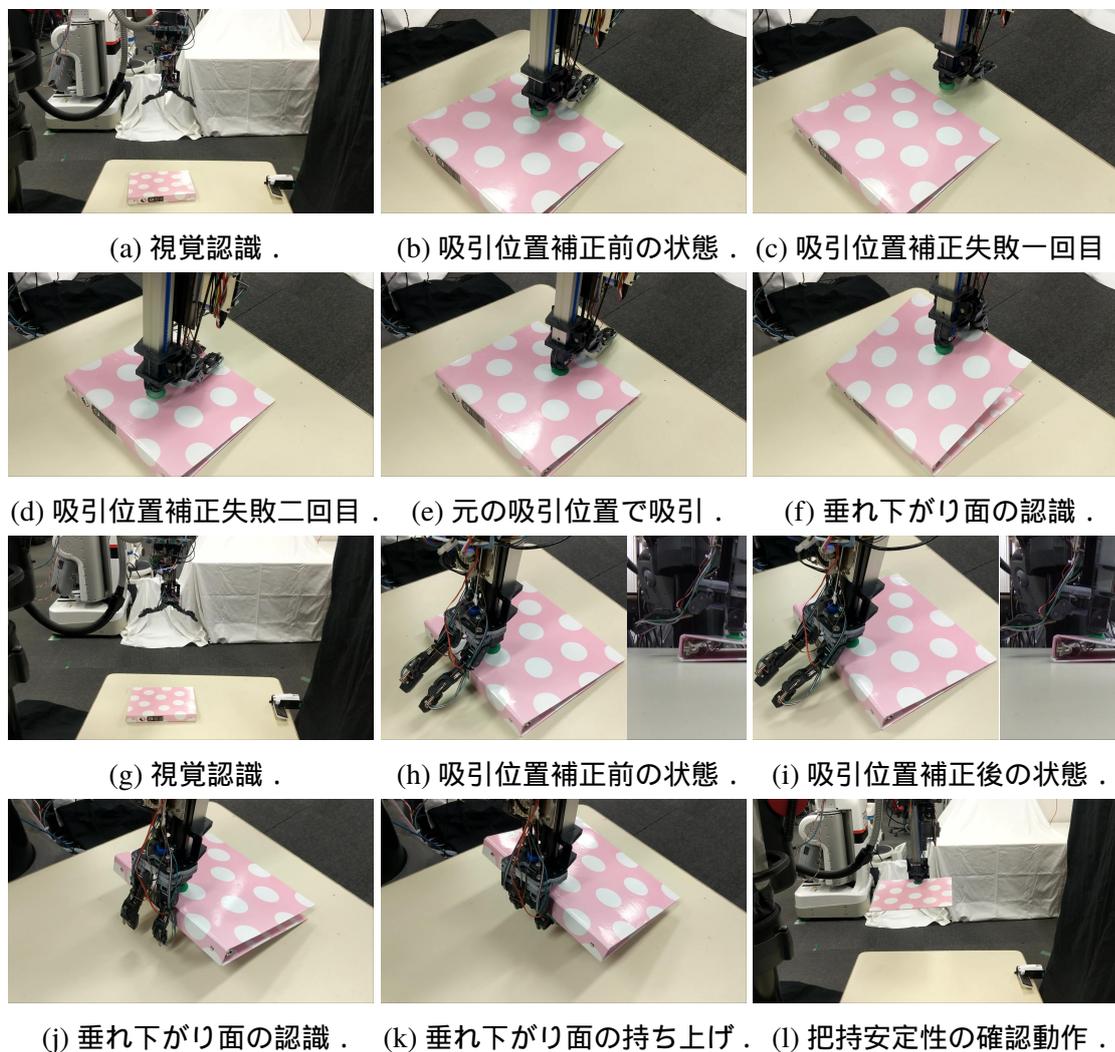


Fig. 6.11: ピンクのバインダーを操作する様子 [130] . (c), (d) では、吸引位置補正が両方向に失敗している . (f) で垂れ下がり面を持ちあげられないと判定された後、(e) の状態に戻ってから物体を戻している . (h), (i) における右側の画像は別視点からの画像であり、吸引位置を側面近くに補正できていることがわかる .

より物体側面が検出されており、近接覚の併用も有効であったことがわかる . また、6 回の試行において、もし効果器距離覚による確認がなければ補正が不十分なまま停止してしまっていたので、物体表面色変化などによる反射強度変化にも強いシステムとなっている . 5 回の失敗は、財布とピンクのバインダー (ID: 4) において起きた . 財布の 3 回の失敗の内、2 回は前述のように、補正が失敗しても元の場所を吸引すれば問題ない場合である . 残りの 1 回

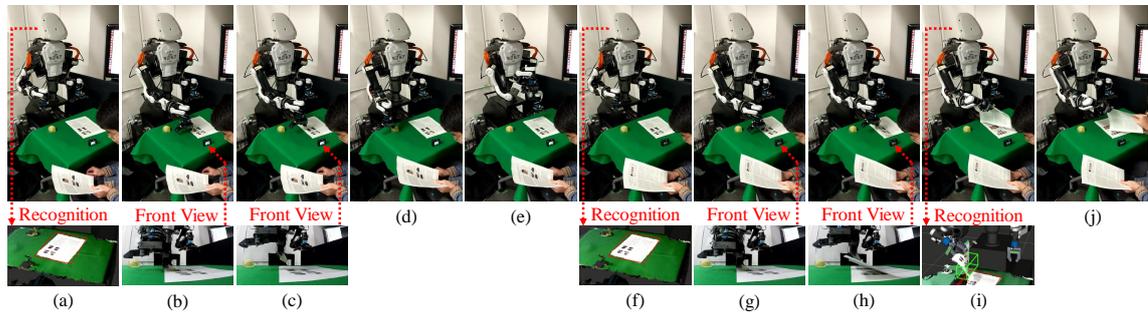


Fig. 6.12: 紙一枚分離持ち上げ実験の様子 [111] . (a), (f), (i) の認識結果の画像において，赤色のバウンディングボックスが机上の印刷物の認識結果を，黄緑色のバウンディングボックスがゼラチンフィンガ周辺の三次元点群の存在認識結果を表している .

は，初期状態において掌距離覚センサ前に物体があるか不確実であった場合であり，あると仮定して補正しようとした結果，物体側面を見つけられなかった．しかし，補正方向を切り替えて次の試行を行った結果，側面を見つけられたため，補正全体としては成功した．ピンクのバインダーの 2 回の失敗は，Fig.6.11c と Fig.6.11d に示すように，側面が小さい場所で起きた．このような状況では，効果器距離覚センサでも検知が難しいことがわかる．

Table 6.8: 二つ目のハンドの実験における吸引位置補正の結果 [130] .

| Object ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Times of refining attempt | 6 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Detected by proximity | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Detected by ToF | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Could not be detected | 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Completed by ToF confirmation | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

6.4 薄く脆弱な物体の把持操作実験

Fig.6.12 に実験の様子を示す．ロボットはまず，机上の印刷物を色抽出で認識し (Fig.6.12 a) , 長辺中央付近に乾いたゼラチンフィンガを押し付けて持ち上げようとするが失敗した (Figs. 6.12b and c) . このことから，この時点でのゼラチンフィンガには吸着性がないことがわかる．ロボットは，ゼラチンフィンガ周辺に視覚から得た三次元点群が観測されないことから持ち上げの失敗を検出し，次はゼラチンフィンガを適度に湿らせる動作を行った．具体的には，

ゼラチンフィンガを事務用海綿に触れさせて濡らし (Fig.6.12 d), 手首に貼り付けた紙に 5 回押し付けた (Fig.6.12 e). 押し付けの際, なるべく乾いた部分に押し付けるため, 一回ごとにフィンガ位置をずらしながら押し付ける. その後, 机上の印刷物を再度色抽出で認識し (Fig.6.12 f), 湿らせたゼラチンフィンガを前回と同じ場所に押し付けると (Fig.6.12 g), 今回は持ち上がった (Fig.6.12 h). このことから, 湿らせることでゼラチンフィンガに吸着性が生じたことがわかる. 持ち上げにより一枚だけになった部分を, もう片方の指でゼラチンフィンガに押し付けることで把持を安定化した後, その印刷物全体を持ち上げる. 今回はゼラチンフィンガ周辺に点群が観測されるため持ち上げは成功と判定され (Fig.6.12 i), 持ち上げた印刷物を人間の方に差し出した. 人間がその印刷物を読むためにロボットハンドから引き抜くと (Fig.6.12 j), ゼラチンフィンガ周辺に点群が観測されなくなることからロボットは引き抜きを検出し, 次の印刷物の持ち上げに移行できた. なお, ゼラチンフィンガが吸着した印刷物に染みなどは残っておらず, 対象物体をほぼ濡らさない吸着であったと考えられる.

第7章

結論

7.1 本研究の結論

本研究では、倉庫の物品棚のような、環境に固定された壁によって物体が囲まれている狭隘空間における物体の把持と操作を行うため、吸引・吸着・把握を併用したロボットハンドの構成法を論じた。構成法として、安定していて望ましい把持動作群を選別して実現対象とすることを考え、選別の基準とするために把持動作の安定指標に着目した。まず、従来は把握力のみを考慮した安定指標であった、フォースクロージャにおける把持安定余裕を、吸引着力も考慮できるように拡張した。さらに、把持動作が不安定になり失敗リスクが高まる期間として、到達動作（リーチング）と把持の間の、予定されている接触の一部しか実現していないため実世界認識や動作制御の誤差により物体が想定外に動く可能性がある把持移行期に着目した。その安定指標として、予定されている接触点それぞれ単独で接触した場合に物体がハンドの動作予定範囲から出て把持が失敗してしまうリスクを評価した時のリスクのある接触点の割合を表す把持移行期リスクを導入した。

以上の二種類の安定指標を用いて、タスクに応じた吸引着把握併用ハンドの動作と構造を同時に設計する手法を提案した。この手法は、狭隘空間のためのハンドのように簡潔な構造で大きな動作安定性を実現したい場合において、物体を壁に押し付けて吸引着することで把持移行期を安定化する動作のような望ましい動作を一つ実現できるだけでなく、それが行えない場合の代替動作や吸引着成立後の把握の併用による把持の安定化まで、構造の簡潔さと動作の安定性のバランスを取りながら実現する。特に、壁に押し付けて吸引を成立させる動作が壁との相対姿勢によらず機能する物体に対しては、狭隘空間の壁と物体との間に吸引機構が入り込む隙間があれば、吸引動作が必ず成功すると考えられる。このような物体の十分条件は、剛体であることかつ、物体の凸包を構成する各面の内部を十分に細かくサンプリングし、各サンプリング点を通るその面の物体内向きの垂線に軸を揃えた真空パッドに対して密閉成立条件を確認すると、必ず満たされていることであると示した。また、このような物体の中で、どの部分を吸引しても把握の併用時に把握用の指と接触できる寸法の物体であれば必ず、把握の併用によって把持の安定性を高められることを示し、提案手法により設計される吸引動作と把握動作が常に有効に機能することを確認した。

以上の手法を用いて設計したハンドを実際の倉庫物品棚ピッキング・ストーイングタスクで利用し、機能することを示した。さらに、把持における感覚誘導は一般に多種センサ情報の統合になり複雑化しやすいが、視覚と末端効果器の距離覚及び近接覚という複数のモダリ

ティを統合した融合感覚の考え方を提案し，簡潔かつ精密な認識動作制御が可能なことを示した．また，提案した把持動作安定指標や融合感覚把持制御は，把持過程において変形する可能性のある本や紙などの把持と操作に適用可能なことを示し，提案手法の有用性を確認した．以上から，吸引・吸着・把握という異なるモダリティを併用するロボットハンドの動作・構造の設計論と動作の制御法が明らかになった．

7.2 今後の展望

本研究では，吸引着をマニピュレーションに適用したが，吸引着の適用先はマニピュレーションに限らない．例えば壁登り [33, 34, 35, 36, 37, 32, 39] などに用いられている．これを考えると，本研究における動作構造同時設計論はマニピュレーションに限らず，ロコモーションなどの別の目的にも拡張できると考えられ，ハンドから全身へと適用範囲を拡大させられると考えられる．融合感覚把持制御に関しても，全身接触に対応することで，同様に用いることができるようになるのではないかと考えられる．

謝辭

本論文は筆者が東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程在学中に、情報システム工学研究室（JSK）において岡田慧教授のご指導のもとで執筆した博士論文です。

稲葉雅幸 教授には、毎週の研究会の度に、研究の進め方や学会発表の仕方など、多岐に渡る内容についてご指導いただきました。筆者は一つのことにのめり込みがちな性格のため、すぐに深掘りを始めてその成果を研究会で報告していましたが、その度に筆者が思いつきもしなかった新たな側面からご質問・ご助言いただき、筆者を広い視野へと引き戻していただいたことに、深く感謝しております。多くの学生の話にしっかりと耳を傾け、正面から向き合うその姿勢は、研究者として見習っていきたいと思っております。

岡田慧 教授には、JSK に配属される前の学部3年ゼミ時代から7年間、研究に関わるあらゆる面でご指導いただきました。論文や申請書を執筆しようとする度に、まずは岡田先生の部屋にご相談に伺う、というのが恒例行事になっていました。筆者の話は長くなりがちでしたが、嫌な顔一つせず根気よくお付き合いくださり、いつも的確にわかりやすくご指導いただきました。本論文を書き上げることができましたのも、先生の多大なるお力添えの賜物と深く感謝しております。先生からご指導いただいた考え方を少しでも後進に伝えていけたらと考えております。

國吉康夫 教授、深尾隆則 教授、竹内昌治 教授には、ご多忙の中、本論文の審査にお時間を割いていただきました。本論文をまとめるために必要なことに関して多くのご指摘をいただきましたことに深く感謝いたします。

浅野悠紀 特任講師には、ハードウェア製作のノウハウをご教授いただくとともに、工作室の環境改善活動に関して大変お世話になりました。初めて3Dプリンターを使わせていただいた時の感動は忘れられません。また、筆者は工作室を利用することが多く、先生が主導してくださった環境改善により多大な恩恵を受けました。

室岡雅樹 元特任助教には、JSK のソフトウェアの使用方法をご教授いただくとともに、学会発表準備の度にご助言をいただきました。筆者の整理されきっていないコンセプトの要点を的確に解釈し、不足部分やわかりやすい伝え方などをご指摘いただいたことは数多く、大変勉強になりました。

これまで JSK に所属されていた皆様、今 JSK に所属されている皆様にも深く感謝いたします。JSK で作り上げられ、今なお発展しているロボット基盤システムがなければ、筆者の研究はハードウェア・ソフトウェア両面において成立しませんでした。また、皆様気さくで

頻繁に会話させていただけたからこそ、筆者の研究内容が整理され、次にやるべきことが明らかになっていたと感じており、深く感謝いたします。

2021年12月3日 長谷川 峻

付録

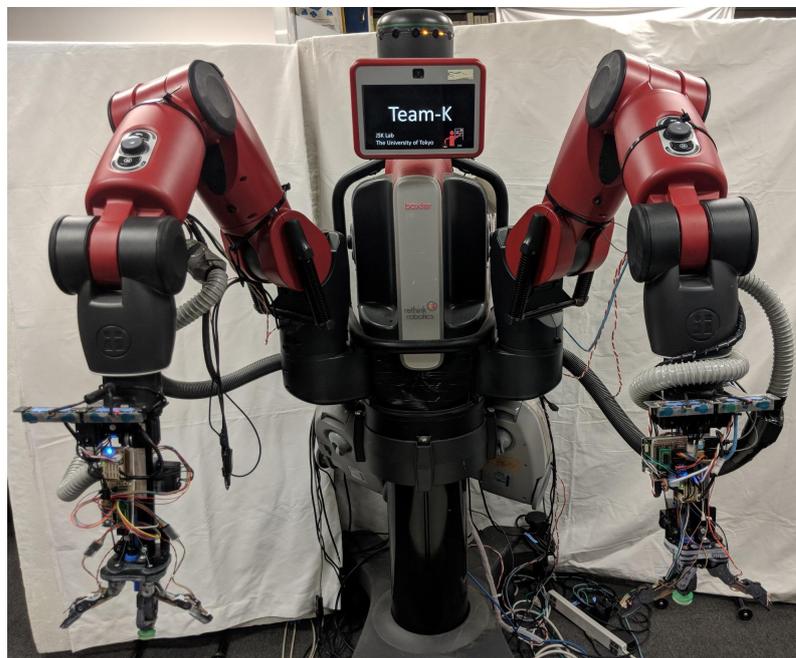


Fig. A.1: 本研究で開発した手を両腕に装着した双腕ロボット Baxter [130] .

Table A.1: Baxter の腕関節の性能 [182] .

| Joint | Min Limit[deg] | Max Limit[deg] | Range[deg] | Maximum Speed[rad/sec] | Flexure Stiffness[Nm/rad] | Peak Torque[Nm] |
|-------|----------------|----------------|------------|------------------------|---------------------------|-----------------|
| S0 | -97.494 | +97.494 | 194.998 | 2.0 | 843 | 50 |
| S1 | -123 | +60 | 183 | 2.0 | 843 | 50 |
| E0 | -174.987 | +174.987 | 349.979 | 2.0 | 843 | 50 |
| E1 | -2.864 | +150 | 153 | 2.0 | 843 | 50 |
| W0 | -175.25 | +175.25 | 350.5 | 4.0 | 250 | 15 |
| W1 | -90 | +120 | 210 | 4.0 | 250 | 15 |
| W2 | -175.25 | +175.25 | 350.5 | 4.0 | 250 | 15 |

A.1 ロボットのハードウェア構成

本研究において使用したロボットのハードウェア構成について述べる .

A.1.1 双腕ロボット Baxter

Baxter [181] は Rethink Robotics 社が開発した双腕ロボットである . Baxter の両腕に本研究で開発した手を装着した時の全体外観を Fig.A.1 に示す . Baxter の腕は Fig.A.2 に示すように 7 軸であり , 各軸の性能は Table A.1 のようになっている . 全軸が直列弾性アクチュエータ (Series Elastic Actuators [183]) となっているため , 腕が環境と衝突した場合でも環

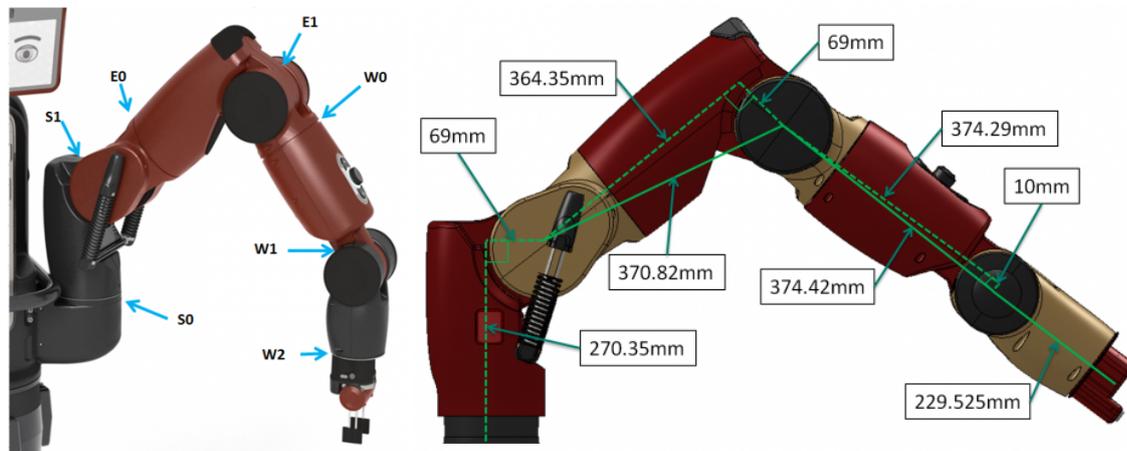


Fig. A.2: Baxter の腕関節の名前と位置関係 [182] .

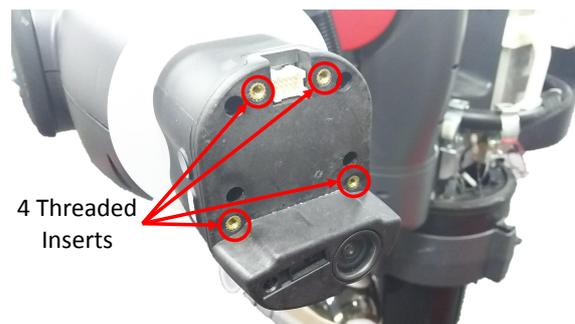


Fig. A.3: ハンド取り付け可能な Baxter の腕先 [29] .

境や腕自身を破壊しにくいという利点がある．反面，腕先に装着するハンドの質量やハンドが把持する物体の質量によって挙動が変化しやすいという欠点があり，精度が求められる動作は困難である場合がある．Baxter の腕先は Fig.A.3 のようになっており，四本のボルトでハンドを取り付けることができる．本研究で開発したハンドの土台には，このボルトに対応した穴が開いているため，Baxter の腕先に固定できる．

Baxter 内部には Table A.2 に示す性能の PC が搭載されており，ここでは Rethink Robotics 社が開発したリアルタイム制御処理が行われる．それ以外の処理は，外部に用意した Table A.3 に示す性能の PC 上で実行される．

Table A.2: Baxter 内部 PC の性能 [182] .

| | |
|------------|--|
| Processor | 3rd Gen Intel Core i7-3770 Processor (8MB, 3.4GHz) w/HD4000 Graphics |
| Memory | 4GB, NON-ECC, 1600MHZ DDR3 |
| Hard Drive | 128GB Solid State Drive |

Table A.3: 外部 PC の性能 [29] .

| | |
|---------------|--|
| Processor | Intel Xeon Processor E5-2690 v3 (30MB, 2.6GHz) |
| Graphics Card | NVIDIA GeForce GTX TITAN X |
| Memory | 66GB, ECC, 2133MHZ DDR4 |
| Hard Drive | 2TB Hard Disk Drive |

A.1.2 双腕ロボット HIRONXJSK

双腕ロボット HIRO-NX は、川田工業株式会社が開発した次世代産業用ロボット NEX-TAGE [184] を研究機関向け仕様にしたものである。NEXTAGE と同様、双腕・軽量コンパクト・本質安全といった特徴を持ち、人と共存・協調して作業を行うことが可能である。同時に、従来の産業用ロボットの利点であった関節サーボ剛性の高さを併せ持ち、高速・高精度な動作が可能である。反面、高速動作中に環境と衝突した場合の瞬間的な衝撃は大きくなりやすいという欠点があり、衝突の可能性がある場合は減速するなどの工夫が必要となる。HIRO-NX の軸構成は、腰 1 軸、首 2 軸、二本の腕にそれぞれ 6 軸、各腕先のハンドにそれぞれ 4 軸となっており、多軸のハンドが標準で搭載されているのが NEXTAGE との違いの一つである。このハンドにより、トランプを束から一枚だけ取り出す動作 [185] や指先に貼り付けた紙を二指で把持する動作 [111] などの器用な動作を行うことが可能となる。このような HIRO-NX を独自に改造したロボットが HIRONXJSK である。オリジナルの HIRO-NX の頭部には二眼のステレオカメラが搭載されているが、これを RGBD カメラ (PrimeSense 社の Carmine) に換装した。また、腕先とハンドの間に 6 軸力覚センサ (ニッタ株式会社の IFS-50M31A25-I25) を追加した。HIRONXJSK の全体外観を Fig.A.4 に示す。HIRO-NX/HIRONXJSK のハンドの掌部分には、8 本の雌ねじが切っているため、追加部品を取り付けることができる。本研究で開発したハンドの土台には Baxter 用の穴が開いているため、これと HIRONXJSK の掌のねじを仲介するアダプタを製作することで、本研究で開発したハンドを HIRONXJSK の腕先に固定することができる。

HIRONXJSK 下部の台座内には、組み込みシステム向けの商用リアルタイム OS である



Fig. A.4: 双腕ロボット HIRONXJSK .

QNX Neutrino RTOS が入った PC が収納されており，ここでは産業技術総合研究所が開発したロボット全身運動制御システム [186] の後継システムである hrpsys-base がリアルタイム制御処理として実行される．それ以外の処理は，異なるロボットソフトウェアプラットフォーム間の通信変換 [187] を介して，外部に用意した PC 上で実行される．

発表文献

筆頭著者論文

学術論文誌

1. Shun Hasegawa, Kentaro Wada, Kei Okada, Masayuki Inaba. A Three-Fingered Hand with a Suction Gripping System for Warehouse Automation. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 31 No. 2 pp. 289-304, 2019.
2. Shun Hasegawa, Naoya Yamaguchi, Kei Okada, Masayuki Inaba. Online Acquisition of Close-Range Proximity Sensor Models for Precise Object Grasping and Verification. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5 No. 4 pp. 5993-6000, 2020.

国際会議

3. Shun Hasegawa, Kentaro Wada, Yusuke Niitani, Kei Okada, Masayuki Inaba. A Three-Fingered Hand with a Suction Gripping System for Picking Various Objects in Cluttered Narrow Space. In *Proceedings of The 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1164-1171, 2017.
4. Shun Hasegawa, Kentaro Wada, Kei Okada, Masayuki Inaba. Detecting and Picking of Folded Objects with a Multiple Sensor Integrated Robot Hand. In *Proceedings of The 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1138-1145, 2018.
5. Shun Hasegawa*, Kentaro Wada*, Shingo Kitagawa, Yuto Uchimi, Kei Okada, Masayuki Inaba (* authors contributed equally). GraspFusion: Realizing Complex Motion by Learning and Fusing Grasp Modalities with Instance Segmentation. In *Proceedings of The 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 7235-7241, 2019.

国内学術講演会

6. 長谷川 峻, 和田 健太郎, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 狭隘空間におけるピッキングタスクのための吸着挟み込みハンドの開発. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2017*, 2P1-B07, 2017.
7. 長谷川 峻, 和田 健太郎, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 多種センサ搭載ロボットハンドによる折り畳まれた物体の状態認識把持操作の実現. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2018*, 1P1-H15, 2018.
8. 長谷川 峻, 山口 直也, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. ToF センサによる反射光強度センサ補正に基づく反射率低依存な広範囲近接覚検出. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2019*, 2P1-H08, 2019.

9. 長谷川 峻, 山口 直也, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 広範囲精密近接覚センサによる精密把持と検証に基づく極薄物体把持・ファイリングの実現. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2020, 2A2-K15, 2020.
10. 長谷川 峻, 中島 慎介, 富田 幹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. ゼラチンの粘着力の再湿性を利用した吸着入切可能なロボットフィンガの開発. 第 21 回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要集, 3D1-01, 2020.

受賞

11. Shun Hasegawa, Kentaro Wada, Yusuke Niitani, Kei Okada, Masayuki Inaba. A Three-Fingered Hand with a Suction Gripping System for Picking Various Objects in Cluttered Narrow Space. *Best Technical Paper Finalist, 2018 Amazon Robotics Best Paper Awards in Manipulation*, 2018.9.
12. Shun Hasegawa, Kentaro Wada, Shingo Kitagawa, Yuto Uchimi, Kei Okada, Masayuki Inaba. GraspFusion: Realizing Complex Motion by Learning and Fusing Grasp Modalities with Instance Segmentation. *IEEE Robotics and Automation Society (RAS) Japan Joint Chapter Young Award (in ICRA2019)*, 2019.5.20.
13. 長谷川 峻, 中島 慎介, 富田 幹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. ゼラチンの粘着力の再湿性を利用した吸着入切可能なロボットフィンガの開発. 第 21 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2020) 優秀講演賞, 2020.12.25.
14. 長谷川 峻, 山口 直也, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 広範囲精密近接覚センサによる精密把持と検証に基づく極薄物体把持・ファイリングの実現. *ROBOMECH 表彰 (学術研究分野)*, 2021.6.7.
15. 長谷川 峻, 中島 慎介, 富田 幹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. ゼラチンの粘着力の再湿性を利用した吸着入切可能なロボットフィンガの開発. 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 2021 年度部門研究奨励賞, 2021.12.17.

共著論文

学術論文誌

16. Naoya Yamaguchi, Shun Hasegawa, Masaki Murooka, Kei Okada, Masayuki Inaba. Selective grasp in occluded space by all-around proximity perceptible finger. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 127 103464, 2020.

17. Shingo Kitagawa, Kentaro Wada, Shun Hasegawa, Kei Okada, Masayuki Inaba. Few-experiential learning system of robotic picking task with selective dual-arm grasping. *Advanced Robotics*, Vol. 34 No. 18 pp. 1171-1189, 2020.
18. Shingo Kitagawa, Shun Hasegawa, Naoya Yamaguchi, Kei Okada, Masayuki Inaba. Miniature Tangible Cube: Concept and Design of Target-Object-Oriented User Interface for Dual-Arm Telemanipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6 No. 4 pp. 6977-6984, 2021.

国際会議

19. Naoya Yamaguchi, Shun Hasegawa, Kei Okada, Masayuki Inaba. A Gripper for Object Search and Grasp Through Proximity Sensing. In *Proceedings of The 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 6690-6697, 2018.
20. Shingo Kitagawa, Kentaro Wada, Shun Hasegawa, Kei Okada, Masayuki Inaba. Multi-Stage Learning of Selective Dual-Arm Grasping Based on Obtaining and Pruning Grasping Points Through the Robot Experience in the Real World. In *Proceedings of The 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 7123-7130, 2018.
21. Naoya Yamaguchi, Shun Hasegawa, Kei Okada, Masayuki Inaba. Daily Assistive Robot Uses a Bag for Carrying Objects with Pre-contact Sensing Gripper. In *Intelligent Autonomous Systems 15*, pp. 812-824, 2019.

国内学術講演会

22. 二井谷 勇佑, 和田 健太郎, 長谷川 峻, 北川 晋吾, 板東 正祐, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 物品棚のピッキング作業のための深層学習でのセマンティック画像分割と三次元物品輪郭抽出. 第34回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2G2-03, 2016.
23. 山口 直也, 長谷川 峻, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 指全周に近接触覚をもつ平行グリッパによる収納袋内の物体把持. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2018, 1P1-H14, 2018.
24. 山口 直也, 室岡 雅樹, 長谷川 峻, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 赤外線型近接覚センサを分布させた2本指ハンドにおける手探り環境の効率的探索と把持対象検知. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2019, 1P2-C02, 2019.
25. 山口 直也, 室岡 雅樹, 長谷川 峻, 新城 光樹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. ゴムモールドされた音センサによる振動認識を利用した衝突・滑り・変形を伴う物体操作の実現. 第20回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演概要集, 2C4-03, 2019.

26. 山口 直也, 長谷川 峻, 新城 光樹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸. 単体利用可能なロボットハンドとゴムモールドされた音センサによる振動認識状況理解を利用した人間協調動作. 第 21 回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要集, 3E2-07, 2020.

参考文献

- [1] 山下忠. 機械で操作される人工の指とそのマテリアルズハンドリングへの応用. 計測と制御, Vol. 3, No. 6, pp. 429–439, 1964.
- [2] 井上博允. 人工の手の計算機制御. 日本機械学会誌, Vol. 73, No. 618, pp. 946–954, 1970.
- [3] 相山康道. グラスプレス・マニピュレーションに関する研究. PhD thesis, 東京大学, 1995.
- [4] R. Tella, J. R. Birk, and R. B. Kelley. General Purpose Hands for Bin-Picking Robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 12, No. 6, pp. 828–837, 1982.
- [5] K. Rahardja and A. Kosaka. Vision-based bin-picking: recognition and localization of multiple complex objects using simple visual cues. In *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1448–1457 vol.3, 1996.
- [6] N. Shroff, Y. Taguchi, O. Tuzel, A. Veeraraghavan, S. Ramalingam, and H. Okuda. Finding a needle in a specular haystack. In *Proceedings of The 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5963–5970, 2011.
- [7] A. Saxena, L. L. S. Wong, and A. Y. Ng. Learning Grasp Strategies with Partial Shape Information. In *Proceedings of the 23rd National Conference on Artificial Intelligence - Volume 3, AAAI'08*, pp. 1491–1494. AAAI Press, 2008.
- [8] D. Fischinger, M. Vincze, and Y. Jiang. Learning grasps for unknown objects in cluttered scenes. In *Proceedings of The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 609–616, 2013.
- [9] 稲葉雅幸, 井上博允. ロボットによる紐のハンドリング. 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 6, pp. 538–547, 1985.
- [10] K. Tanaka, Y. Kamotani, and Y. Yokokohji. Origami folding by a robotic hand. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2540–2547, 2007.
- [11] P. Baker and Z. Halim. An exploration of warehouse automation implementations: cost, service and flexibility issues. *Supply Chain Management*, Vol. 12, No. 2, pp. 129–138, 2007.
- [12] C. Eppner, S. Höfer, R. Jonschkowski, R. Martín-Martín, A. Sieverling, V. Wall, and O. Brock. Lessons from the amazon picking challenge: Four aspects of building robotic systems. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, AnnArbor, Michigan, 2016.
- [13] Z. Littlefield, S. Zhu, H. Kourtev, Z. Psarakis, R. Shome, A. Kimmel, A. Dobson, A. F. D. Souza, and K. E. Bekris. Evaluating end-effector modalities for warehouse picking: A vacuum gripper vs a 3-finger underactuated hand. In *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 1190–1195, 2016.
- [14] C. Hernandez, M. Bharatheesha, W. Ko, H. Gaiser, J. Tan, K. v. Deurzen, M. d. Vries, B. Van Mil, J. v. Egmond, R. Burger, et al. Team delft's robot winner of the amazon picking challenge 2016. In *RoboCup 2016: Robot World Cup XX*, pp. 613–624. Springer, 2016.
- [15] K. T. Yu, N. Fazeli, N. C. Daffe, O. Taylor, E. Donlon, G. D. Lankenau, and A. Rodriguez. A Summary of Team MIT's Approach to the Amazon Picking Challenge 2015. *CoRR*, Vol. abs/1604.03639, , 2016.
- [16] 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 Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 172–188, 2018.
- [17] 堂前幸康. 産業用ロボットマニピュレーション：パターン認識・機械学習編. 計測と制御, Vol. 56, No. 10, pp. 776–781, 2017.

- [18] JIS B 8443:2000. 産業用マニピュレーティングロボット - 把握型グリッパによる対象物ハンドリング - 用語及び特性の表し方. Standard, 2000.
- [19] ISO 14539:2000. Manipulating industrial robots Object handling with grasp-type grippers Vocabulary and presentation of characteristics. Standard, International Organization for Standardization, 2000.
- [20] M. Gupta and G. S. Sukhatme. Using manipulation primitives for brick sorting in clutter. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3883–3889, 2012.
- [21] T. Hermans, J. M. Rehg, and A. Bobick. Guided pushing for object singulation. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4783–4790, 2012.
- [22] M. R. Dogar and S. S. Srinivasa. Physics-based manipulation in human environments. *日本ロボット学会誌*, Vol. 31, No. 4, pp. 353–357, 2013.
- [23] 福村直博. 把持. *バイオメカニズム学会 (編), 手の百科事典*, pp. 164–168. 朝倉書店, 2017.
- [24] G. A. Bekey. 自律ロボット概論. マイナビ出版, 2007. 松田 晃一, 細部 博史 訳.
- [25] J. Felip and A. Morales. Robust sensor-based grasp primitive for a three-finger robot hand. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1811–1816, 2009.
- [26] K. Hsiao, P. Nangeroni, M. Huber, A. Saxena, and A. Y. Ng. Reactive grasping using optical proximity sensors. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2098–2105, 2009.
- [27] A. M. Dollar, L. P. Jentoft, J. H. Gao, and R. D. Howe. Contact sensing and grasping performance of compliant hands. *Autonomous Robots*, Vol. 28, No. 1, pp. 65–75, 2010.
- [28] K. Hsiao, S. Chitta, M. Ciocarlie, and E. G. Jones. Contact-reactive grasping of objects with partial shape information. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1228–1235, 2010.
- [29] 長谷川峻. 吸着挟み込みハンドによる狭隘空間での物体把持操作行動の実現に関する研究. 卒業論文, 東京大学, 2017.
- [30] T. B. Philp and J. J. Hagerty. Process development for automated solar cell and module production. Task 4: automated array assembly. Quarterly report No. 3. Technical report, MB Associates, 1979.
- [31] 井口忠士, 立川俊洋, 茅本隆司. 静電吸着装置の材料と方式. *真空*, Vol. 45, No. 8, pp. 633–636, 2002.
- [32] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, D. Santos, and M. R. Cutkosky. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 65–74, 2008.
- [33] 田口幹, 石崎篤. 粘着剤を用いた壁面移動ミニロボットの開発. *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 1, pp. 150–153, 1996.
- [34] K. A. Daltorio, A. D. Horschler, S. Gorb, R. E. Ritzmann, and R. D. Quinn. A small wall-walking robot with compliant, adhesive feet. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3648–3653, 2005.
- [35] O. Unver and M. Sitti. Tankbot: A miniature, peeling based climber on rough and smooth surfaces. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2282–2287, 2009.
- [36] T. Miyake, H. Ishihara, and M. Yoshimura. Basic studies on wet adhesion system for wall climbing robots. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1920–1925, 2007.

- [37] S. Hirose and H. Tsutsumitake. Disk rover: A wall-climbing robot using permanent magnet disks. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2074–2079, 1992.
- [38] B. He, Z. Wang, M. Li, K. Wang, R. Shen, and S. Hu. Wet adhesion inspired bionic climbing robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 1, pp. 312–320, 2014.
- [39] H. Prahlaad, R. Pelrine, S. Stanford, J. Marlow, and R. Kornbluh. Electroadhesive robots wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3028–3033, 2008.
- [40] K. Yamaguchi, Y. Hirata, and K. Kosuge. Development of robot hand with suction mechanism for robust and dexterous grasping. In *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5500–5505, 2013.
- [41] 相山康道, 鎌田徹, 稲葉雅幸, 井上博允. 指先に回転円盤を持つ2本指ロボットによる薄板状物体の操作. 日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集, pp. 761–762, 1991.
- [42] D. Kappler, L. Y. Chang, N. S. Pollard, T. Asfour, and R. Dillmann. Templates for pre-grasp sliding interactions. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, No. 3, pp. 411–423, 2012. Autonomous Grasping.
- [43] K. Hang, A. S. Morgan, and A. M. Dollar. Pre-grasp sliding manipulation of thin objects using soft, compliant, or underactuated hands. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 662–669, 2019.
- [44] S. Hasegawa, K. Wada, K. Okada, and M. Inaba. Detecting and picking of folded objects with a multiple sensor integrated robot hand. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1138–1145, 2018.
- [45] Z. Xu, T. Deyle, and C. C. Kemp. 1000 trials: An empirically validated end effector that robustly grasps objects from the floor. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2160–2167, 2009.
- [46] R. Ramos-Garijo, M. Prats, P. J. Sanz, and A. P. D. Pobil. An autonomous assistant robot for book manipulation in a library. In *2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 3912–3917 vol.4, 2003.
- [47] S. Jia, T. Murakami, D. Chugo, and K. Takase. Rtm-based robot system for supporting book acquisition. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 566–571, 2009.
- [48] A. Morales, M. Prats, P. Sanz, and A. P. Pobil. An experiment in the use of manipulation primitives and tactile perception for reactive grasping. In *Robotics: Science and Systems, Workshop on Robot Manipulation: Sensing and Adapting to the Real World, Atlanta, USA, 2007*.
- [49] S. Hangl, E. Ugur, S. Szedmak, and J. Piater. Robotic playing for hierarchical complex skill learning. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2799–2804, 2016.
- [50] J. E. King, M. Klingensmith, C. Dellin, M. Dogar, P. Velagapudi, N. Pollard, and S. Srinivasa. Pregrasp manipulation as trajectory optimization. In *Robotics: Science and Systems*, 2013.
- [51] 川崎重工業株式会社. 国産最初の産業用ロボット生産開始. Accessed: Oct. 3, 2021. [Online]. Available: http://rraj.rsj-web.org/back_wp/wp-content/uploads/x11_01.pdf.
- [52] R. Allan. Busy robots spur productivity. *IEEE Spectrum*, Vol. 16, No. 9, pp. 31–36, 1979.

- [53] 室岡雅樹. 操作応答の知覚による物理的整合性推論に基づくヒューマノイドの試行獲得型マニピュレーション. PhD thesis, 東京大学, 2017.
- [54] F. Reuleaux. *The Kinematics of Machinery*. Macmillan, 1876.
- [55] V. Nguyen. Constructing force-closure grasps. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 3–16, 1988.
- [56] S. Jacobsen, E. Iversen, D. Knutti, R. Johnson, and K. Biggers. Design of the utah/m.i.t. dextrous hand. In *Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1520–1532, 1986.
- [57] R. Tomovic and G. Boni. An adaptive artificial hand. *IRE Transactions on Automatic Control*, Vol. 7, No. 3, pp. 3–10, 1962.
- [58] J. K. Salisbury and J. J. Craig. Articulated hands: Force control and kinematic issues. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 4–17, 1982.
- [59] J. Piater and R. Grupen. Learning appearance features to support robotic manipulation. 2002.
- [60] 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 107, No. 44, pp. 18809–18814, 2010.
- [61] M. T. Mason. Mechanics and planning of manipulator pushing operations. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 53–71, 1986.
- [62] K. M. Lynch. *Nonprehensile robotic manipulation: controllability and planning*. Carnegie Mellon University, 1996.
- [63] M. Murooka, R. Ueda, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba. Global planning of whole-body manipulation by humanoid robot based on transition graph of object motion and contact switching. *Advanced Robotics*, Vol. 31, No. 6, pp. 322–340, 2017.
- [64] 大道武生, 樋口優, 大西献. 極限作業ロボットマニピュレータの設計法に関する研究 (その 1). 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 4, pp. 508–517, 1998.
- [65] 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. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 736–752, 2014.
- [66] G. Mantriota. Theoretical model of the grasp with vacuum gripper. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 42, No. 1, pp. 2–17, 2007.
- [67] J. Mahler, M. Matl, X. Liu, A. Li, D. Gealy, and K. Goldberg. Dex-net 3.0: Computing robust robot suction grasp targets in point clouds using a new analytic model and deep learning. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018.
- [68] 山口賢悟, 平田泰久, 小菅一弘. 吸着機能を有するロボットハンドの把持解析. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 1A1–K06, 2013.
- [69] J. A. Seon, R. Dahmouche, and M. Gauthier. Enhance in-hand dexterous micromanipulation by exploiting adhesion forces. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 34, No. 1, pp. 113–125, 2018.
- [70] S. Hasegawa, K. Wada, K. Okada, and M. Inaba. A three-fingered hand with a suction gripping system for warehouse automation. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 31, No. 2, pp. 289–304, 2019.
- [71] 横井亮, 前田雄介, 小林達也. 環境を利用した平面内ケーシングマニピュレーションの定式化と計画. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 770, pp. 2671–2677, 2010.

- [72] 川崎晴久. ロボットハンドマニピュレーション. 共立出版, 2009.
- [73] J. Kerr and B. Roth. Analysis of multifingered hands. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 3–17, 1986.
- [74] 張曉毅, 中村仁彦, 吉本堅一. 不完全な接触をもつ把持の力学的多面凸解析. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 105–113, 1996.
- [75] S. S. S. R. M. Murray, Z. Li. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [76] 平井慎一. 凸多面錐理論に基づくマニピュレーションの運動学・静力学とそのマニピュレーション計画問題への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 68–83, 1999.
- [77] B. Mishra, J. T. Schwartz, and M. Sharir. On the existence and synthesis of multifinger positive grips. *Algorithmica*, Vol. 2, No. 1, pp. 541–558, 1987.
- [78] 吉川恒夫. 把持と操りの基礎理論. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 950–957, 1995.
- [79] C. Ferrari and J. Canny. Planning optimal grasps. In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2290–2295, 1992.
- [80] Y. Zheng. An efficient algorithm for a grasp quality measure. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 29, No. 2, pp. 579–585, 2013.
- [81] A. T. Miller and P. K. Allen. Graspit! a versatile simulator for robotic grasping. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 11, No. 4, pp. 110–122, 2004.
- [82] 辻徳生, 原田研介, 金子健二. 摩擦円すいの楕円体近似を用いた把持安定性の高速評価. 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 3, pp. 278–287, 2011.
- [83] C. B. Barber, D. P. Dobkin, and H. Huhdanpaa. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Trans. Math. Softw.*, Vol. 22, No. 4, p. 469–483, 1996.
- [84] R. Schneider. *Convex Bodies: The Brunn–Minkowski Theory*. No. 151. Cambridge University Press, 2014.
- [85] R. Diankov and J. Kuffner. Openrave: A planning architecture for autonomous robotics. *Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-08-34*, Vol. 79, , 2008.
- [86] 原田研介. マニピュレーション研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 320–325, 2013.
- [87] C. Borst, M. Fischer, and G. Hirzinger. A fast and robust grasp planner for arbitrary 3d objects. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1890–1896, 1999.
- [88] H. Pham and Q. C. Pham. Critically fast pick-and-place with suction cups. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3045–3051, 2019.
- [89] N. Chavan-Dafle, M. T. Mason, H. Staab, G. Rossano, and A. Rodriguez. A two-phase gripper to reorient and grasp. In *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 1249–1255, 2015.
- [90] E. Rimon and A. Blake. Caging 2d bodies by 1-parameter two-fingered gripping systems. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1458–1464 vol.2, 1996.
- [91] K. J. Kyriakopoulos, J. V. Riper, A. Zink, and H. E. Stephanou. Kinematic analysis and position/force control of the anthropot dextrous hand. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 27, No. 1, pp. 95–104, 1997.

- [92] H. Kawasaki and T. Komatsu. Mechanism design of anthropomorphic robot hand: Gifu hand i. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 11, No. 4, pp. 269–273, 1999.
- [93] K.-J. Cho, J. Rosmarin, and H. Asada. Sbc hand: A lightweight robotic hand with an sma actuator array implementing c-segmentation. In *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 921–926, 2007.
- [94] S. Lee, S. Noh, Y. Lee, and J. H. Park. Development of bio-mimetic robot hand using parallel mechanisms. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 550–555, 2009.
- [95] G. Grioli, M. Catalano, E. Silvestro, S. Tono, and A. Bicchi. Adaptive synergies: An approach to the design of under-actuated robotic hands. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1251–1256, 2012.
- [96] 鈴木健太, 渡邊鉄也, 田中基八郎. 指先の摩擦モデルに関する研究. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 746, pp. 2549–2554, 2008.
- [97] D. Hackett, J. Pippine, A. Watson, C. Sullivan, and G. Pratt. An overview of the darpa autonomous robotic manipulation (arm) program. *日本ロボット学会誌*, Vol. 31, No. 4, pp. 326–329, 2013.
- [98] S. Hasegawa, K. Wada, Y. Niitani, K. Okada, and M. Inaba. A three-fingered hand with a suction gripping system for picking various objects in cluttered narrow space. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1164–1171, 2017.
- [99] N. Correll, K. E. Bekris, D. Berenson, O. Brock, A. Causo, K. Hauser, K. Okada, A. Rodriguez, J. M. Romano, and P. R. Wurman. Lessons from the Amazon Picking Challenge. *CoRR*, Vol. abs/1601.05484, , 2016.
- [100] Yale OpenHand Project - Model O. https://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/model_o.html#about, 2016.
- [101] 山野直哉, 高椋慎也, 細田耕. 馴染み把持を実現する劣駆動人間型ロボットハンドの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2008, pp. 1A1–A11, 2008.
- [102] H. Zhang, P. Long, D. Zhou, Z. Qian, Z. Wang, W. Wan, D. Manocha, C. Park, T. Hu, C. Cao, Y. Chen, M. Chow, and J. Pan. Dorapicker: An autonomous picking system for general objects. In *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 721–726, 2016.
- [103] J. Morrow, H. Shin, C. Phillips-Grafflin, S. Jang, J. Torrey, R. Larkins, S. Dang, Y. Park, and D. Berenson. Improving soft pneumatic actuator fingers through integration of soft sensors, position and force control, and rigid fingernails. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5024–5031, 2016.
- [104] P. R. Wurman, R. D’Andrea, and M. Mountz. Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses. *AI magazine*, Vol. 29, No. 1, p. 9, 2008.
- [105] L. Wang and F. Iida. Physical connection and disconnection control based on hot melt adhesives. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 4, pp. 1397–1409, 2013.
- [106] P. V. Nguyen, N. V. Huynh, T. T. Phan, and V. A. Ho. Soft grasping with wet adhesion: Preliminary evaluation. In *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics*, pp. 418–423, 2018.
- [107] E. W. Hawkes, D. L. Christensen, A. K. Han, H. Jiang, and M. R. Cutkosky. Grasping without squeezing: Shear adhesion gripper with fibrillar thin film. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2305–2312, 2015.

- [108] G. J. Monkman, P. M. Taylor, and G. J. Farnworth. Principles of electroadhesion in clothing robotics. *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 14–20, 1989.
- [109] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators. *Advanced Materials*, Vol. 28, No. 2, pp. 231–238, 2016.
- [110] M. Elbadawi, G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and T. Gustafsson. Bio-inspired climbing robots in wet environments: Recent trends in adhesion methods and materials. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2347–2353, 2018.
- [111] 長谷川峻, 中島慎介, 富田幹, 岡田慧, 稲葉雅幸. ゼラチンの粘着力の再湿性を利用した吸着入切可能なロボットフィンガの開発. 第21回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演概要集, pp. 3D1–01, 2020.
- [112] 森村正博. 天然高分子材料と接着剤. *日本接着学会誌*, Vol. 42, No. 11, pp. 481–491, 2006.
- [113] V. Ganeshram and M. Achudhan. Synthesis and characterization of phenol formaldehyde resin as a binder used for coated abrasives. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 6, No. 6, pp. 4814–4823, 2013.
- [114] T. Matsumoto, H. Matsumoto, K. Yamada, and S. Hoshino. Impact of artificial "gummy" fingers on fingerprint systems. In R. L. v. Renesse, editor, *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques IV*, Vol. 4677, pp. 275–289. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2002.
- [115] J. Shintake, H. Sonar, E. Piskarev, J. Paik, and D. Floreano. Soft pneumatic gelatin actuator for edible robotics. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 6221–6226, 2017.
- [116] 国立医薬品食品衛生研究所. 国際化学物質安全性カード (ICSC) 日本語版. ICSC 番号 0624, 2004.
- [117] SPB1-30-ED-65-SC040. <https://www.schmalz.jp/shopdetail/011010000003/ct130/page1/recommend/>, 2021.
- [118] Pro2 |Raise3D プリンター. <https://raise3d.jp/pro2>, 2021.
- [119] NGEN CLEAR. <https://colorfabb.com/ngen-clear>, 2021.
- [120] 長谷川健介. ロボットにおける触覚センサの役割. *日本ロボット学会誌*, Vol. 2, No. 5, pp. 426–429, 1984.
- [121] J. Bohg, A. Morales, T. Asfour, and D. Kragic. Data-driven grasp synthesis a survey. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, No. 2, pp. 289–309, 2014.
- [122] A. Saxena, J. Driemeyer, and A. Y. Ng. Robotic grasping of novel objects using vision. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 157–173, 2008.
- [123] J. Mahler, J. Liang, S. Niyaz, M. Laskey, R. Doan, X. Liu, J. A. Ojea, and K. Goldberg. Dex-net 2.0: Deep learning to plan robust grasps with synthetic point clouds and analytic grasp metrics. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS)*, 2017.
- [124] A. Krull, E. Brachmann, F. Michel, M. Y. Yang, S. Gumhold, and C. Rother. Learning analysis-by-synthesis for 6d pose estimation in rgb-d images. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015.
- [125] A. S. Periyasamy, M. Schwarz, and S. Behnke. Robust 6d object pose estimation in cluttered scenes using semantic segmentation and pose regression networks. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6660–6666, 2018.

- [126] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. Girshick. Mask R-CNN. In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017.
- [127] E. Shelhamer, J. Long, and T. Darrell. Fully convolutional networks for semantic segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39, No. 4, pp. 640–651, 2017.
- [128] K. Wada, M. Murooka, K. Okada, and M. Inaba. 3d object segmentation for shelf bin picking by humanoid with deep learning and occupancy voxel grid map. In *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 1149–1154, 2016.
- [129] K. Wada, K. Okada, and M. Inaba. Probabilistic 3d multilabel real-time mapping for multi-object manipulation. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5092–5099, 2017.
- [130] 長谷川峻. 多種感覚組込の吸着多指ハンドによる変形柔軟物の状態認識と把持運搬操作の実現. Master's thesis, 東京大学, 2019.
- [131] A. Zeng, S. Song, K. T. Yu, E. Donlon, F. R. Hogan, M. Bauza, D. Ma, O. Taylor, M. Liu, E. Romo, N. Fazeli, F. Alet, N. C. Dafle, R. Holladay, I. Morona, P. Q. Nair, D. Green, I. Taylor, W. Liu, T. Funkhouser, and A. Rodriguez. Robotic pick-and-place of novel objects in clutter with multi-affordance grasping and cross-domain image matching. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2018.
- [132] K. Simonyan and A. Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In *International Conference on Learning Representations 2015*, 2015.
- [133] R. B. Rusu and S. Cousins. 3d is here: Point cloud library (pcl). In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1–4, 2011.
- [134] D. P. Kingma and J. Ba. Adam: A method for stochastic optimization. In *International Conference on Learning Representations 2015*, 2015.
- [135] I. Lenz, H. Lee, and A. Saxena. Deep learning for detecting robotic grasps. *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, Vol. 34, No. 4-5, pp. 705–724, 2015.
- [136] L. Pinto and A. Gupta. Supersizing Self-supervision: Learning to Grasp from 50K Tries and 700 Robot Hours. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016.
- [137] J. Mahler and K. Goldberg. Learning Deep Policies for Robot Bin Picking by Simulating Robust Grasping Sequences. In *Conference on Robot Learning (CoRL)*, 2017.
- [138] S. Levine, P. Pastor, A. Krizhevsky, and D. Quillen. Learning Hand-Eye Coordination for Robotic Grasping with Deep Learning and Large-Scale Data Collection. *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, Vol. 37, No. 4-5, pp. 421–436, 2018.
- [139] H. Zhu, Y. Y. Kok, A. Causo, K. J. Chee, Y. Zou, S. O. K. Al-Jufry, C. Liang, I. M. Chen, C. C. Cheah, and K. H. Low. Strategy-based robotic item picking from shelves. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2263–2270, 2016.
- [140] S. Hasegawa, K. Wada, S. Kitagawa, Y. Uchimi, K. Okada, and M. Inaba. Graspfusion: Realizing complex motion by learning and fusing grasp modalities with instance segmentation. In *2019 International Conference on Robotics and Automation*, pp. 7235–7241, 2019.
- [141] A. Eitel, J. T. Springenberg, L. Spinello, M. Riedmiller, and W. Burgard. Multimodal deep learning for robust RGB-D object recognition. In *Proceedings of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015.

- [142] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, and L. Fei-Fei. ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2009.
- [143] K. Wada, S. Kitagawa, K. Okada, and M. Inaba. Instance Segmentation of Visible and Occluded Regions for Finding and Picking Target from a Pile of Objects. In *Proceedings of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018.
- [144] T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, L. Bourdev, R. Girshick, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, C. L. Zitnick, and P. Dollár. Microsoft COCO: Common Objects in Context. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2014.
- [145] K. Sasaki, K. Koyama, A. Ming, M. Shimojo, R. Plateaux, and J. Choley. Robotic grasping using proximity sensors for detecting both target object and support surface. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2925–2932, 2018.
- [146] R. Patel and N. Correll. Integrated force and distance sensing using elastomer-embedded commodity proximity sensors. In *Robotics: Science and Systems*, 2016.
- [147] Robotic Finger Sensor - SPX-14200 - SparkFun Electronics. <https://www.sparkfun.com/products/retired/14200>, 2019.
- [148] M. Murooka, R. Ueda, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba. Planning and execution of groping behavior for contact sensor based manipulation in an unknown environment. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3955–3962, 2016.
- [149] Vishay, Malvern, Pennsylvania. Fully Integrated Proximity and Ambient Light Sensor with Infrared Emitter, I²C Interface, and Interrupt Function. (2019). Accessed: May 11, 2020. [Online]. Available: <https://www.vishay.com/docs/84274/vcn14040.pdf>.
- [150] UP Specifications - UP Bridge the Gap. <https://up-board.org/up/specifications/>, 2019.
- [151] Resistive Flex Sensors | Spectra Symbol Flex Sensors. <http://www.spectrasymbol.com/product/flex-sensors/>, 2019.
- [152] BME280. https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280, 2016.
- [153] M. Schwarz, A. Milan, A. S. Periyasamy, and S. Behnke. Rgb-d object detection and semantic segmentation for autonomous manipulation in clutter. *The International Journal of Robotics Research*, p. 0278364917713117, 2016.
- [154] MCP3208. <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP3208>, 2019.
- [155] S. Hasegawa, N. Yamaguchi, K. Okada, and M. Inaba. Online acquisition of close-range proximity sensor models for precise object grasping and verification. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 4, pp. 5993–6000, 2020.
- [156] D. Balek and R. Kelley. Using gripper mounted infrared proximity sensors for robot feedback control. In *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 282–287, 1985.
- [157] R. Wistort and J. R. Smith. Electric field servoing for robotic manipulation. In *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 494–499, 2008.
- [158] J. Fujimoto, I. Mizuuchi, Y. Sodeyama, K. Yamamoto, N. Muramatsu, S. Ohta, T. Hirose, K. Hongo, K. Okada, and M. Inaba. Picking up dishes based on active groping with multisensory robot hand. In *RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 220–225, 2009.

- [159] H. Hasegawa, Y. Mizoguchi, K. Tadakuma, A. Ming, M. Ishikawa, and M. Shimojo. Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 777–784, 2010.
- [160] Liang-Ting Jiang and J. R. Smith. Seashell effect pretouch sensing for robotic grasping. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2851–2858, 2012.
- [161] S. Escalda Navarro, M. Schonert, B. Hein, and H. Wörn. 6d proximity servoing for preshaping and haptic exploration using capacitive tactile proximity sensors. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 7–14, 2014.
- [162] R. Patel, R. Cox, and N. Correll. Integrated proximity, contact and force sensing using elastomer-embedded commodity proximity sensors. *Autonomous Robots*, Vol. 42, No. 7, pp. 1443–1458, 2018.
- [163] K. Koyama, M. Shimojo, T. Senoo, and M. Ishikawa. High-speed high-precision proximity sensor for detection of tilt, distance, and contact. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 3224–3231, 2018.
- [164] P. E. Lancaster, J. R. Smith, and S. S. Srinivasa. Improved proximity, contact, and force sensing via optimization of elastomer-air interface geometry. In *2019 International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3797–3803, 2019.
- [165] N. Yamaguchi, S. Hasegawa, M. Murooka, K. Okada, and M. Inaba. Selective grasp in occluded space by all-around proximity perceptible finger. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 127, p. 103464, 2020.
- [166] 下条誠, 小山佳祐. ロボットマニピュレーションのための触近接覚. 計測と制御, Vol. 56, No. 10, pp. 758–763, 2017.
- [167] J. Konstantinova, A. Stilli, A. Faragasso, and K. Althoefer. Fingertip proximity sensor with realtime visual-based calibration. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 170–175, 2016.
- [168] C. Bersch, B. Pitzer, and S. Kammel. Bimanual robotic cloth manipulation for laundry folding. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1413–1419, 2011.
- [169] J. Kwiatkowski, D. Cockburn, and V. Duchaine. Grasp stability assessment through the fusion of proprioception and tactile signals using convolutional neural networks. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 286–292, 2017.
- [170] F. R. Hogan, M. Bauza, O. Canal, E. Donlon, and A. Rodriguez. Tactile regrasp: Grasp adjustments via simulated tactile transformations. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2963–2970, 2018.
- [171] J. Xu, A. Bhardwaj, G. Sun, T. Aykut, N. Alt, M. Karimi, and E. Steinbach. Learning-based modular task-oriented grasp stability assessment. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3468–3475, 2018.
- [172] R. Calandra, A. Owens, D. Jayaraman, J. Lin, W. Yuan, J. Malik, E. H. Adelson, and S. Levine. More than a feeling: Learning to grasp and regrasp using vision and touch. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 3300–3307, 2018.
- [173] Pololu, Las Vegas, Nevada. Pololu - VL53L0X Time-of-Flight Distance Sensor Carrier with Voltage Regulator, 200cm Max. (2016). Accessed: Feb. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2490>.

- [174] STMicroelectronics, Geneva, Switzerland. World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor. (2018). Accessed: Feb. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>.
- [175] STMicroelectronics, Geneva, Switzerland. VL53L1X_DS.fm. (2018). Accessed: Feb. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l1x.pdf>.
- [176] STMicroelectronics, Geneva, Switzerland. Proximity and ambient light sensing (ALS) module. (2016). Accessed: Feb. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl6180x.pdf>.
- [177] Y. Suzuki and T. Kitamura. Pci method: A novel fabrication method of soft mechanisms utilizing cure inhibition of addition reaction silicone. In *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics*, pp. 483–490, 2019.
- [178] MJP シリーズ 後処理のコツ その 1. http://www.iguazu-3d.jp/case_study/laboratory/atoshori1/, 2019.
- [179] 離型剤 フッ素系タイプR | プロコース. <http://www.ichinen-chem.co.jp/business/prouse/products/items/view/298>, 2019.
- [180] F. Chen, K. Sekiyama, B. Sun, P. Di, J. Huang, H. Sasaki, and T. Fukuda. Design and application of an intelligent robotic gripper for accurate and tolerant electronic connector mating. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 441–451, 2012.
- [181] C. Fitzgerald. Developing baxter. In *2013 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications*, pp. 1–6, 2013.
- [182] Hardware Specifications - sdk-wiki. http://sdk.rethinkrobotics.com/wiki/Hardware_Specifications, 2019.
- [183] G. A. Pratt and M. M. Williamson. Series elastic actuators. In *Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 399–406. IEEE, 1995.
- [184] 長嶋功一, 石崎雅一, 宮森剛, 金平徳之. 次世代産業用ロボット「NEXTAGE」の開発概要. 川田技報 Vol.30, pp. 15–20, 川田工業株式会社, 2011.
- [185] G. d. Campos Affonso, K. Okada, and M. Inaba. Scratch3-ros. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2A1–M08, 2019.
- [186] 金広文男, 横井一仁, 金子健二, 藤原清司, 梶田秀司, 比留川博久. ヒューマノイドロボット (hrp-1s) の全身運動制御システム. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 20–27, 2004.
- [187] 岡田慧, 斎藤学, 東駿, 三木田浩行, 野沢峻一, 稲葉雅幸. OpenRTM-ROS 相互運用プロジェクト. 第 30 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp. 3J2–2, 2012.

以上

1p ~ 240p 完

博士論文

令和3年12月3日提出

東京大学大学院 情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻 博士課程
長谷川 峻