

ロボットセル生産システムのための  
汎用ハンドに関する研究

2012年

土橋 宏規



# 要 旨

本論文は、ロボットセル生産システムにおける組立作業において、多種多様な形状の部品の初期位置・姿勢にある程度の不確実性があっても、部品の初期不確実性をロバストに吸収し、最終的に組み付けに必要な精度での部品の把持を確実に達成することができるような汎用ハンドの設計と、その把持戦略の計画を系統的に行うための基礎的な手法について述べたものである。

近年、我が国の製造業では、消費者ニーズの多様化や大量生産拠点の海外流出に伴い、変種変量生産への対応が求められている。かつて主流であった少品種大量生産に適したライン生産方式では、ロボットを活用することで生産性の向上が図られていたが、変種変量生産を行う場合には、需要変動に対する柔軟性や設備投資に要するコストといった観点からライン生産方式は最適な方法であるとは言えない。このため多くの企業では、ライン生産方式に代わる方法としてセル生産方式が採用されている。この方式は、製品の部品や工具を配置したセルと呼ばれる屋台において、ロボットに代わり一人あるいは少数の作業員が製品の組立作業における複数の工程、あるいは全ての工程を実施するものであり、品種の切り替えや生産量の調整を容易に行えるという長所がある。

しかし、少子高齢化による就業人口の減少や生産拠点の海外流出などによって、我が国の製造業は今後ますます厳しい局面を迎えることが予想される。こうした状況を打開しモノづくりの国内回帰を図るため、いくつかの企業では人による従来のセル生産方式からロボットによる次世代のセル生産方式、すなわちロボットセル生産システムへの移行を目指した研究・開発が盛んに行われている。人によるセル生産と同様に、ロボットセルではセル内の少数のロボットが製品の組立作業における複数の工程、あるいは全ての工程を担う。

セル内で行われる組立作業において、ロボットは多種多様な形状の部品を高精度で組み付ける必要があるため、現状の多くのロボットセルでは部品の初期位置・姿勢を専用のパーツフィータや治具、あるいは人によるパレタイジングによって予め一意に決めておいたり、部品特化型グリッパを用いて部品をセルフアライメントさせたりすることで組み付け精度を実現している。しかし、形状の異なる部品の数が多くなるにつれて必要となる専用装置の数や手間が多くなるため、コストの増大が懸念されている。

一方、こうしたアプローチを用いる代わりに視覚センサによって部品の位置・姿勢を認識する方法があるが、実際の部品の位置・姿勢にロボットの据付誤差や視覚センサのキャリブレーション誤差、計測誤差などが加わるため、視覚センサのみでの組み付け精度の実現は困難である、あるいは実現できるとしても例えば高価なセンサを使用したり画素数を増やしたりする必要があり、結果的にコストの増大につながる。このように、現状のロボットセル生産システムでは、組立作業を確実に行うためのコスト配分と部品の取り扱い方に代表される産業用ロボットの柔軟性、汎用性のなさが問題であり、これが人によるセル生産からロボットセル生産への移行を阻害する要因となっている。

こうした背景から、多種多様な形状の部品の初期位置・姿勢にある程度の不確実性があっても、部品の初期不確実性をロバストに吸収し、最終的に組み付けに必要な精度での部品の把持を確実に

達成することができるような汎用的なロボットハンドの開発と、その把持戦略の計画が求められている。これが実現されれば、たとえば多種多様な形状の部品のおおよその初期位置・姿勢は計測精度の低い安価な視覚センサを用いて認識し、組み付けに必要な精度は汎用ハンドの把持戦略によって実現するといったことが可能となり、システム全体のコストの低減が期待できる。

そこで本論文では、ロボットセル生産システムにおける組立作業において、多種多様な形状の部品の初期位置・姿勢にある程度の不確実性があっても部品の初期不確実性をロバストに吸収し、最終的に組み付けに必要な精度での部品の把持を確実に達成することができるような汎用ハンドの設計と、その把持戦略の計画を系統的に行うための基礎的な手法を構築する。

はじめに、第1章では本論文で行っている研究の背景ならびに従来研究について概説するとともに、本論文の目的、構成について述べる。

第2章では、組立作業を遂行することができる汎用ハンドを系統的に設計するための素地として、組立作業を行うために汎用ハンドに必要とされる機能・機構の明確化を行う。手段としては、いくつかの実際の製品を人がどのように組み立てるのかを仔細に観察し、その観察結果から人が手のどのような機能を用いて組立作業を行っているのかを見出す。そして、見出した機能を組立作業を行うために必要な汎用ハンドの機能であると位置づけ、それを汎用ハンドで実現させるために必要となる機構について議論する。さらに、汎用ハンドの機構の基本的な設計手法を提案し、具体例として実製品の組立作業を対象とした汎用ハンドの機構の設計例を示す。

第3章では、第2章における議論から見出された機構を有する汎用ハンドによって対象部品の初期位置・姿勢に対する不確実性、すなわち初期誤差を吸収する過渡現象、すなわちアライメントが行われるフェーズをハンドの複数の指による対象物体の「押し操作」と捉え、これを準静的に解析する。そして、その解析結果に基づき、ある与えられた把持戦略のもとで汎用ハンドの指を動かしたときに、対象物体がどのように動くのかをシミュレートするための把持シミュレーションについて述べる。また、把持シミュレーションを用いることで、与えられた把持戦略が吸収できる対象物体の初期誤差の範囲、すなわち許容初期誤差範囲を求める方法を示す。さらに、シミュレーションで求めた許容初期誤差範囲が実環境においても妥当であるかどうかを実機実験によって検証する。

第4章では、第3章において対象物体の運動が準静的であるとして無視していた物体の慣性やハンドの指との衝突といった動力学的な要素が、把持戦略のロバスト性にどのような影響を与えるのかについて考察する。具体的には、押し操作を対象物体の慣性、衝突を考慮して動力学的に解析し、その解析結果に基づく把持シミュレータを構築する。そして、この把持シミュレータを利用することで、把持戦略が吸収できる対象物体の初期不確実性の範囲を求める。さらに、これを準静的解析に基づく結果と比較することで把持戦略のロバスト性に対する動力学的要素の影響について考察するとともに、準静的解析の適用性について検証する。

第5章では、三次元形状を含む多形状部品の組立作業を実現できるようなロバストな把持戦略を計画するための手法を提案する。この手法では、多形状部品のロバスト把持を実現するため、アライメントから組み付けのための最終的な把持までを単一の把持戦略で行う1ステップ把持と、ある把持戦略でアライメントを行った後に持ち直しによって最終的な把持を行う2ステップ把持の概念を導入する。そして、具体例として立体パズルの組立作業をとりあげ、提案手法に基づいて計画したロバスト把持戦略が立体パズルの個々のピースの初期位置・姿勢の不確実性を吸収し、組立作業を遂行することができるかどうかを実機実験により検証する。

最後に、第6章において本論文で得られた成果を要約するとともに、今後の課題について述べる。

# 謝辞

本研究を実施する機会を与えて下さり、その成果獲得まで学部四回生の頃より六年間にわたって御指導下さいました神戸大学大学院工学研究科 横小路泰義教授に、心より御礼申し上げます。また、本論文の審査において主査を務めて下さいました京都大学大学院工学研究科 松野文俊教授、副査を務めて下さいました同研究科 榎木哲夫教授、泉田啓教授からは、有益な御意見・御助言を頂戴しました。謹んで感謝の意を表します。

三菱電機株式会社先端技術総合研究所の田中健一氏、野田哲男氏、奥田晴久氏、永谷達也氏、株式会社シーテックの長野陽氏には、研究型インターンシップでお世話になるとともに、本研究の遂行にあたって貴重な御意見を頂きました。厚く御礼申し上げます。

米 Carnegie Mellon University の Matthew T. Mason 教授からは、本論文の付録 A における証明について有益な御意見を頂きました。京都大学大学院工学研究科の木原康之氏には、本論文の 3.3.3 節の内容について、神戸大学大学院工学研究科の平岡隼一氏（現・京都大学大学院工学研究科）には、本論文の第 5 章の内容について、それぞれ貴重な御助言を頂きました。また、京都大学大学院技術専門職員の佐藤祐司先生からは、実験装置について御指導、御鞭撻を賜りました。さらに、京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻メカトロニクス研究室ならびに神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻複雑系機械工学研究室のメンバーの方々からは、各研究室における研究報告会において示唆に富む御意見、御指摘を頂戴致しました。ここに深謝の意を表します。

なお、本研究の成果の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務である「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」の一環として得られたものです。

最後に、博士課程へ進学する機会を与えてくれた両親や親戚、日頃より応援してくれた友人、そしてこれまでお世話になった全ての方々に心より感謝の意を表し、謝辞の結びとします。



# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 従来研究	3
1.2.1 汎用的なロボットハンド	3
1.2.2 対象物体の初期不確定性の吸収	4
1.3 本論文の目的	4
1.4 本論文の構成	5
<b>第 2 章 組立作業に必要な汎用ハンドの機能と機構</b>	<b>7</b>
2.1 緒言	7
2.2 問題設定	7
2.3 組立作業における人の手の機能解析	8
2.4 個々の手の機能を実現するハンド機構	10
2.4.1 ‘Grasp’を実現する機構	11
2.4.2 ‘Apply’を実現する機構	12
2.4.3 ‘Support’を実現する機構	13
2.5 汎用ハンドの機構	13
2.5.1 汎用ハンドの機構の設計方法	13
2.5.2 汎用ハンドの機構の設計例	14
2.6 結言	16
<b>第 3 章 準静的押し操作解析に基づく把持シミュレーションと許容初期誤差範囲の導出</b>	<b>19</b>
3.1 緒言	19
3.2 関連研究	20
3.3 押し操作の準静的解析	21
3.3.1 押し操作の問題設定	21
3.3.2 押し操作問題の定式化	22
3.3.3 押し操作問題の解法	24
3.4 把持シミュレーション	26
3.4.1 アルゴリズム	26
3.4.2 シミュレーションの具体例	29
3.5 対象物体の許容初期誤差範囲	33
3.5.1 円形物体の把持動作における許容誤差	33

3.5.2	長方形物体の把持動作における許容誤差	34
3.6	許容初期誤差範囲の実験的検証	36
3.6.1	実験装置	36
3.6.2	実験方法	36
3.6.3	実験結果	37
3.7	結言	38
<b>第4章</b>	<b>動学的押し操作解析に基づくロバスト把持戦略の考察</b>	<b>39</b>
4.1	緒言	39
4.2	関連研究	39
4.3	押し操作の動学的解析と把持シミュレーション	40
4.3.1	問題設定	40
4.3.2	指と対象物体が接触を保っている場合の定式化	41
4.3.3	指と対象物体が衝突する場合の定式化	42
4.3.4	動学的押し操作問題の解法	43
4.3.5	把持シミュレーション	44
4.4	把持戦略のロバスト性	46
4.4.1	問題設定	46
4.4.2	許容初期誤差範囲	47
4.4.3	動学的要素の影響	47
4.4.4	準静的解析の適用性	51
4.5	結言	52
<b>第5章</b>	<b>三次元形状を含む多形状物体の組立作業のためのロバスト把持戦略</b>	<b>55</b>
5.1	緒言	55
5.2	三次元形状部品のロバスト把持	56
5.2.1	アプローチ	56
5.2.2	三次元形状部品の把持戦略の解析	57
5.3	把持戦略の計画手法	57
5.3.1	把持戦略の計画手順	57
5.3.2	把持戦略のロバスト性の評価	58
5.4	具体例：立体パズルの組立作業のための把持戦略の計画	59
5.4.1	対象物体	59
5.4.2	把持戦略の計画	59
5.5	実機実験	63
5.5.1	実験装置	63
5.5.2	把持実験	63
5.5.3	組立実験	64
5.6	結言	67

<b>第 6 章 結論</b>	<b>69</b>
6.1 本論文のまとめ . . . . .	69
6.2 今後の課題 . . . . .	70
<b>付 録 A 準静的押し操作において対象物体の運動が並進/回転運動であるための条件</b>	<b>73</b>
A.1 物体の運動が並進運動のみであるための必要条件 . . . . .	73
A.2 物体の運動が並進運動のみであるための十分条件 . . . . .	74
A.3 物体の運動が回転運動であるための必要条件 . . . . .	77
A.4 物体の運動が回転運動であるための十分条件 . . . . .	77
<b>付 録 B 動力学的押し操作解析の定式化に関する補足式</b>	<b>79</b>



# 第1章

## 序論

### 1.1 背景

近年、我が国の製造業では、消費者ニーズの多様化や大量生産拠点の海外流出に伴い、変種変量生産への対応が求められている。かつて製造業においては少品種大量生産、すなわち長期間にわたり単一あるいは少品種の製品を大量に生産することが主流であり、これに適した方法として自動車の生産に代表されるようなライン生産方式が適用されていた。この方式では、ベルトコンベアなどを利用して製品の加工や組立を流れ作業で行うため、個々の工程においてはある特定の作業を繰り返し行えばよく、これを効率的に行う手段としてロボットが活用されてきた。

一方、変種変量生産を行う場合には、需要変動に対する柔軟性や設備投資に要するコストといった観点からそのようなライン生産方式は最適な方法であるとは言えない。このため多くの企業では、ライン生産方式に代わる方法として Fig. 1.1 に示すようなセル生産方式が採用されている。この方式では、製品の部品や工具を配置したセルと呼ばれる屋台において、ロボットに代わり一人あるいは少人数の作業員が製品の組立作業における複数の工程、あるいは全ての工程を実施する。ライン生産方式と異なり、セル生産方式では部品の入れ替えやセルでの作業順序の変更のみで多品種の製品の製造に対応することができ、また、生産量の調整をセル数の増減によって容易に行うことができるため、変種変量生産に適した生産方式となっている。

しかし、少子高齢化による就業人口の減少や生産拠点の海外流出などによって、我が国の製造業は今後ますます厳しい局面を迎えることが予想される。こうした状況を打開しモノづくりの国内回帰を図るため、いくつかの企業では人による従来のセル生産方式からロボットによる次世代のセル生産方式、すなわちロボットセル生産システムへの移行を目指した研究・開発が盛んに行われており [2]~[8]、中には既に自社工場に導入され実用化されているものも存在する。Fig. 1.2 にロボットセル生産システムの一例を示す。人によるセル生産と同様に、ロボットセルではセル内の少数のロボットが製品の組立作業における複数の工程、あるいは全ての工程を担う。

組立作業を遂行するためには、多種多様な形状を有する部品の位置・姿勢を組み付けに必要な精度で調整する必要がある。人間は手指のコンプライアンスを用いることでそのような調整を柔軟に行って組み付けを行うことができるが、通常、産業用ロボットは高い繰り返し精度のもと、高ゲインの位置制御で動作するため、組み付け作業時には毎回同じように部品を精確に把持する必要がある。このため、現状の多くのロボットセルでは個々の部品に専用のパーツフィーダや治具、あるいは人によるパレタイジングなどによって部品を予め整列させ、その初期位置・姿勢を一意に決め



Fig. 1.1 Human cell production system (Mitsubishi Electric Corp.) [1]



Fig. 1.2 Robotic cell production system (Mitsubishi Electric Corp.) [8]

ておいたり、個々の部品に特化したグリップを用いて部品をセルフアライメントさせたりすることで、組み付け精度を実現している。これは、産業用ロボットが持つ弱点のしわ寄せを周辺側で補完していると捉えることができる。しかし、こうした専用装置は一般に特注品であるため高価であり、このようなアプローチでは形状の異なる部品の数が多くなるにつれて必要となるパーツフィーダや治具、グリップの数も多くなるため、コストの増大が懸念されている。さらに、専用装置の数が増えると、セル内においてそれらを設置するためのスペースや作業中に使用しないグリップをストックしておくためのスペースの増大、グリップの交換時間によるタクトタイムの増加が助長されてしまうといった問題がある。また、人によるパレタイジングについても非常に手間がかかる作業であり、結果的にコストの増大につながる。

一方、専用装置を使用したりパレタイジングを行ったりしない場合には部品の初期位置・姿勢に不確実性があるため、組立作業を遂行するためにはこれを吸収する必要がある。専用治具や部品特

化型グリップを使用せずに不確定性に対処する方法としては、視覚センサによって部品の位置・姿勢を認識する方法がある。しかし、実際の部品の位置・姿勢に視覚センサのキャリブレーション誤差や計測誤差、あるいはロボットの据付誤差などが加わるため、視覚センサのみで組み付けに必要な精度を実現することは困難である、あるいは実現できたとしてもたとえば計測精度を高めるために高価なセンサを使用したり、センサから取得された画素数の多い情報を処理したりする必要があり、結果的にコストの増大につながる。このように、現状では多種多様な形状の部品の組み付け精度を実現するための適切なコスト配分を実現することが困難となっている。

以上のように、現状のロボットセル生産システムでは、組立作業を確実にを行うためのコスト配分と部品の取り扱い方に代表される産業用ロボットの柔軟性、汎用性のなさが問題であり、これが人によるセル生産からロボットセル生産への移行を阻害する要因となっている。こうした背景から、多種多様な形状の部品の初期位置・姿勢にある程度の不確定性があっても、部品の初期不確定性をロバストに吸収し、最終的に組み付けに必要な精度での部品の把持を確実に達成することができるような汎用的なロボットハンドの開発と、その把持戦略の計画が重要な課題となっている。これが実現されれば、たとえば個々の部品のおおよその初期位置・姿勢は計測精度の低い安価な視覚センサを用いて認識し、組み付けに必要な精度は汎用ハンドの把持戦略によって実現するといったことが可能となり、作業環境における不確定性に対する柔軟性と部品形状に対する汎用性を実現するとともに、ロボットセル生産システム全体のコストを低減することができると期待される。

## 1.2 従来研究

前節で述べたように、現状のロボットセル生産システムにおける重要課題として、多種多様な形状の部品の把持することができるような汎用的なロボットハンドの開発と、それら個々の部品の初期不確定性をロバストに吸収することができるような把持戦略の計画が挙げられる。これを踏まえ、本節では「汎用的なロボットハンド」ならびに「対象物体の初期不確定性の吸収」に関連した従来研究について概説するとともに、それらの問題点について順に述べる。

### 1.2.1 汎用的なロボットハンド

汎用的なロボットハンドの研究・開発はこれまでに数多く行われてきたが、その多くが人の手の外観を模擬したものであり [9]~[11]、ハンドの設計に際して目的とする作業が具体的に想定されていなかったり、作業を遂行するために必要な機能が考慮されていなかったりする。このため、これまでに開発されてきた汎用ハンドでは、人の手の運動自由度と同等の自由度を実現するために作業の実現には不必要な多数のアクチュエータが搭載されていたり、逆に作業を実現させるために必要となる自由度やハンドの機能が欠如していたりするという可能性がある。

一方、産業用途を目的として開発された汎用ハンドとしてたとえば BarrettHand (Barrett Technology)[12] が挙げられるが、市販製品であるものの非常に高価であるため現時点ではロボットセルに導入することは現実的であるとは言えない。また、BarrettHand は多形状物体を把持できるという汎用性は有しているが、本研究で想定しているような組み付け作業を遂行するのに十分な精度での部品の把持を行えるという保証はない。同じく産業用に開発されたものとして、ベース部分に部品特化型グリップを複数有する千手観音ハンドと呼ばれるものも存在する [5][13]。このハン

ドでは複数の異なる形状の部品を把持することができるが、専用グリップの使用を前提としているため、部品形状のバリエーションが多くなると必要となるハンドの数も多くなるという問題がある。

産業用途を目的とした汎用ハンドの設計・製作は産業界だけではなく、学术界でも試みられている。たとえば、Brownら[14]は対象部品の位置決めを行うためのモジュラーバイスを用いたフィクスチャ[15]を応用し、ある与えられた製品の自動組立を行うためのハンドとして計四本の円柱状の指の配置を最適化した平行グリップを論理的に設計するアルゴリズムを提案している。ただし、製品を構成する多形状部品を把持するためには指部分を取り外してその配置を変更すればよいとされているが、基本的には単一形状の部品の把持が想定されており、汎用性を有しているとは言い難い。これを踏まえ、Balanら[16]は計三本の円柱状の指により、与えられた多形状の対象物体を単一の機構で把持することができる汎用的な平行グリップの設計アルゴリズムを提案している。しかし、個々の対象物体の初期位置・姿勢は既知であると仮定しているため、本研究で想定しているように対象物体の初期位置・姿勢に不確定性がある場合には適用することができない。

### 1.2.2 対象物体の初期不確定性の吸収

把持対象物体の初期位置・姿勢の不確定性を吸収する方法として、対象物体の「押し操作」を利用した手法が提案されている[17]~[20]。押し操作とは対象物体を把持せずに操る「グラスプレス・マニピュレーション」[21]の一種であり、摩擦のある平面上で対象物体を押すことによって対象物体を操作することを指す。押し操作はたとえばロボットハンドの指を器用に動かすことによって物体を操作するような場合と比べて非常に容易なものであり、機構が簡易なマニピュレータでも十分実現可能であるという長所がある。

押し操作を利用した対象物体の初期不確定性の吸収に関する研究として、Brost[17]やGoldberg[18]は、平行グリップを用いて形状が既知の多角形物体の初期位置・姿勢に含まれる不確定性を吸収するアルゴリズムを提案している。また、Balordaら[19]は平行な二つの直線軌道上を動く二本の指を用いて、滑りを利用した二点接触により多角形物体の初期位置・姿勢の不確定性を吸収する方法を示している。多指ハンドを用いた研究として、Dogarら[20]は生活環境下で位置・姿勢が不確定な対象物体を多指ハンドで確実に把持するため、押し操作によって対象物体をハンドの中に引き込むことで不確定性を軽減させた後に把持を行う‘push-grasp’を提案し、想定される不確定性を吸収して把持を達成するためのハンドの動作計画を行っている。

多指ハンドの把持動作において対象物体の初期不確定性を吸収することができるかどうかを議論するためには、多点接触による押し操作の解析が必要となる。しかし、後の第3章3.2節でも詳しく述べるように、これまでに解析されている押し操作は主に一点接触[20]、あるいは二点接触[19]によるものであること、また、文献[17][18]で議論されている押し操作では多点接触が起こり得るが、平板や平行グリップに特化したものであることから、これらの手法を本研究で想定しているような汎用的な多指ハンドを用いた把持動作の解析に適用することができない。

## 1.3 本論文の目的

1.1節で述べた背景ならびに1.2節で述べた従来研究の問題点を踏まえ、本論文では、ロボットセル生産システムにおける組立作業において多種多様な形状の部品の初期位置・姿勢にある程度の

不確定性があっても、部品の初期不確定性をロバストに吸収し、最終的に組み付けに必要な精度での部品の把持を確実に達成することができるような汎用ハンドの設計と、その把持戦略の計画を系統的に行うための基礎的な手法の構築を目的とする。

組立作業を遂行できるような汎用ハンドを系統的に設計するためには、組立作業に必要となるハンドの機能や機構を明確化する必要がある。そして、明確化した機能・機構に基づいて、ある与えられた製品の組立作業を行うための汎用ハンドを設計するための枠組みを構築する必要がある。これらを実現することができれば、ハンド設計者が汎用ハンドの設計・試作・検証を試行錯誤的に繰り返すことなく、必要最小限の機能を備え、組立作業を確実に遂行することができるようなハンドを系統的に設計することが可能となり、ハンドの設計・製作に要するコストも低減させることができると期待される。ただし、本論文において議論の対象とする汎用ハンドとは、1.2.1節で述べた人型の汎用ハンドのように把持対象物体を予め想定しないものではなく、把持対象物体としてある与えられた製品を構成する多形状の部品を想定し、それらに対する汎用性を有しているものとすることに注意されたい。

また、部品の初期位置・姿勢の不確定性を汎用ハンドによってロバストに吸収できるような把持戦略を計画するためには、ハンドの指の動き、すなわち把持戦略と、それによって吸収することができる部品の初期不確定性、つまりロバスト性との関係を明らかにする必要がある。そのためには、ハンドの個々の指のある動かし方、すなわち把持戦略を用いた際の把持動作の過程において、対象物体がどのような運動を行うのかをシミュレートし、組み付けを行うための最終的な把持を確実に達成することができるかどうかを検証することができるような手法を構築する必要がある。これを実現することができれば、把持戦略を様々に変化させてシミュレーションを行うことで、実際の組立作業において想定される部品の初期不確定性を確実に吸収することができるようなロバスト性を有する把持戦略を、系統的に計画することが可能になると期待される。

さらに、上述のようなアプローチに基づいて設計・計画した汎用ハンドならびに把持戦略によって、多種多様な形状の部品の初期位置・姿勢にある程度の不確定性があっても目的とする組立作業を遂行することができることを示すためには、把持戦略のロバスト性の検証に留まらず、実際の製品と汎用ハンドを用いた組立作業を行うことによって、組立作業における汎用ハンドならびに把持戦略の有効性を検証する必要がある。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。はじめに、第2章では組立作業を遂行することができる汎用ハンドを系統的に設計するための素地として、組立作業を行うために汎用ハンドに必要とされる機能・機構の明確化を行う。手段としては、いくつかの実際の製品を人がどのように組み立てるのかを仔細に観察し、その観察結果から人が手のどのような機能を用いて組立作業を行っているのかを見出す。そして、見出した機能を組立作業を行うために必要な汎用ハンドの機能であると位置づけ、それを汎用ハンドで実現させるために必要となる機構について議論する。さらに、汎用ハンドの機構を系統的に設計するための基本的な設計手法を提案し、具体例として実製品の組立作業を対象とした汎用ハンドの機構の設計例を示す。

第3章では、第2章における議論から見出された機構を有する汎用ハンドによってある与えられた把持戦略のもとでの対象物体の運動をシミュレートする手法を構築する。具体的には、対象部

品の初期位置・姿勢に対する不確定性，すなわち初期誤差を吸収するアライメントのフェーズを作業台面上におけるハンドの複数の指による対象物体の「押し操作」と捉え，これを二次元問題として準静的に解析する．そして，その解析結果に基づき，ある与えられた把持戦略のもとで汎用ハンドの指を動かしたときに，対象物体がどのような運動を行うのかをシミュレートするための把持シミュレータを構築する．また，この把持シミュレータを用いることで，与えられた把持戦略が吸収できる対象物体の初期誤差の範囲，すなわち許容初期誤差範囲を求める方法を示す．さらに，シミュレーションで求めた許容初期誤差範囲が実環境においても妥当であるかどうかを実機実験によって検証する．

第4章では，第3章において対象物体の運動が準静的であるとして無視していた物体の慣性やハンドの指との衝突といった動力的な要素が，把持戦略のロバスト性にどのような影響を与えるのかについて考察する．具体的には，押し操作を対象物体の慣性，衝突を考慮して二次元問題として動力的に解析し，その解析結果に基づいて動力的把持シミュレータを構築する．そして，この把持シミュレータを利用することで，把持戦略が吸収できる対象物体の初期不確定性の範囲を求める．さらに，これを準静的解析に基づく結果と比較することで把持戦略のロバスト性に対する動力的要素の影響について考察するとともに，準静的解析の適用性について検証する．

第5章では，実製品に多くみられる二次元的な形状をもつ部品だけではなく，三次元的な形状をもつ部品を含めた多形状部品の組立作業を実現できるようなロバストな把持戦略を計画するための手法を提案する．はじめに，三次元形状部品をロバストに把持するための方法と解析手法を示す．そして，それらに基づいて組立作業を遂行することができるような把持戦略を計画するための手法を提案する．さらに，具体例として立体パズルの組立作業をとりあげ，提案手法に基づいて計画したロバスト把持戦略が立体パズルの個々のピースの初期位置・姿勢の不確定性を吸収し，組立作業を遂行することができるかどうかを実機実験により検証する．

最後に，第6章において本論文で得られた成果を要約するとともに，今後の課題について述べる．

## 第2章

# 組立作業に必要な汎用ハンドの機能と機構

### 2.1 緒言

本章では、組立作業を遂行できるような汎用ハンドを設計するための素地として、組立作業を行うために必要となる汎用ハンドの機能とそれを実現するための機構について述べる。

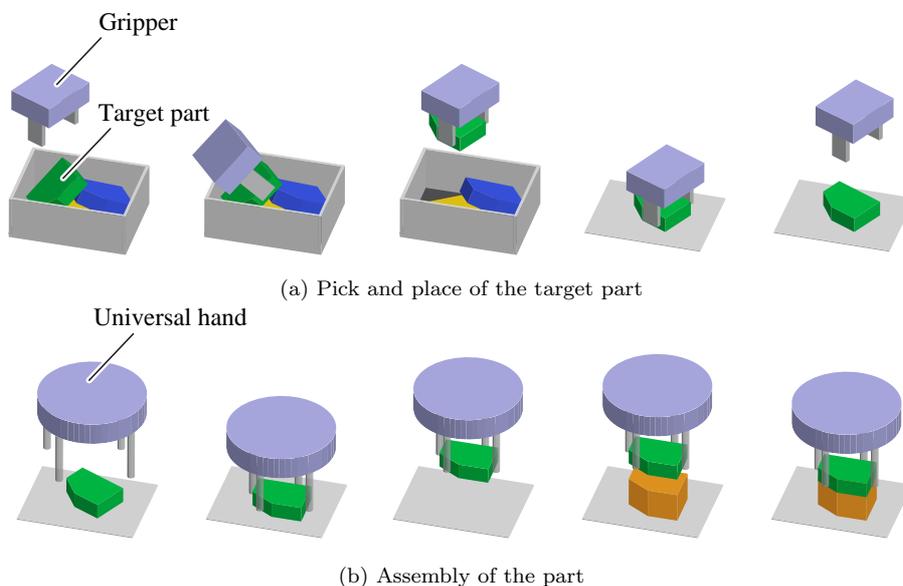
従来、製造業における多くの製品の組立作業は人の手によって行われてきたが、これはすなわち人の手には組立作業を遂行するのに必要な機能が備わっているということを示している。汎用ハンドによって組立作業を実現するためには、人の手の外観に拘泥するのではなく、人の手が組立作業において利用している機能を汎用ハンドに実装すればよいと考えられる。そのためには、組立作業において人の手がどのような機能を用いているのかを明確にする必要がある。これが明らかになれば、それを実現することのできる機構を考案することで、組立作業を行うにあたって機能および機構的に過不足のない汎用ハンドが設計しやすくなると期待される。また、従来の部品特化型グリッパの設計・製作のようにハンド設計者が汎用ハンドの設計・試作・検証を試行錯誤的に繰り返すことなく、汎用ハンドを系統的なアプローチで設計することが可能になり、ハンドの設計・製作に要するコストを低減させることができると考えられる。

以下では、はじめに 2.2 節で本論文で取り扱う組立作業についての問題設定を行う。次に、2.3 節で組立作業における人の手の機能解析を行い、組立作業を行うために必要となる手の機能を見出す。続く 2.4 節では 2.3 節で見出した手の機能を実現するための汎用ハンドの機構について議論し、2.5 節で汎用ハンドの機構の設計手法について述べる。最後に、2.6 節で結言を述べる。

### 2.2 問題設定

本節では、次節以降で行う汎用ハンドの機構についての議論に先立ち、本論文で取り扱う組立作業についての問題設定を行う。

人によるセル生産では、通常セル内の作業員が予めトレイに置かれた部品や部品箱にバラ積みされた部品を適宜取り出し、組み付け作業を行う。トレイや部品箱から部品を取り出した際には、必ずしも組み付けに適した把持形態で把持しているとは限らない。このような場合、人であれば手指を器用に動かすことにより把持形態を所望のものに変更することができるが、ロボットハンドで同様のことを実現させようとすると、ハンドに必要な自由度、アクチュエータ数が増加してコストが増大したり、器用な操りを行うための制御が非常に複雑になる可能性がある。これに対して、



**Fig. 2.1** Sequence of handling a part in an assembly task assumed in the thesis

野田ら [22] は平行グリッパを用いてトレイや部品箱から取り出した部品を作業台上に一度仮置きし、それから最終的な把持形態で部品を掴み直すという方法を提案している。ただし、トレイや部品箱内の部品、ならびに仮置きした部品の位置・姿勢は視覚センサによって認識している。

本論文では、文献 [22] と同様にトレイや部品箱から取り出した部品を一度仮置きしてから掴み直すという Fig.2.1 に示すようなアプローチを想定し、同図 (b) に示すような仮置きされた部品を掴み直してから組み付け作業を行うまでの部分に焦点を当てて議論する。なお、部品の取り出し・仮置きについては、Fig.2.1 (a) に示すように組み付け作業を行うための汎用ハンドとは別にトレイや部品箱から部品を取り出しやすいようなグリッパ [22] を使用することを想定しているが、コストの観点から将来的には部品の取り出し・仮置きも汎用ハンドによって行えるようにすることが望まれる。これについては、本論文では今後の課題とする。

また、仮置きした部品はその形状や重心から定まる安定姿勢をとっており、部品を掴み直す際には直ちに最終的な把持形態で部品を把持することができる場合もあれば、安定姿勢によってはそれが実現できない場合もある。後者の場合には、たとえば最終的な把持を行いやすいように別の安定姿勢で部品を置き直したり、文献 [22] で行われているように複数のロボットによって部品の持ち替えを行ったりする必要がある。このような場合については現在別途研究を行っているが、本論文においては仮置きされた部品を別の安定姿勢で置き直したり持ち替えを行ったりする必要がない場合を扱うこととする。

## 2.3 組立作業における人の手の機能解析

本節では、組立作業の遂行に必要とされる汎用ハンドの機能・機構を明確化するため、人の手による組立作業を仔細に観察し、その観察結果から人が手のどのような機能を用いて組立作業を行っているのかを見出す。

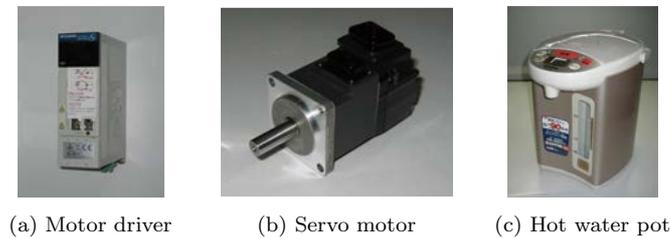


Fig. 2.2 Target products

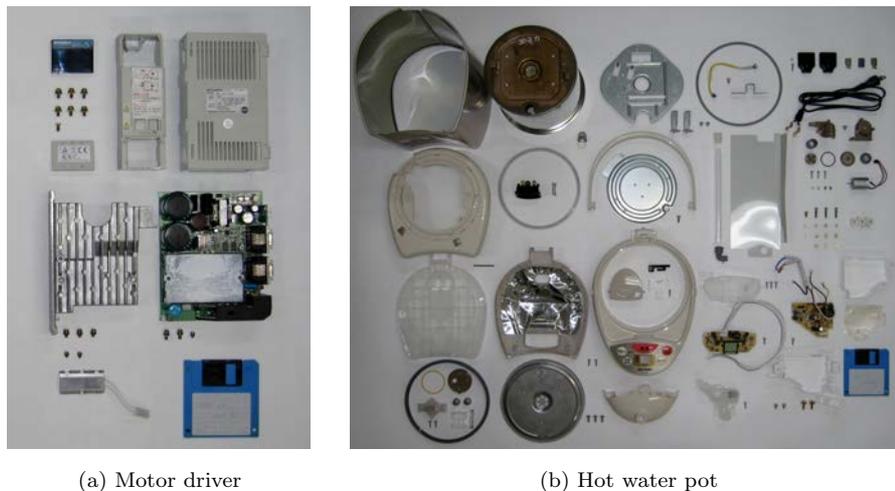


Fig. 2.3 Parts of the target products

ここでは、議論が抽象的になったり逆にある特定の製品に特化したものとなったりしないよう、実際に市販されている複数の製品を対象とする。具体的には、Fig. 2.2 に示す (a) モータドライバ (三菱電機, MR-J2S-20B), (b) サーボモータ (三菱電機, HF-KP053), (c) 電気ポット (象印マホービン, CD-WB30-CT) を対象とする。なお、モータドライバと電気ポットについては、その構成部品を Fig. 2.3 (a), (b) にそれぞれ示している。これらの製品の組立作業を Fig. 2.4 に示すように人の手で行い、その様子を観察した。その結果、組立作業に必要な人の手の機能を ‘Grasp’, ‘Apply’, ‘Support’ の三つに分類した。それぞれの機能の定義は次の通りである。

**定義 1** ‘Grasp’ は、対象物体に働く重力や慣性力に拮抗する力・モーメントを加えることにより、対象物体の運動を拘束することとする。

**定義 2** ‘Apply’ は、対象物体に力・モーメント (主に外力・外モーメント) を加えることによって、対象物体に運動を与える、あるいは対象物体を変形させることとする。

**定義 3** ‘Support’ は、‘Apply’ により対象物体に作用する力・モーメントに拮抗する力・モーメントを加えることにより、対象物体の運動を拘束することとする。

‘Grasp’ は、部品の運搬や組み付け作業時に部品を把持するために用いられる。‘Apply’ は、主としてある部品を他の部品に組み付ける際に用いられる。ただし、ゴムキャップの嵌め込み作業の

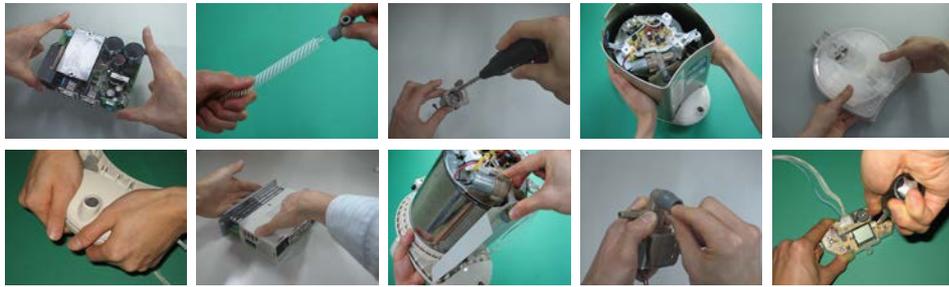


Fig. 2.4 Observation of the assembly process by human hands

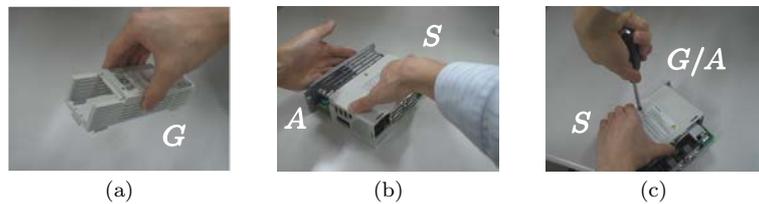


Fig. 2.5 Human hand functions in an assembly task

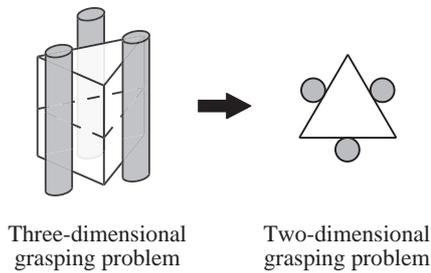
ように、物体を変形させるために内力に相当する力を加えることも‘Apply’とする。‘Support’は、組み付け作業時に組み付けられる側の部品を支持するために用いられる。

Fig. 2.5 に組立作業におけるこれらの機能の実例を示す。なお、図中では便宜上‘Grasp’、‘Apply’、‘Support’をそれぞれ  $G$ 、 $A$ 、 $S$  と略記している。Fig. 2.5 (a) では、手は作業台上に置かれた部品を掴み上げて運搬しており、 $G$  が用いられている。Fig. 2.5 (b) では、一方の部品を右手で支持された他方の部品に左手で押し込む組み付け作業を行っており、左手では  $A$ 、右手では  $S$  がそれぞれ用いられている。これら三つの機能は必ずしも単独で用いられるものではなく、いくつかの機能が同時に用いられることもある。たとえば Fig. 2.5 (c) では左手で支持した部品にドライバーを用いてネジを締結しており、右手はドライバーを把持すると同時にネジ締結に必要なトルクをドライバーに与えている。すなわち、左手では  $S$  が用いられているが、右手では  $G$ 、 $A$  が同時に用いられている。以下では、このような場合は  $G/A$  と表すこととする。

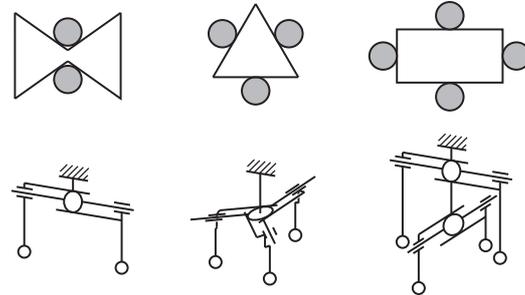
これらの三つの機能は人の手が組立作業を遂行するために用いている機能であるが、これらをロボットハンドで実現することができれば、ロボットハンドによる組立作業の遂行も可能になると期待される。次節では、これらの機能を組立作業を行うために汎用ハンドに必要とされる機能であるとして、個々の機能を実現するための機構について議論する。

## 2.4 個々の手の機能を実現するハンド機構

本節では、前節で述べた組立作業に必要な手の機能‘Grasp’、‘Apply’、‘Support’について、個々の機能を実現するためのハンドの機構について順に述べる。なお、汎用ハンドとしての機構については次節で述べる。



**Fig. 2.6** Conversion of a three-dimensional grasping problem into a two-dimensional one



**Fig. 2.7** Example mechanisms for 'Grasp'

### 2.4.1 'Grasp' を実現する機構

'Grasp' を実現するための機構は、対象とする部品を把持することが可能なものである必要がある。一般に、対象物体を把持するための拘束方法は force closure[23] と form closure[24] の二つに大別される。前者は摩擦あり接触を前提として指先力により外力とのバランスをとる方法であるのに対し、後者は摩擦なし接触を前提として対象物体を指先力によらず幾何的に拘束する方法である。

Form closure は幾何的な拘束であるため、これによって部品を把持した場合には原理的に汎用ハンドの指の位置・姿勢から部品の位置・姿勢の情報を得ることができる。一方、force closure では部品の位置・姿勢はハンドの指の位置・姿勢の情報からだけでは不確定であり、視覚センサなどの外界センサを用いなければ認識することができない。また、form closure ではハンドの指と部品が摩擦なし接触するため指と部品との間の滑りを利用することが可能であり、したがって部品の初期位置・姿勢の不確定性を吸収するのに有利であると期待される。これに対し、force closure では指と部品との間の摩擦によって初期不確定性の吸収が達成されない可能性がある。

こうした理由から、本研究では 'Grasp' を実現するための対象物体の拘束方法として form closure を適用する。なお、対象物体が柔軟物である場合には原理的に form closure によって対象物体を拘束することができないが、実際の製品の部品の大多数が剛体とみなせるものであり、またケーブルなどの柔軟物を扱う場合でも通常はケーブルの先端に取り付けられたコネクタ部分を把持するため、本論文では剛体として扱えるもののみを把持対象物体とする。

組立作業で扱われる実製品の部品の多くは、基準面に対して複数の鉛直な側面を有している。実際、Fig. 2.2 に示した三つの製品では、ボルト・ナット以外の部品についてモータドライバで七点中六点、サーボモータで十六点中十点、電気ポットで五十九点中四十九点の部品が複数の鉛直な側面を有していることが観察された。このような形状を有する部品のうち最も単純なものとして、Fig. 2.6 に示すような柱状部品が挙げられる。柱状物体を把持するためのハンドの指の形状としては、たとえば Fig. 2.6 に示すような柱状の指が挙げられる。ただし、部品形状に対する汎用性を考慮すると、柱状の中でも円柱状の指が適していると考えられる。円柱状の指を用いると個々の部品を把持する際の指の向きに留意する必要がなく、したがってハンドの自由度や制御をより簡単なものにすることができると期待される。

このような円柱状の指による柱状部品の把持は Fig. 2.6 に示すように二次元問題に簡略化して扱

うことができる。二次元において form closure を実現するためには、基本的に四つの接触点が必要である [24][25]。ただし、文献 [24][25] における form closure は 1st-order form closure [26] と呼ばれるもので、対象物体の形状に関する情報として接触点における対象物体の輪郭の接線あるいは法線のみが考慮されている。このため、1st-order form closure の理論の範疇では form closure の実現性を判断することができない物体形状が存在する。これに対し、Rimon ら [26] は対象物体の輪郭の曲率まで考慮した 2nd-order form closure を提案しており、これによって 1st-order form closure で扱えない形状の対象物体についても議論することができる。さらに、文献 [26] では対象物体の形状によっては接触点が三つ以下であっても form closure を実現することが可能であることが示されている。なお、対象物体が円形である場合には、並進運動の自由度を拘束することは可能であるが、円の中心を通る鉛直軸回りの回転運動の自由度は摩擦なし接触によって拘束することができないため、結果的に form closure を実現することができないことに注意されたい。

実際の把持は三次元的なものであるため、二次元の form closure では部品を三次元的に完全に拘束することはできない。具体的には、Fig. 2.6 において部品に指の長さ方向の外力が加わった場合、二次元の form closure では部品の運動を拘束することができない。しかし、指の長さ方向には部品と指とが摩擦なし接触をする必要はなく、むしろ十分な摩擦を発揮することができるようにすればよい。こうすることで、指の長さ方向の外力に拮抗する摩擦力を発生させることが可能となり、二次元の form closure と合わせて部品を三次元的に拘束することができる。ただし、摩擦なし接触は理想的な条件であり、実環境においてこれを実現することは困難である。そのため、実際の汎用ハンドの指としては、摩擦なし接触と等価とみなせるような機構としてたとえばベアリングによって円柱指が受動的に回転できるようなものを想定する。このような機構を有する指は後の第3章 3.6 節ならびに第5章 5.5 節における実験用ロボットハンドに実装されている。

‘Grasp’ を実現するためのハンドの機構の例を Fig. 2.7 に示す。図中の上段は対象物体を把持した状態における物体とハンドの指の断面形状を示しており、下段はこれを実現するためのハンドの機構を模式図によって表している。ここで、いずれの場合においても対象物体は二次元の form closure によって拘束されていることに注意されたい。

### 2.4.2 ‘Apply’ を実現する機構

‘Apply’ を実現するための機構は、対象物体に目的とする方向の力およびモーメントを加えることができるものであればよい。

対象物体に対してある一方向の力あるいはモーメントを加える場合には、ハンドが取り付けられたロボットマニピュレータの自由度を利用すればよく、ハンド自体に自由度を付加する必要はない。たとえばボルトの締結作業においてボルトにモーメントを加える場合には、ロボットマニピュレータの自由度を利用してハンドを回転させることができるため、ハンド自体に回転運動を行うための自由度は必要ではなく、ボルトにモーメントを加えるための指があればそれで十分である。これに対して、たとえばゴムキャップの嵌め込み作業のように対象部品を変形させるために異なる二つ以上の方向に力あるいはモーメントを加える場合には、そのための自由度をハンド自体に付加する必要がある。

‘Apply’ を実現するための機構の例を Fig. 2.8 に示す。図中の上段は対象物体に力あるいはモーメントを加えている状態を示しており、下段はこれを実現するためのハンドの機構を模式図によ

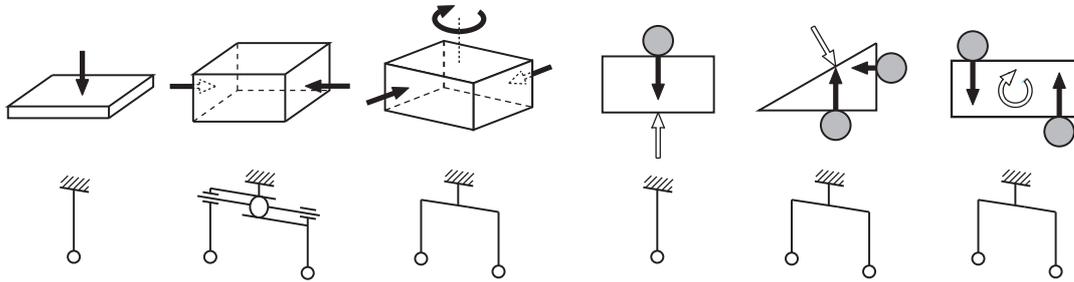


Fig. 2.8 Example mechanisms for 'Apply'      Fig. 2.9 Example mechanisms for 'Support'

て表している。ただし、図中の上段における黒矢印は 'Apply' によって対象物体に加わる力・モーメントを表している。

### 2.4.3 'Support' を実現する機構

'Support' は 'Apply' に対して対象物体を拘束することであるが、この場合にも 'Grasp' と同様に指先力に依らない幾何的な拘束が有用であると考えられる。ただし、'Grasp' では対象物体の運動自由度を完全に拘束しているが、'Support' では 'Apply' によって対象物体に加えられる力およびモーメントの方向の運動自由度のみを拘束すればよい。

'Support' を実現するための機構の例を Fig. 2.9 に示す。図中の上段は 'Apply' に拮抗する力を加えて対象物体を拘束している状態を示しており、下段はこれを実現するためのハンドの機構の例を模式図によって表している。ただし、図中の上段における白矢印は 'Apply' による力・モーメント、黒矢印はそれらに拮抗する 'Support' による力を表している。

## 2.5 汎用ハンドの機構

前節では個々の手の機能を実現する機構について述べたが、組立作業に必要な機能全てを有する汎用ハンドの機構としては、そのような個々の機能を実現するための機構を組み合わせたものすればよい。本節では、このようなアプローチに基づいて汎用ハンドの機構を系統的に設計するための方法を提案する。また、汎用ハンドの機構の具体例として、実製品の組立作業を対象とした汎用ハンドの機構を提案手法により設計する。

### 2.5.1 汎用ハンドの機構の設計方法

組立作業を遂行するための汎用ハンドの機構を設計する方法として、Fig. 2.10 に示すような手順による設計手法を提案する。個々の手順についての詳細を以下に述べる。

初めに、製品の組立作業を個々の部品の組み付け作業に分解し、作業工程を計画する。次に、個々の工程について 2.3 節で定義した手の機能、すなわち 'Grasp', 'Apply', 'Support' のうちの機能が必要であるかを明確にし、それを実現するための機構を求める。そして、個々の機構を全工程

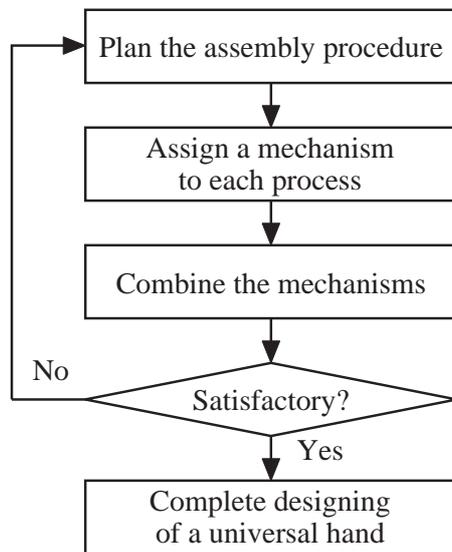


Fig. 2.10 Procedure of designing a universal robotic hand

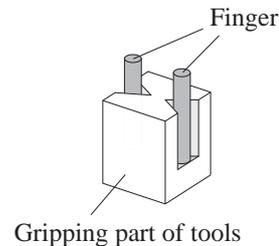


Fig. 2.11 Assumed shape of the grasping part of the tools

に渡って集約し、最終的に得られた機構を汎用ハンドの機構とする。ただし、集約に際しては必ずしも無理に一つの汎用ハンドに個々の機構を集約する必要はなく、場合によっては複数の汎用ハンドを用いた方がよいこともあり得ると考えられる。たとえば、人が両手を協調させて行っている組み付け作業を無理に一つの汎用ハンドで実現しようとする、汎用ハンドの機構が非常に複雑になる可能性がある。したがって、最終的に必要となるハンドの数や機構の複雑さなどの観点から集約結果が適切なものであるかどうかを吟味し、その結果適切であると判断された場合には設計を終了する。また、そうでない場合には集約結果が適切なものとなるまで以上の手順を繰り返す。

次節では、実製品の組立作業を対象として、以上の設計手順に従った汎用ハンドの設計例を示す。

## 2.5.2 汎用ハンドの機構の設計例

2.5.1 節で述べた方法による汎用ハンドの機構の設計例として、2.3 節で示したモータドライバの組立作業を行うための汎用ハンドの設計を行う。なお、ボルトの摘み取りおよび締結は専用の工具を用いて行うこととし、簡単のため、工具の把持部は Fig. 2.11 に示すように二本の円柱指で把持することが可能で、かつボルト締結の際に摩擦に頼らず確実に鉛直方向に力を加えることができるような形状を有しているとする。

Fig. 2.12 に組立作業工程の計画例を示す。なお、Fig. 2.12 では参考のため、個々の工程に必要な後述のハンドの模型を使用している。個々の工程の作業内容は、(1), (6), (9), (12), (17), (21), (23) は部品の把持および運搬、(3)~(5), (7), (8), (14)~(16) はボルトの締結作業、(10), (13), (18)~(20), (22), (24) は部品の組み付け作業である。

工程 (1) の基板は作業台上の治具に嵌め込まれ、工程 (10) までその状態で組立作業が行われるとする。基板をハンドで把持し続けることを想定した場合、ハンドの指と部品との干渉を避けた

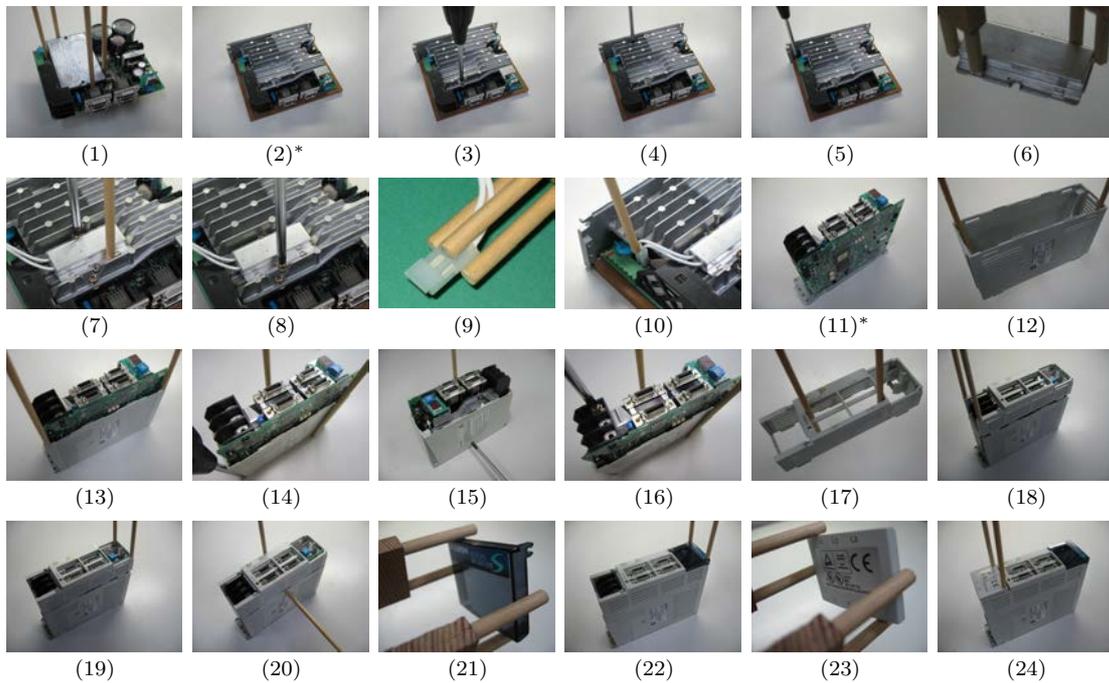


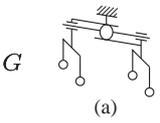
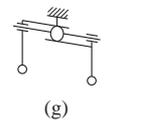
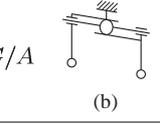
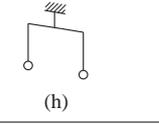
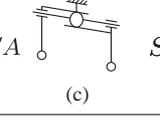
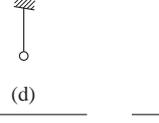
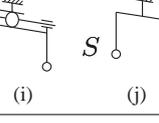
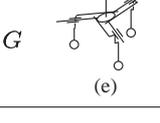
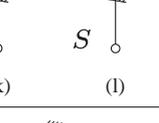
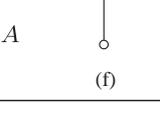
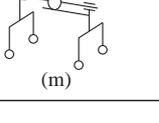
Fig. 2.12 Planning of assembly (\* excluded task)

り、‘Support’を実現するための指の配置を工夫する必要があるため、ハンドの機構が基板に特化したものになってしまう．そのような機構は汎用ハンドの機構としては適さないため、ここでは治具を用いることとしている．また、工程 (2) は工程 (1) の基板にヒートシンクを組み付ける作業、工程 (11) は治具より基板を取り出して鉛直方向に置く作業であるが、ヒートシンクの形状が非常に複雑であるため、二次元的な form closure による把持を実現することができない．ここでは、このような複雑な形状の部品についてはたとえば特化型のハンドを使用することとして議論の対象から除外する．

対象とするモータドライバの組立作業工程を計画し、個々の工程に必要な機能、そしてそれを実現するための機構を検討すると、Table 2.1 に示すような機構が見出される．Table 2.1 中の番号は Fig. 2.12 における工程番号に対応しており、個々の工程に必要な機能とそれを実現するための機構を併せて示している．なお、異なる工程であってもそれを遂行するために必要な機能・機構が同じである場合は、同一の欄にまとめて示している．ただし、Table 2.1 中の (a) の機構は、工程 (1)、(6) において同じ  $G$  の機能が用いられているが、指同士の間隔および直動軸からのずれの角度が (1) と (6) とでは異なる．同様に、Table 2.1 中の (h) の機構は、工程 (13) と (18)、(19)、(22)、(24) とでは同じ  $A$  の機能が用いられているが、二本の指の間隔が異なる．

以上の工程を全て遂行することができるような汎用ハンドの機構を求めするため、個々の機構の集約を行う．集約結果としては、たとえば Fig. 2.13 (a) に示すように、Table 2.1 の (d)、(j)、(l) を集約した  $S$  の機能を実現するハンド 1 ならびにその他の機構を集約した  $G$ 、 $A$  の機能を実現するハンド 2 の合計二つのハンドを用いるという解が考えられる．別の解としては、Fig. 2.13 (b) に示すようにこれら二つの機構をさらに一つに集約した機構や、Fig. 2.13 (c) に示すように逆に集約の

Table 2.1 Hand function and mechanism assigned to each process of the assembly task

Process	Functions and mechanisms	Process	Functions and mechanisms
(1), (6)	$G$  (a)	(12), (17)	$G$  (g)
(3), (4), (5), (8)	$G/A$  (b)	(13), (18), (19), (22), (24)	$A$  (h)
(7), (15)	$G/A$  (c) $S$  (d)	(14), (16)	$G/A$  (i) $S$  (j)
(9)	$G$  (e)	(20)	$A$  (k) $S$  (l)
(10)	$A$  (f)	(21), (23)	$G$  (m)

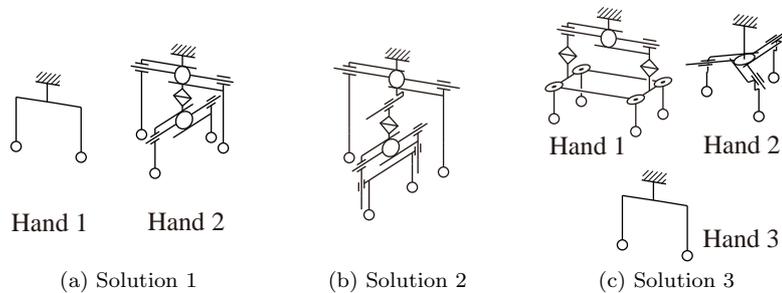


Fig. 2.13 Combined mechanisms

程度を緩和した三つの機構などが考えられる。しかし、ハンドの機構の複雑さやハンド数、ハンドの交換回数などの観点から、ここでは Fig. 2.13 (a) の集約結果が適切であると判断し、最終的にこれら二つの機構をモータドライバの組立作業に必要な汎用ハンドの機構とする。

## 2.6 結言

本章では、組立作業を遂行するために汎用ハンドに必要とされる機能・機構の明確化を行った。はじめに、モータドライバ、サーボモータ、電気ポットといった実際の製品を人がどのように組み立てるのかを仔細に観察し、その観察結果から人が組立作業を行っているときに用いている手の機

能が‘Grasp’，‘Apply’，‘Support’の三種類に大別されることを見出した。そして、これらの機能を組立作業を行うために汎用ハンドにも必要とされる機能であると位置づけ、個々の機能を実現させるために必要となるハンドの機構について議論した。特に、‘Grasp’については幾何的な拘束であり把持した際の部品の位置・姿勢が一意に定まる form closure を適用し、多種多様な形状の部品を二次元的な form closure によって把持するために円柱状の指を用いることとした。また、ある与えられた製品の組立作業を遂行するための汎用ハンドの機構を系統的に設計する手法として、組立作業の個々の工程に必要な機構を最終的に集約することによって汎用ハンドの機構を設計するという手法を提案し、具体例としてモータドライバの組立作業を行うための汎用ハンドの機構を提案手法に則って設計した。

今後の課題として、本章で提案した手法を用いて設計した汎用ハンドを実際に製作し、さらにそれを用いて実製品の組立作業を遂行することができるかどうかを実機実験によって確かめる必要がある。また、‘Grasp’，‘Apply’，‘Support’のそれぞれの機能を実現する機構について力学的な解析を行い、個々の部品の把持や組み付け作業を安定して行うことができるかどうかを検証する必要がある。

なお、本章で述べた汎用ハンドの設計手法では、ハンドの個々の指が form closure を実現するための最終的な把持位置に至るまでの指の動き、すなわち把持戦略については考慮していない。したがって、部品の初期位置・姿勢に不確実性がある場合でも組立作業を確実に達成することができるような汎用ハンドを設計するには、汎用ハンドが部品の初期不確実性を吸収した上で最終的に form closure を実現することができるかどうかを調べる必要がある。次章では、本章における議論から得られた円柱状の指を有するハンドを用いて、初期位置・姿勢に不確実性のある部品をロボストに把持するための把持戦略について議論する。



## 第3章

# 準静的押し操作解析に基づく 把持シミュレーションと 許容初期誤差範囲の導出

### 3.1 緒言

本章では、前章で述べたような円柱状の指を持つ汎用ハンドを用いて、初期位置・姿勢に不確定性のある部品をロボストに把持するための把持戦略について議論する。

作業台上に置かれた初期位置・姿勢に不確定性のある部品の把持動作は、Fig. 5.1 に示すように部品に対してそれを把持することが可能となるまで順次ハンドの指との接触点を増やしていくフェーズと、部品を把持して持ち上げるフェーズとに分けることができる。本研究では、前者のフェーズにおいて部品の位置・姿勢の不確定性を吸収し、部品のアライメントを行う、すなわち部品を目的とする一意の位置・姿勢に追い込むというアプローチを想定している。多種多様な対象部品をロボストに把持することができるような汎用ハンドのための把持戦略を計画するためには、アライメントを行うフェーズにおいてハンドによる個々の部品の把持動作をシミュレートし、把持戦略によって吸収できる対象部品の初期不確定性を評価する必要がある。

個々の部品に対してアライメントを行うフェーズは、作業台面上における対象物体の押し操作とみなすことができる。押し操作に関してこれまでに行われてきた研究の多くは、物体の動きは準静的である、すなわち対象物体に働く慣性力の大きさは対象物体が置かれた床面から働く摩擦力の大きさに比べて無視できる、と仮定している。現実的には、タクトタイムを短縮するためにむやみにハンドの指の動作速度を大きくすると部品の慣性やハンドの指との衝突といった動力学的な要素の影響が大きくなり、部品の挙動が不安定なものとなって結果的にアライメントが失敗しやすくなる可能性がある。一方、ハンドの指の動作速度がある程度小さいものであっても、常にアライメントを確実に達成することが可能で、その結果タクトタイムを安定にできるのであれば、その方が望ましいと考えられる。また、第2章では円柱状の指による柱状部品の把持を想定し把持を二次元問題に簡略化して議論したが、そのような把持を行う際のアライメントについても同様に二次元問題として扱うことができる。

したがって、本章では多指ハンドによる任意形状の二次元物体を対象とした押し操作を準静的に解析し、この解析結果に基づいて把持シミュレーションを行うための手法を提案する。また、この手法を用いて、ある把持戦略を与えるとそれによって許容できる対象物体の初期不確定性、すなわ

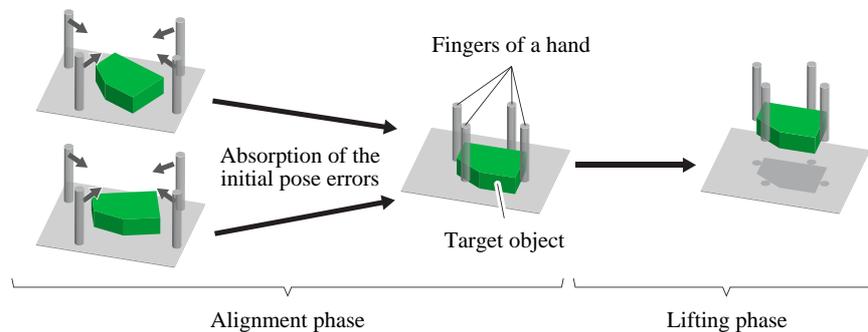


Fig. 3.1 Robust grasping of a target object

ち許容初期誤差の範囲が得られることを示す。さらに、実際に製作したロボットハンドを用いて対象物体の把持実験を行い、理論的に導出した許容初期誤差の実環境における妥当性を検証する。

## 3.2 関連研究

押し操作に関する研究として、MacMillan[27]は摩擦のある平面上での物体の滑り動作を解析し、摩擦中心 (center of friction, COF) の概念を導入した。Mason[28]は一点接触による押し操作を解析し、対象物体を押す力と摩擦中心、および対象物体の運動の関係を導出した。吉川ら [29]は摩擦力分布が未知の物体を対象として一点接触による押し操作を行うことにより、対象物体と床面の摩擦力分布を推定する方法を提案している。また、Bernheiselら [30]やHaradaら [31]は複数対象物の押し操作を解析している。なお、文献 [27]~[31]では物体の運動は準静的であるとして議論されているが、Jiaら [32]は一点接触による押し操作を動力学的に解析し、その解析結果を利用して、形状や摩擦力分布が既知の物体を一点で押した際の物体の位置と姿勢を、触覚センサを用いて推定するアルゴリズムを提案している。

押し操作を利用した対象物体の位置・姿勢の調整に関する研究として、Peshkinら [33]は摩擦力分布が未知の物体を一点で押した際の回転中心の存在範囲を導出し、それに基づいて物体の位置や姿勢を調整する方法について議論している。吉川ら [34]やAkellaら [35]は、対象物を平板あるいは一点接触による複数回の押し操作によって目標の位置・姿勢へ移動させるための経路計画を行っている。また、第1章1.2.2節で述べたように、Brost[17]やGoldberg[18]は平行グリッパを用いて形状が既知の多角形物体の初期位置・姿勢に含まれる不確定性を吸収するアルゴリズムを、Balordaら [19]は平行な二つの直線軌道上を動く二本の指を用いて、滑りを利用した二点接触により多角形物体の初期位置・姿勢の不確定性を吸収する方法をそれぞれ示している。Maedaら [36]は押し操作を含むグラスプレス・マニピュレーションを解析し、多指ハンドにより対象物体を外乱に対してロバストに移動させるための操作計画を行っている。Dogarら [20]は生活環境下で位置・姿勢が不確定な対象物体を多指ハンドで確実に把持するため、押し操作によって対象物体をハンドの中に引き込むことで不確定性を軽減させた後に把持を行う ‘push-grasp’ を提案し、想定される不確定性を吸収して把持を達成するためのハンドの動作計画を行っている。なお、文献 [17]~[20][33]~[36]においても対象物体の運動は準静的であるとして議論されている。

多指ハンドによる把持動作について考察するためには、多点接触による押し操作の解析が必要であるが、これまでに解析されている押し操作は主に一点接触によるもの [20][27]～[29][32]～[34]、あるいは二点接触によるもの [19] である。ここで、文献 [20] においては多指ハンドによる押し操作が想定されているが、実際には操作中の対象物体とハンドの指との接触点の一つのみであるような場合しか扱われていないことに注意されたい。一方、文献 [17][18][30][31][35] における押し操作では多点接触が起こり得るが、平板や平行グリッパに特化したものであるため汎用的な多指ハンドを用いた把持動作に適用することができない。なお、文献 [36] では多点接触を仮定しているが、指は対象物体に対して滑らないことを前提としており、指と対象物体の相対運動は考慮されていない。

また、把持動作としてはタクトタイムを短縮するためにむやみに把持動作の速度を大きくし、衝突や慣性などの動力学的な要素の影響が大きい不安定な動作による失敗を生じやすくするより、ある程度低速であっても常に目的の把持を確実に達成することが可能でその結果タクトタイムを安定にできる方が望ましい。慣性に比して把持対象物体とそれが置かれている床面との間の摩擦の影響が大きく、かつまた指が十分低速で対象物体を押す場合には、対象物体の運動は準静的なものとなり、その結果安定した把持動作が期待される。Mason[37] は単純な押し操作の例題を準静的、動力学的に解析し、対象物体の運動速度が十分低速である場合に準静的解析の結果が妥当であることを示している。この知見から、準静的動作の仮定の下では文献 [32] で行われているような複雑な動力学的解析を行う必要はなく、より簡易な準静的解析によって妥当な結果が得られると考えられる。さらに、これまで汎用的な多指ハンドのための把持戦略と、その把持戦略によって許容される対象物体の初期不確定性については議論されていない。

### 3.3 押し操作の準静的解析

本節では、ハンドの複数の指による対象物体の押し操作を準静的に解析する。以下では、3.3.1 節で押し操作の問題設定を行い、続く 3.3.2 節で押し操作問題の定式化を行う。そして、3.3.3 節で押し操作問題の解法について述べる。

#### 3.3.1 押し操作の問題設定

本章で扱う押し操作問題とは、摩擦のある水平面上に置かれた対象物体を汎用ハンドの複数の指で押した際の指の動きから、対象物体の動きを求めると定義する。具体的には、ある瞬間における与えられた指の速度・回転角速度から、対象物体の速度・回転角速度を求めるとなる。以下では対象物体が置かれている水平面を支持面とよぶ。

第 2 章ではハンドの指は円柱状のものを想定していたが、本節では押し操作をより一般的な方法で解析するため、二次元におけるハンドの指の形状は円に限定することなく、任意形状のものを想定する。また、押し操作は以下の仮定が成立しているという条件下で行われるとする。

- (1) 対象物体は形状、圧力分布が既知の二次元剛体である。
- (2) 対象物体と支持面が接触する領域に含まれるすべての点が同一直線上に存在することはない。

- (3) 対象物体と支持面との間に働く摩擦はクーロン摩擦である.
- (4) 対象物体と支持面との任意の接触点において, 摩擦係数および鉛直方向の圧力の大きさは0でない.
- (5) 対象物体に働く慣性力は支持面からの摩擦力に対して無視できる.
- (6) ハンドの指先は剛体である.
- (7) 対象物体とハンドの指は有限個の点で摩擦なし点接触をし, 線接触は生じない.
- (8) 指の輪郭は対象物体との接触点およびその近傍において十分滑らかであり, 1階微分可能である.

ここで, 仮定 (2) は対象物体と支持面が同一直線上で線接触する場合を除外するためのものである. また, 仮定 (4) については, 対象物体と支持面との接触点のうち摩擦係数および鉛直方向の圧力の大きさが0となるものは, 単純に接触点の集合から除外すればよいことに注意されたい. これら二つの仮定 (2), (4) はともに付録 A.2 の証明で用いる.

なお, 押し操作の解析においてはどの指が対象物体と接触して力を加えるかが既知であるとする. ただし, 把持シミュレーションを行う際には個々の指と対象物体の接触状態が時々刻々と変化することや, 見かけ上接触していても指が力を加えない接触点が存在する可能性があることを考慮する必要があるが, 詳細は後の 3.4.1 節で述べる.

### 3.3.2 押し操作問題の定式化

本節では, 押し操作問題の定式化を行う. 対象物体の運動が準静的であるという条件下では, 押し操作問題はロボットハンドの指が対象物体との接触を保つという運動学的条件と, ハンドの指と支持面から対象物体に加わる力およびモーメントが釣り合うという力学的条件の, 二つの条件によって記述される. 以下では, それぞれの条件を順に定式化する.

なお, 定式化に使用する物理量として指と対象物体の接触点数を  $n_c$ ,  $i (= 1, 2, \dots, n_c)$  番目の接触点を  $C_i$ , 指の本数を  $n_F$ , 個々の指の番号を  $j (= 1, 2, \dots, n_F)$  とする. ただし, 指  $j$  が接触点  $C_i$  において物体と接触しているときは  $j = k(i)$  と表す. ここで, たとえば対象物体が凹形状をもつ場合には1本の指に対して複数の接触点が存在する可能性があり, そのような場合には異なる  $i$  の値  $i_1, i_2 (i_1 \neq i_2)$  について  $k(i_1) = k(i_2)$  となることに注意されたい. また, Fig. 4.1 に示すように世界座標系を  $\Sigma_w$ , 対象物体に固定された物体座標系を  $\Sigma_o$ , 指  $j$  に固定された指座標系を  $\Sigma_{F_j}$  とし, これらの座標系のうち任意の二つの座標系  $\Sigma_A, \Sigma_B$  の間の回転行列を  ${}^A R_B$  と表す.

はじめに, 運動学的条件の定式化を行う. 世界座標系  $\Sigma_w$  から見た対象物体座標系  $\Sigma_o$  の原点の速度と対象物体の回転角速度 (スカラー) をそれぞれ  ${}^w v_o$ ,  $\omega_o$  とおくと, 指と対象物体が  $n_c$  個の接触点における接触を保つとき, 個々の接触点  $C_i (i = 1, 2, \dots, n_c)$  における指と対象物体の速度は指の輪郭の法線方向について等しくなることから, 運動学的条件を表す次式が導かれる.

$$A \begin{bmatrix} {}^w v_o \\ \omega_o \end{bmatrix} = b \quad (3.1)$$

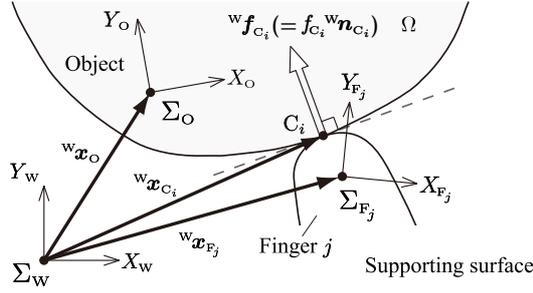


Fig. 3.2 Definition of coordinate systems and parameters

ここで、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{b}$  は以下で与えられる.

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_{n_c}]^T \\ \mathbf{b} &= [b_1, b_2, \dots, b_{n_c}]^T \\ \mathbf{a}_i &= \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{n}_{C_i} \\ ({}^w \mathbf{x}_{C_i} - {}^w \mathbf{x}_O) \times {}^w \mathbf{n}_{C_i} \end{bmatrix} \\ b_i &= \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{n}_{C_i} \\ ({}^w \mathbf{x}_{C_i} - {}^w \mathbf{x}_{F_{k(i)}}) \times {}^w \mathbf{n}_{C_i} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{v}_{F_{k(i)}} \\ \omega_{F_{k(i)}} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n_c) \end{aligned} \quad (3.2)$$

ただし、 ${}^w \mathbf{n}_{C_i}$  は接触点  $C_i$  における指  $k(i)$  の輪郭に対する外向き単位法線ベクトルであり、 ${}^w \mathbf{x}_{C_i}$ 、 ${}^w \mathbf{x}_O$ 、 ${}^w \mathbf{x}_{F_{k(i)}}$  は  $\Sigma_W$  から見た接触点  $C_i$ 、 $\Sigma_O$  の原点、 $\Sigma_{F_{k(i)}}$  の原点の位置をそれぞれ表している。また、 ${}^w \mathbf{v}_{F_{k(i)}}$ 、 $\omega_{F_{k(i)}}$  は  $\Sigma_W$  から見た  $\Sigma_{F_{k(i)}}$  の原点における指  $k(i)$  の速度、回転角速度をそれぞれ表している。なお、演算子 ‘ $\times$ ’ は任意の二つの二次元ベクトル  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_x, \alpha_y]^T$ 、 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_x, \beta_y]^T$  について  $\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\beta} = \alpha_x \beta_y - \alpha_y \beta_x$  を求めるためのものであり、以下で用いる演算子 ‘ $\times$ ’ はすべてこの定義に従うものとする。

なお、対象物体が回転運動せずに並進運動のみ行う場合には、 $\omega_O = 0$  となることから式 (3.1) は次に帰着される。

$$\mathbf{A}_{\text{tns}} {}^w \mathbf{v}_O = \mathbf{b} \quad (3.3)$$

ただし、 $\mathbf{A}_{\text{tns}}$  は  $\mathbf{A}$  の第 3 列の要素を除いた行列である。次に、力学的条件の定式化を行う。 $\Sigma_W$  から見た、接触点  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) において指  $k(i)$  が対象物体に加える指先力を  ${}^w \mathbf{f}_{C_i}$ 、その指先力により対象物体に働く、支持面上の任意の点  $Q$  の回りのモーメント (スカラー) を  $m_{C_i, Q}$  とする。同様に、 $\Sigma_W$  から見た、支持面から対象物体に働く合摩擦力を  ${}^w \mathbf{f}_S$ 、支持面からの摩擦力により対象物体に働く、支持面上の任意の点  $Q$  の回りの合モーメントを  $m_{S, Q}$  とする。

4.3.1 節の仮定 (5) より押し操作中は対象物体に働く力とモーメントは釣り合っているので、次式が成立する。

$$\sum_{i=1}^{n_c} \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{f}_{C_i} \\ m_{C_i, Q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{f}_S \\ m_{S, Q} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.4)$$

ここで、4.3.1節の仮定(7)より指先力  ${}^w\mathbf{f}_{C_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) の方向は Fig. 4.1 に示すように指の輪郭の法線方向に一致するので、 ${}^w\mathbf{f}_{C_i}$  はその大きさを  $f_{C_i}$  ( $> 0$ ) とすると

$${}^w\mathbf{f}_{C_i} = f_{C_i} {}^w\mathbf{n}_{C_i} \quad (3.5)$$

と表される。また、支持面から対象物体に働く合摩擦力  ${}^w\mathbf{f}_s$  は次のように表される。

$${}^w\mathbf{f}_s = - \int_{\Omega} \mu_P p_P {}^w\hat{\mathbf{v}}_P d\Omega \quad (3.6)$$

ただし、右辺の  $\Omega$  は対象物体と支持面が接触している領域、 $\mu_P$  は  $\Omega$  内の任意の点 P における対象物体と支持面との摩擦係数、 $p_P$  は  $\Omega$  内の任意の点 P において対象物体が支持面から受ける鉛直方向の圧力の大きさをそれぞれ表している。また、 ${}^w\hat{\mathbf{v}}_P$  は  $\Sigma_w$  から見た、点 P における支持面に対する対象物体の速度方向の単位ベクトルであり、次式で与えられる。

$${}^w\hat{\mathbf{v}}_P = \frac{{}^w\mathbf{v}_O + \omega_O \otimes ({}^w\mathbf{x}_P - {}^w\mathbf{x}_O)}{\|{}^w\mathbf{v}_O + \omega_O \otimes ({}^w\mathbf{x}_P - {}^w\mathbf{x}_O)\|} \quad (3.7)$$

ここで、 ${}^w\mathbf{x}_P$  は  $\Sigma_w$  から見た  $\Omega$  内の任意の点 P の位置を表している。演算子 ' $\otimes$ ' は任意のスカラー  $\alpha$  と任意の二次元ベクトル  $\boldsymbol{\beta} = [\beta_x, \beta_y]^T$  についてベクトル  $\alpha \otimes \boldsymbol{\beta} = \alpha [-\beta_y, \beta_x]^T$  を求めるためのものである。また、' $\|\cdot\|$ ' は任意のベクトルのノルムを表す。さらに、指先力  ${}^w\mathbf{f}_{C_i}$  によるモーメント  $m_{C_i, Q}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) と物体に働く合摩擦モーメント  $m_{S, Q}$  は、以下の式で与えられる。

$$m_{C_i, Q} = ({}^w\mathbf{x}_{C_i} - {}^w\mathbf{x}_Q) \times {}^w\mathbf{f}_{C_i} \quad (3.8)$$

$$m_{S, Q} = - \int_{\Omega} \mu_P p_P ({}^w\mathbf{x}_P - {}^w\mathbf{x}_Q) \times {}^w\hat{\mathbf{v}}_P d\Omega \quad (3.9)$$

式(3.5)を式(3.4)に代入し、 $\mathbf{f} = [f_{C_1}, f_{C_2}, \dots, f_{C_{n_c}}]^T$  として変形すると、力学的条件を表す次式が得られる。

$$\mathbf{C} \mathbf{f} = \mathbf{d} \quad (3.10)$$

ここで、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{d}$  は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_{n_c}] \\ \mathbf{c}_i &= \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{n}_{C_i} \\ ({}^w\mathbf{x}_{C_i} - {}^w\mathbf{x}_Q) \times {}^w\mathbf{n}_{C_i} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n_c) \\ \mathbf{d} &= - \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{f}_s \\ m_{S, Q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

なお、点 Q を物体座標系  $\Sigma_O$  の原点にとった場合には  $\mathbf{C} = \mathbf{A}^T$  となる。

### 3.3.3 押し操作問題の解法

ある時刻における個々の指の並進速度  ${}^w\mathbf{v}_{F_{j_i}}$  と回転角速度  $\omega_{F_{j_i}}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) から、その時刻における対象物体の並進速度  ${}^w\mathbf{v}_O$  と回転角速度  $\omega_O$  を求める方法について述べる。

付録 A に示すように、指先力により対象物体に働く摩擦中心の回りの合モーメントが 0 である場合は対象物体の運動は並進運動のみとなり、0 でない場合は回転運動<sup>†</sup>となる。ただし、個々の接触点において指先力  ${}^w\mathbf{f}_{c_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) の作用線がすべて対象物体の摩擦中心を通る場合は、この合モーメントが 0 となることが明らかであるが、そうでない場合には個々の指先力の大きさ  $f_{c_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) が未知であるため、あらかじめこの合モーメントが 0 となるかどうかを判断することができない。したがって、この合モーメントが 0 となることが明らかである場合には対象物体が並進運動のみを行うことを前提として、明らかでない場合には対象物体が回転運動するとして、押し操作問題を解く。

まず、指先力  ${}^w\mathbf{f}_{c_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) の作用線がすべて対象物体の摩擦中心を通る場合について述べる。対象物体の運動は並進運動のみであるので  $\omega_o = 0$  とでき、したがって式 (3.3) を用いることができる。このとき、 $n_c = 1$ 、または  $n_c \geq 2$  かつ  $\text{rank}\mathbf{A}_{\text{tns}} < 2$  ならば式 (3.3)、(3.10) を連立して解くことによって、 $n_c \geq 2$  かつ  $\text{rank}\mathbf{A}_{\text{tns}} = 2$  ならば式 (3.3) を単独で解くことによって、 ${}^w\mathbf{v}_o$  を求める。ただし、 $\text{rank}\mathbf{A}_{\text{tns}} < 2$  となることは指先力のすべての作用線が一致することを意味する。

次に、指先力  ${}^w\mathbf{f}_{c_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) の作用線のうち対象物体の摩擦中心を通らないものが存在する場合について述べる。この場合、対象物体は回転運動する可能性があるため式 (3.1) を用いる必要があり、 $n_c \leq 2$ 、または  $n_c \geq 3$  かつ  $\text{rank}\mathbf{A} < 3$  ならば式 (3.1)、(3.10) を連立して解くことによって、 $n_c \geq 3$  かつ  $\text{rank}\mathbf{A} = 3$  ならば式 (3.1) を単独で解くことによって、 ${}^w\mathbf{v}_o$  と  $\omega_o$  を求める。ただし、 $\text{rank}\mathbf{A} < 3$  となることは指先力の作用線がすべて平行であるか、または対象物体の摩擦中心以外のある一点で交わることを意味する。

なお、指先力により対象物体に働く摩擦中心の回りの合モーメントが 0 である場合に対象物体が並進運動のみを行うことを前提とするのは、そうすることで回転運動を仮定して押し操作問題を解く場合よりも比較的容易に解を求めることができるためである。また、 $\mathbf{A}$  および  $\mathbf{A}_{\text{tns}}$  の個々のランク条件の物理的意味を以上で述べたが、本論文においてはその証明は割愛する。詳細は文献 [39] を参照されたい。

個々の指先力の大きさ  $f_{c_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) については、上で求めた  ${}^w\mathbf{v}_o$  と  $\omega_o$  を式 (3.10) に代入したものを解くことにより、求めることができる。ただし、 $\mathbf{C}$  がフルランクでない場合、または  $n_c > 3$  の場合には不静定問題となり、個々の指先力の大きさ  $f_{c_i}$  は一意には求まらないが、今の場合、対象物体の運動、すなわち  ${}^w\mathbf{v}_o$  と  $\omega_o$  が一意に求まればよく、したがって  $f_{c_i}$  は必ずしも一意に求められなくてもよいことに注意されたい。なお、 $\mathbf{C}$  がフルランクにならない条件は先に述べた  $\mathbf{A}$  がフルランクにならない条件に一致する。

以上で述べた押し操作問題の解法は、Fig. 3.3 に示す概念図を用いて直感的に理解することができる。ここでは対象物体が回転運動するとし、また簡単のため  $\mathbf{A}$  がフルランクであるとす。

Fig. 3.3 に示すように、世界座標系  $\Sigma_w$  から見た  $X_w$  軸方向の力  $f_x$ 、 $Y_w$  軸方向の力  $f_y$ 、および支持面上の任意の点  $Q$  の回りのモーメント  $m_Q$  から成る力空間を考える。ベクトル  $\mathbf{t}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) を  $\mathbf{t}_i = f_{c_i} \mathbf{c}_i (= [{}^w\mathbf{f}_{c_i}^T, m_{c_i, Q}]^T)$  と定義すると、方程式 (3.10) の左辺は指が対象物体に加えることが可能な力・モーメントを表しており、力空間においては  $\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_{n_c}$  が形成する凸多面錐 [38] を表す。また、方程式 (3.10) の右辺は、式 (3.1) によって表される接触による拘束条件下での対象

<sup>†</sup> 対象物体が回転運動成分を持つ場合、対象物体の運動はある有限遠点を回転中心とする純粋な回転運動とみなせる。本論文では、そのような運動を単に‘回転運動’と表記する。

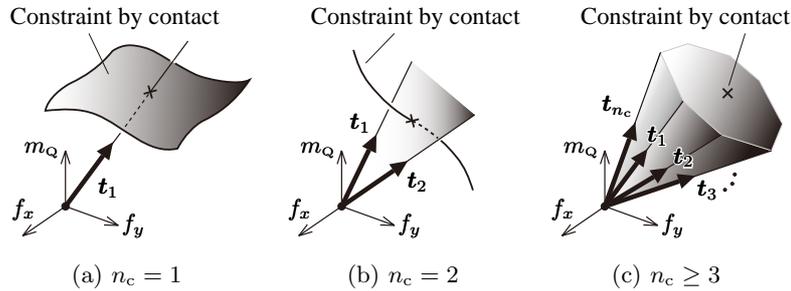


Fig. 3.3 Conceptual views of solving equations (3.1) and (3.10)

物体が行い得る運動によって発生する摩擦力およびモーメントを打ち消すような力・モーメント、言い換えると拘束条件下での対象物体が行い得る運動を実現するために指が対象物体に加える必要のある力・モーメントを表しており、Fig. 3.3 (a), (b), (c) に示すように、 $n_c=1$  の場合には曲面、 $n_c=2$  の場合には曲線（それぞれの接触点に対応する曲面の交わり）、 $n_c \geq 3$  の場合には点（3 個の接触点それぞれに対応する曲面の交わり）となる。したがって方程式 (3.1), (3.10) を解くことは、これらと  $t_1, t_2, \dots, t_{n_c}$  が形成する凸多面錐との交点を求めることに対応する。なお、対象物体が並進運動のみ行う場合や  $\mathbf{A}$  がフルランクでない場合も同様に議論することができるが、本論文ではその詳細は割愛する。

以上、ここまで述べた解析手法は文献 [19][20][27]~[29][32]~[34] におけるものと異なり、一点または二点接触の場合だけでなく多点接触による押し操作も対象としているとともに、文献 [36] では考慮されていなかった指と対象物体との間の滑りを考慮したものとなっている。また、文献 [32] では指の加速度から対象物体の加速度を求める動力的解法が示されているが、その解法では Fig. 3.3 (a) において曲面で表された接触による拘束条件が速度に関するものではなく加速度に関するものである点が、ここまで述べた解析手法と異なっていることに注意されたい。なお、押し操作問題における解の存在と一意性については現状では証明が困難であるため、以降では解が一意に定まると仮定して議論する。

### 3.4 把持シミュレーション

本節では、押し操作の準静的解析に基づく把持シミュレーションについて述べる。以下では、把持動作における複数の指の動きの下での任意形状の対象物体の運動をシミュレートするためのアルゴリズムについて述べ、次いでこれを実装して構築した把持シミュレータによるシミュレーションの具体例を示す。

#### 3.4.1 アルゴリズム

3.3 節で述べた押し操作の解析結果に基づき、把持動作における複数の指の動きの下での任意形状の対象物体の運動をシミュレートすることができる。ただし、押し操作の解析ではどの指が対象物体と接触して力を加えるかが既知であるとしたが、把持シミュレーションを行う際には個々の指と対象物体の接触状態が時々刻々と変化することや、見かけ上接触していても指が力を加えない接

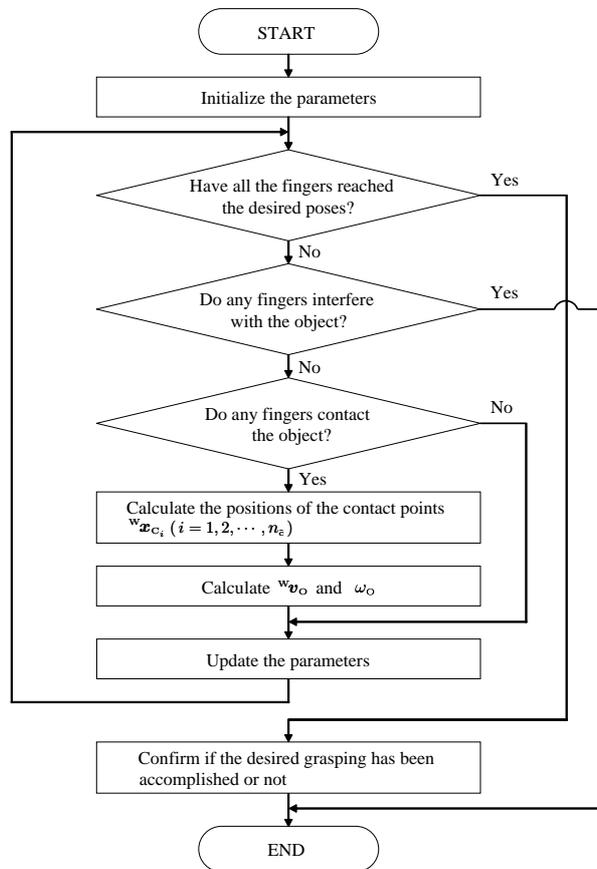


Fig. 3.4 Flowchart of the grasping simulation

触点が存在する可能性があることに注意する必要がある。以下では，Fig. 3.4 に示すフローチャートに沿って把持シミュレーションの手順を記す。

- (S1) 対象物体と個々の指の位置・姿勢，その他シミュレーションに用いる個々のパラメータの値を初期化する。
- (S2) 個々の指の現在位置・姿勢から，全ての指が目的の把持を実現する最終的な位置・姿勢に到達しているかどうかを判断する。到達している場合は，対象物体の現在位置・姿勢から目的の把持が達成されているかどうかを判断し，シミュレーションを終了する。到達していない場合は (S3) へ進む。
- (S3) 個々の指に対する対象物体の輪郭上の最近接点を同定し，その位置および現在の指と対象物体の位置・姿勢から，個々の指と対象物体との干渉判定を行う。ただしここでいう干渉とは，対象物体に対する指のめりこみ量が閾値より大きいことを意味する。干渉している場合は，目的の把持は達成されないとして直ちにシミュレーションを終了する。どの指も対象物体と干渉していない場合は (S4) へ進む。

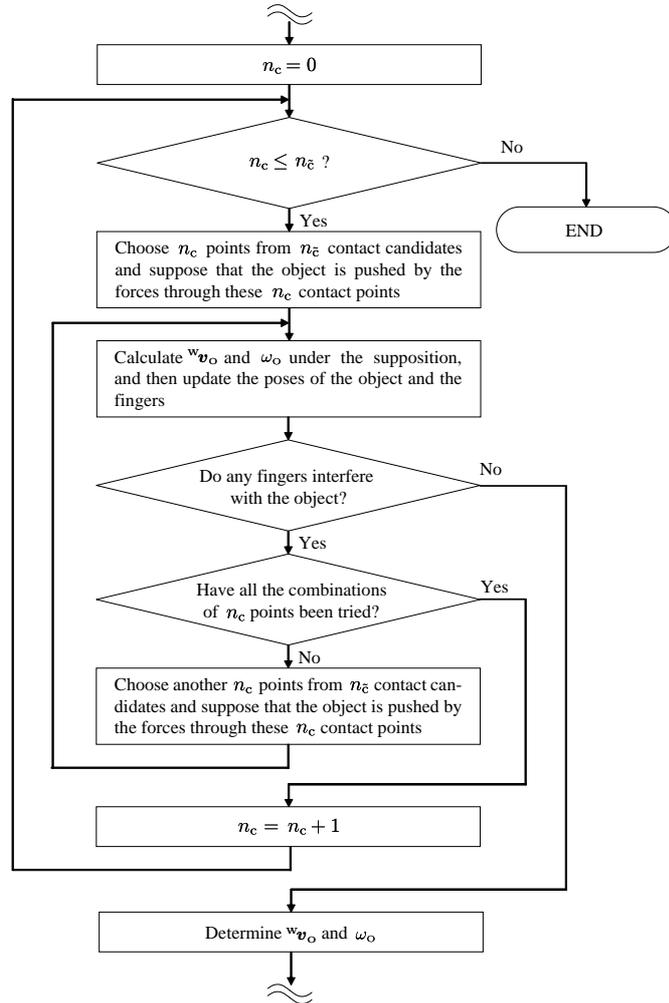


Fig. 3.5 Flowchart of calculating  ${}^w\mathbf{v}_o$  and  $\omega_o$

- (S4) (S3) で同定した最近接点と個々の指の位置・姿勢に基づいて、対象物体と指の接触判定を行う。ただし、指が対象物体にめりこんでいても、そのめりこみ量が先の干渉判定で用いた閾値以下であれば指と対象物体は接触しているとみなす。どの指も接触していない場合は  ${}^w\mathbf{v}_o = \mathbf{0}$  かつ  $\omega_o = 0$  とし、(S6) へ進む。対象物体と接触している指がある場合は、(S5) へ進む。
- (S5) 接触点位置を同定し、3.3.3 節の解法により  ${}^w\mathbf{v}_o$ ,  $\omega_o$  を算出する。ただし、ここでいう接触点とは指先力が加わらない接触点も含めた  $n_\varepsilon (\geq n_c)$  個の全接触点を意味する。
- (S6) (S4) または (S5) で求めた  ${}^w\mathbf{v}_o$ ,  $\omega_o$  を用いて、対象物体の位置・姿勢を更新する。また、個々の指の位置・姿勢やその他のパラメータの値も更新し、(S2) へ戻る。

なお、本節の冒頭でも述べたように 3.3.3 節の押し操作の解法は指が対象物体に力を加える接触点が既知であるとしたものであるが、シミュレーションを行う際にはそのような接触点をあらかじめ

め与えることができない。そのため、(S5) で  ${}^w\mathbf{v}_o$ ,  $\omega_o$  を求める際には、Fig. 3.5 のフローチャートに示すように  $n_{\bar{c}}$  個の接触点のうち  $n_c$  ( $n_c \leq n_{\bar{c}}$ ) 個の接触点においてのみ指が対象物体に力を加えると仮定し、3.3.3 節で述べた解法を用いて以下のように順次計算する方法をとる。ただし、 $n_c$  の初期値は 0 とする。

- (S5-1)  $n_c$  の値が指と対象物体のすべての接触点数  $n_{\bar{c}}$  に対して不等式  $n_c \leq n_{\bar{c}}$  を満たすかどうかを判断する。 $n_c$  が不等式を満たさない場合は  ${}^w\mathbf{v}_o$ ,  $\omega_o$  の算出に失敗したとしてシミュレーションを終了し、満たす場合は (S5-2) へ進む。
- (S5-2) ある  $n_c$  個の接触点においてのみ指が対象物体に力を加えると仮定し、この仮定の下で 3.3.3 節で述べた解法により  ${}^w\mathbf{v}_o$ ,  $\omega_o$  を算出する。また、算出した  ${}^w\mathbf{v}_o$ ,  $\omega_o$  を用いて対象物体の位置・姿勢を更新し、個々の指の位置・姿勢も更新する。
- (S5-3) (S5-2) で更新した対象物体および個々の指について、(S3) と同様の干渉判定を行う。どの指も対象物体と干渉していない場合は、(S5-2) で求めた  ${}^w\mathbf{v}_o$ ,  $\omega_o$  を最終的な値として確定し、(S6) へ進む。干渉している場合は、(S5-4) へ進む。
- (S5-4) (S5-2) で仮定した  $n_c$  個の接触点の組み合わせとして、想定されるすべての組み合わせについて (S5-2), (S5-3) の処理を行ったかどうかを判断する。未処理の場合は新たな  $n_c$  個の接触点の組み合わせを仮定して (S5-2) へ戻る。すでに処理済みの場合は  $n_c$  の値を 1 増やし (S5-1) へ戻る。

なお、指が対象物体に力を加える  $n_c$  個の接触点の組み合わせは複数存在する可能性があるが、そのような場合の解の一意性については証明が困難であるため、本論文では解が一意に定まると仮定して上述のアルゴリズムを用いる。また、押し操作問題において式 (3.1), (3.10) を連立して解く場合には非線形方程式を解く必要があり、その際には MATLAB の Optimization Toolbox を利用する。

### 3.4.2 シミュレーションの具体例

本節では、3.4.1 節で示したアルゴリズムを用いた把持シミュレーションの具体例として、二次元平面内での円形物体および多角形物体の把持動作を対象として述べる。

なお、3.3 節で行った押し操作の解析ではハンドの指の形状は任意としていたが、ここでは第 2 章 2.4.1 節で述べたような汎用的な円柱指を想定し、シミュレーションを行う二次元平面内においてはハンドの指は円形として扱う。

#### 3.4.2.1 円形物体の把持シミュレーション

本節では、把持シミュレーションの具体例として二次元平面内での半径  $r_o$  の円形物体の把持動作を対象として述べる。ただし、ハンドの指はすべて半径  $r_f$  の円であるとする。また、物体と支持面の摩擦係数、および物体の圧力分布は一様かつ時不変であるとする。

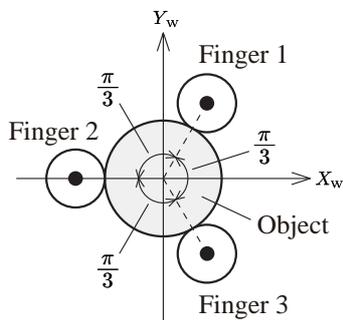


Fig. 3.6 Final grasping configuration of a circular object

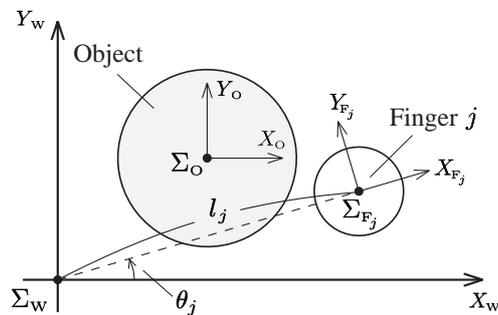


Fig. 3.7 Coordinate frames of a circular object and finger  $j$

円形物体はその位置を拘束することは可能であるが、その姿勢、すなわち物体の中心を通る鉛直軸回りの回転運動の自由度は拘束することができないため、form closure は実現不可能である [25]. したがって、ここでは目的とする把持は Fig. 3.6 に示すように三本の指で並進運動の自由度のみを拘束するものとする。

次に、把持動作における個々の指の動き方、すなわち把持戦略を設定する。Fig. 3.7 に示すように、指座標系  $\Sigma_{F_j}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) をその原点が指  $j$  の中心に一致するようにとり、後にハンドの機構を想定して行う 3.5.1 節での議論のため、指  $j$  は  $\Sigma_{F_j}$  の  $X_{F_j}$  軸の方向が  $\Sigma_w$  の原点から  $\Sigma_{F_j}$  の原点へ向かう方向に常に一致するように運動するものとする。ここで、 $l_j$  を  $\Sigma_w$  の原点と指  $j$  に固定された指座標系  $\Sigma_{F_j}$  の原点を結ぶ線分の長さ、 $\theta_j$  をその線分と  $X_w$  軸の成す角度とし、個々の指は  $\dot{l}_j < 0$  となるように運動するものとする。ただし、 $\theta_j$  は反時計回りを正とする。

今、物体座標系  $\Sigma_O$  をその原点が円形物体の中心に一致するようにとり、初期時刻において  $\Sigma_O$  の  $X_O$  軸の方向は  $\Sigma_w$  の  $X_w$  軸の方向と一致しているとする。このとき、 $\Sigma_O$  から見た円形物体の摩擦中心の位置を  ${}^o\mathbf{x}_{\text{COF}}$  とすると、付録 A.1 に示した摩擦中心の定義式 (A.1) より  ${}^o\mathbf{x}_{\text{COF}} = \mathbf{0}$  となり、 $\Sigma_O$  の原点、すなわち円形物体の中心に一致する。4.3.1 節の仮定 (7) より指と物体は摩擦なし接触をするので、任意の指が円形物体に加える力の作用線は常に物体の摩擦中心を通る。このとき、指先力により円形物体に働く摩擦中心回りの合モーメントは 0 となるので、A.2 の議論より円形物体が常に並進運動のみを行うことが言える。これは押し操作問題を解く際に式 (3.1) ではなく式 (3.3) を用いることができる例である。

数値例として、Fig. 3.8 に把持動作における個々の指と円形物体の運動の軌跡を示す。個々のパラメータの値は、 $r_F = 0.005$  [m],  $r_O = 0.01$  [m],  $\dot{l}_j = -1.875 \times 10^{-3}$  [m/s],  $\dot{\theta}_j = \pi/4$  [rad/s] ( $j = 1, 2, 3$ ) であり、また、初期時刻  $t = 0$  において  ${}^w\mathbf{x}_O = [0.009, 0.01]^T$  [m],  $l_j = 0.03$  [m],  $\theta_j = (2j - 1)\pi/3$  [rad] ( $j = 1, 2, 3$ ) である。把持完了時の指と円形物体の接触点位置は  ${}^w\mathbf{x}_{c_i} = 0.01 [\cos\{(2i - 1)\pi/3\}, \sin\{(2i - 1)\pi/3\}]^T$  [m] ( $i = 1, 2, 3$ ) である。シミュレーションの時間刻み幅は  $1.0 \times 10^{-3}$  [s] であり、Core 2 Duo P9500 2.53 [GHz] 搭載のパソコンを用いて MATLAB 上で計算を行った際の所要時間は 0.776 [s] であった。なお、シミュレーション上での把持動作の所要時間は 8.0 [s] であるが、シミュレーションは準静的解析に基づいているため、この値は時間刻み幅や干渉判定に用いるめりこみ量の閾値との関連でしか意味がない、ということに注意されたい。

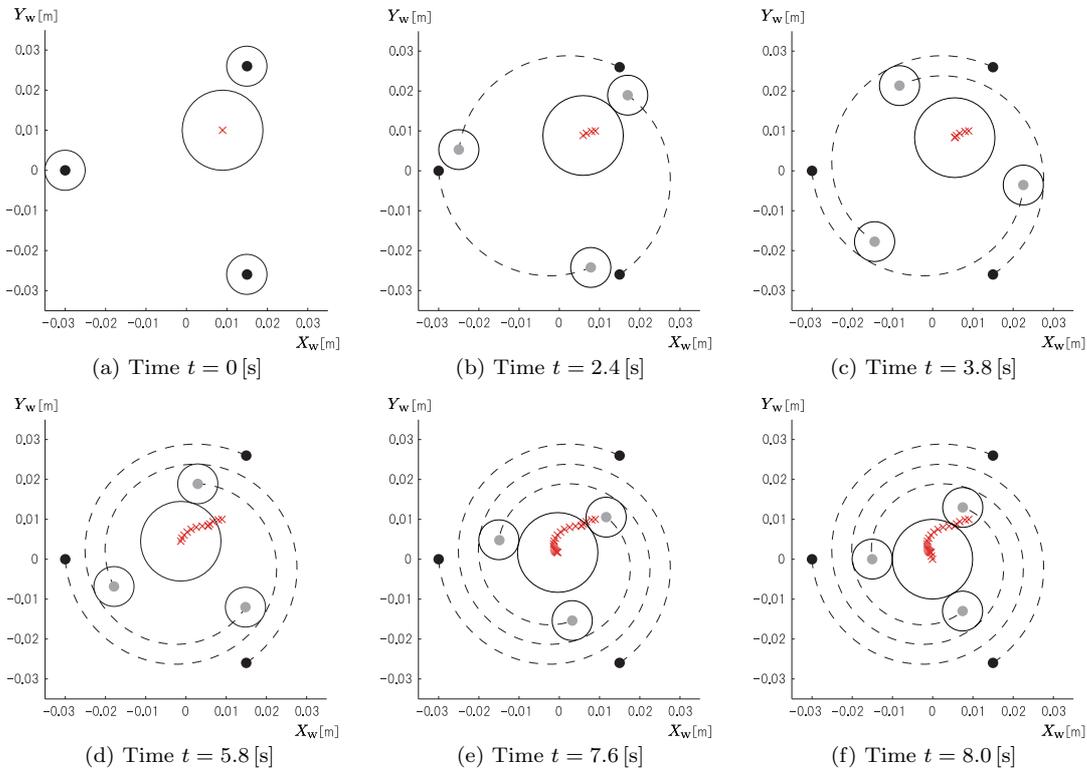


Fig. 3.8 Result of circular object grasping simulation

### 3.4.2.2 多角形物体の把持シミュレーション

本節では、把持シミュレーションのもう一つの具体例として二次元平面内での多角形物体の把持動作を対象として述べる。なお、3.4.2.1節と同様に指はすべて半径  $r_F$  の円であり、物体と支持面の摩擦係数、および物体の圧力分布は一様かつ時不変であるとする。また、ここでは Fig. 3.9 に示すように多角形物体として最も単純な形状の一つである長方形物体を例にとって説明するが、把持シミュレーションは任意の多角形物体を対象とすることが可能であることに注意されたい。

目的とする把持は、Fig. 3.9 に示すように四本の指により form closure を実現するものとする。なお、把持戦略については本節の最後に具体的に述べる。

Fig. 3.10 に示すように長方形物体の四つの頂点を時計回りに  $V_1, V_2, V_3, V_4$  とする。今、物体座標系  $\Sigma_O$  をその原点が長方形物体の重心に一致するように、かつ  $\Sigma_O$  の  $X_O$  軸の方向が頂点  $V_1$  から  $V_2$  に向かう方向に一致するようにとる。また、物体座標系  $\Sigma_O$  の  $X_O$  軸と世界座標系  $\Sigma_W$  の  $X_W$  軸の成す角を反時計回りを正として  $\theta_O$  とおく。このとき、 $\Sigma_O$  から見た長方形物体の摩擦中心の位置は式 (A.1) より  ${}^o\mathbf{x}_{\text{COF}} = \mathbf{0}$  となり、 $\Sigma_O$  の原点に一致する。

対象物体の形状が多角形である場合は 3.4.2.1 節のように円形である場合とは異なり、指先力の作用線が対象物体の摩擦中心を常に通るとは限らず、したがってその力により対象物体に働く摩擦中心回りの合モーメントの大きさが常に 0 となるとは限らないため、付録 A.2 の議論より対象物体には並進運動だけでなく回転運動も生じ得る。

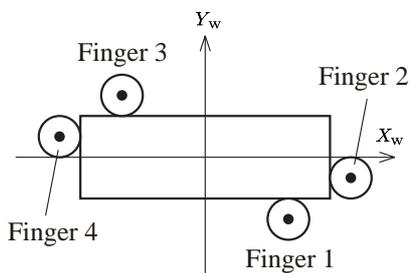


Fig. 3.9 Final grasping configuration of a rectangular object

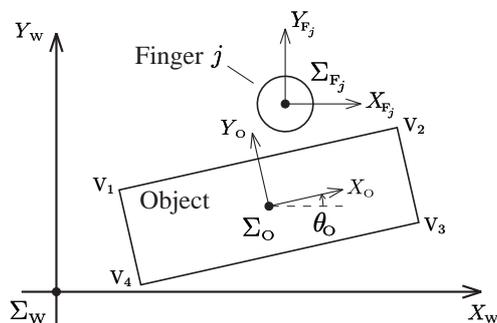


Fig. 3.10 Coordinate frames of a rectangular object and finger  $j$

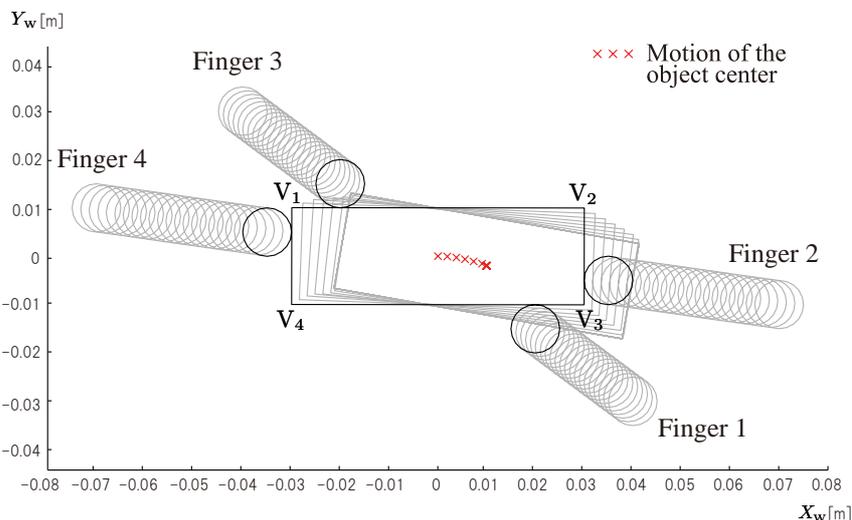


Fig. 3.11 Result of rectangular object grasping simulation

数値例として、Fig. 3.11にある把持戦略の下での個々の指と長方形物体の運動の軌跡を示す。個々のパラメータの値は、 $r_F = 0.005$  [m]、 $\overline{V_1 V_2} = \overline{V_3 V_4} = 0.06$  [m]、 $\overline{V_1 V_4} = \overline{V_2 V_3} = 0.02$  [m] であり、初期時刻  $t = 0$  において、 ${}^w \mathbf{x}_O = [0.01, -0.002]^T$  [m]、 $\theta_O = -\pi/18$  [rad] である。また、個々の指の動き方、すなわち把持戦略については、初期時刻  $t = 0$  において個々の指の中心の位置が  ${}^w \mathbf{x}_{F_1} = -{}^w \mathbf{x}_{F_3} = [0.04, -0.03]^T$  [m]、 ${}^w \mathbf{x}_{F_2} = -{}^w \mathbf{x}_{F_4} = [0.07, -0.01]^T$  [m] であり、個々の指はその中心の速度が  ${}^w \mathbf{v}_{F_1} = -{}^w \mathbf{v}_{F_3} = [-0.004, 0.003]^T$  [m/s]、 ${}^w \mathbf{v}_{F_2} = -{}^w \mathbf{v}_{F_4} = [-0.007, 0.001]^T$  [m/s] となるように動くものとしている。把持完了時の指と長方形物体の接触点位置は  ${}^w \mathbf{x}_{c_1} = -{}^w \mathbf{x}_{c_3} = [0.02, -0.01]^T$  [m]、 ${}^w \mathbf{x}_{c_2} = -{}^w \mathbf{x}_{c_4} = [0.03, -0.005]^T$  [m] である。シミュレーションの時間刻み幅は  $2.0 \times 10^{-3}$  [s] であり、Core 2 Duo P9500 2.53 [GHz] 搭載のパソコンを用いて MATLAB 上で計算を行った際の所要時間は 125 [s] であった。なお、シミュレーション上での把持動作の所要時間は 5.0 [s] であるが、シミュレーションは準静的解析に基づいているため、この値は時間刻み幅や干渉判定に用いるめりこみ量の閾値との関連でしか意味がない、ということに注意されたい。

## 3.5 対象物体の許容初期誤差範囲

3.4節で述べたような把持シミュレーションを、ある与えられた把持戦略のもとで対象物体の初期位置・姿勢を様々に変化させて行うことで、その把持戦略によって吸収することのできる対象物体の初期位置・姿勢の誤差、すなわち許容初期誤差範囲を求めることができる。以下では、具体例として円形物体ならびに長方形物体の把持動作における許容初期誤差範囲の導出を行う。

### 3.5.1 円形物体の把持動作における許容誤差

様々な初期位置に置かれた円形物体に対して3.4.2.1節で示したシミュレーションを行うことにより、Fig. 3.12に示すような、目的の把持を達成するために許容される円形物体の初期位置の誤差範囲が得られる。図中、実線で囲まれる領域が円形物体の中心位置の許容初期誤差範囲であり、黒丸、白丸で示した点は、それぞれ個々の指の中心の初期位置、把持完了時の位置を、二点を結ぶ破線は個々の指の中心の運動の軌跡を表している。また、参考のため(a)において一点鎖線で囲まれた円は初期位置および把持完了時の個々の指を、一点鎖線で囲まれ網掛けされた円は把持完了時の円形物体を表している。

ここでは、第2章2.5.1節におけるハンドの設計手法に則り、ハンドの機構はform closureを実現するために最低限必要なものとしている。ただし、3.4.2.1節で述べたように円形物体はform closureを実現することができないため、並進運動の自由度を拘束するための最も単純な機構のハンドとしてFig. 3.12(a)~(d)の場合にはFig. 3.13(a)に示すような三本指を持つ1自由度チャック型ハンドによる把持を、(e)、(f)の場合にはFig. 3.13(b)に示すような四本指を持つ1自由度チャック型ハンドによる把持をそれぞれ想定している。ただし、ハンド全体はハンドが取り付けられているロボットアームの最終軸などを利用して鉛直軸回りに回転させることが可能であるとしており、Fig. 3.12(c)、(d)、(f)の場合にはそのようなハンドの回転を想定している。

Fig. 3.12(a)~(f)のそれぞれの場合における個々のパラメータの値はTable 3.1に示す通りである。ただし、表中の $l_j|_{t=0}$ は時刻 $t=0$ における $l_j$ の値を意味する。なお、指と円形物体の半径はすべての場合において3.4.2.1節の数値例のものに等しい。

Fig. 3.12(a)、(b)よりハンドのストロークを大きくする、あるいは(a)、(e)より指の本数を増やすと、許容誤差範囲が大きくなることがわかる。また、(a)、(d)または(e)、(f)より、ハンドを適当な回転角速度で回転させると回転させない場合と比べて許容誤差範囲が大きくなることがわかる。特に、(d)の許容誤差範囲は(e)の領域をほぼ内包するような領域となっており、指の本数を増やすことなく把持戦略を変えることによってよりロバストな把持が可能となることがわかる。ただし、Fig. 3.12(a)、(c)からわかるように、ハンドを回転させる場合でも $\dot{\theta}_j$ と $\dot{l}_j$ の比が小さけれ

Table 3.1 Parameters in each case of Fig. 3.12

Parameter	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
$n_F$	3	3	3	3	4	4
$l_j _{t=0}$ [m]	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
$-\dot{l}_j \times 10^{-3}$ [m/s]	1.875	1.875	5.625	1.875	1.875	1.875
$\dot{\theta}_j$ [rad/s]	0	0	$\pi/4$	$\pi/4$	0	$\pi/4$

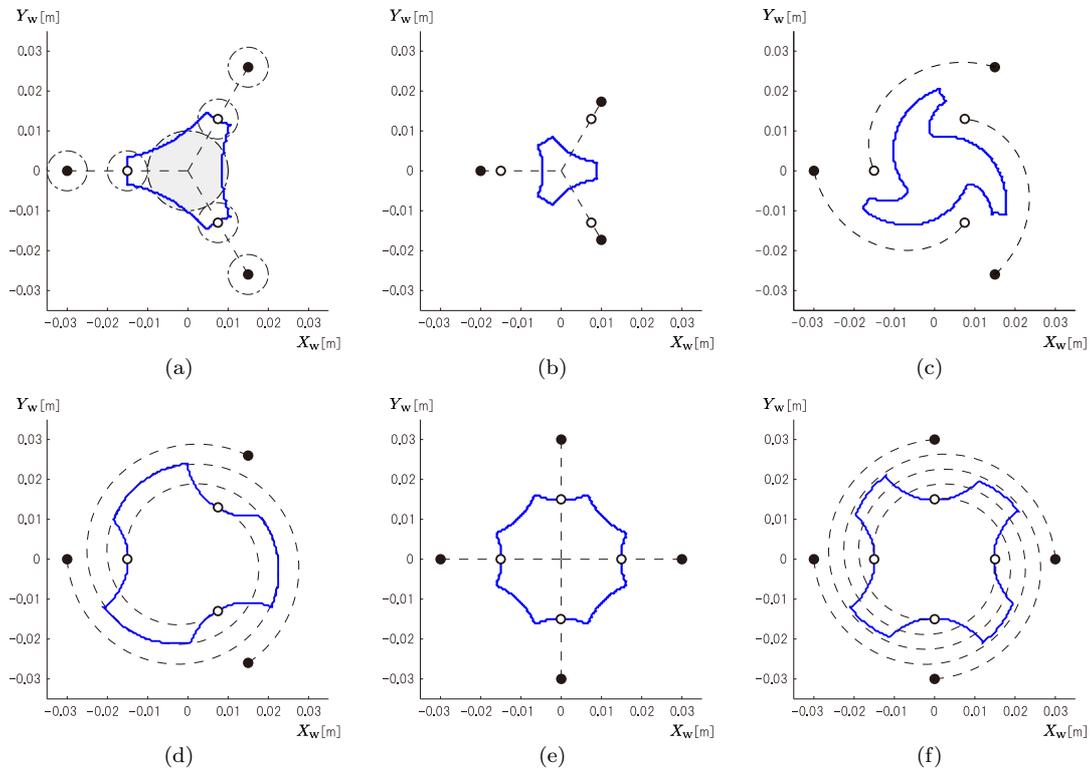


Fig. 3.12 Permissible initial position error regions of a circular object

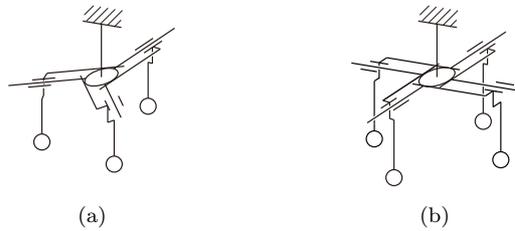


Fig. 3.13 Chuck-type hands for grasping a circular object

ば、回転させない場合に許容できる円形物体の初期位置の誤差が許容できなくなってしまう。

以上より、指の動かし方を工夫する、すなわち適当な把持戦略を用いることによって、物体の初期位置の誤差に対してよりロバストな把持が可能となることがわかる。

### 3.5.2 長方形物体の把持動作における許容誤差

3.5.1 節と同様に、3.4.2.2 節で示したシミュレーションを行うことによって、Fig. 3.14 に示すような、目的の把持を達成するために許容される長方形物体の初期位置の誤差範囲が得られる。なお、円形物体の場合と異なり長方形物体は把持動作の過程でその姿勢が変化するため、一般には初

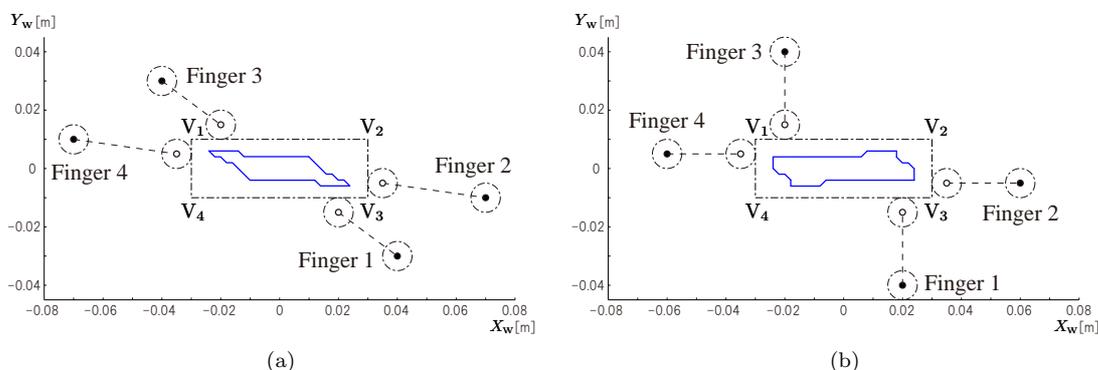


Fig. 3.14 Permissible initial position error regions of a rectangular object when  $\theta_O = 0$  at  $t = 0$

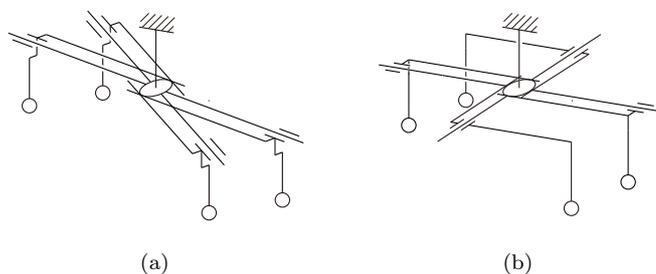


Fig. 3.15 Chuck-type hands for grasping a rectangular object

期誤差として位置だけではなく姿勢の誤差も含まれるが、Fig. 3.14 は初期時刻  $t = 0$  における長方形物体の姿勢を  $\theta_O = 0$  とした場合の初期位置の誤差範囲を表していることに注意されたい。

図中、実線で囲まれる領域が長方形物体の中心位置の許容初期誤差範囲である。また、黒丸、白丸で示した点は、それぞれ個々の指の中心の初期位置、把持完了時の位置を、二点を結ぶ破線は個々の指の中心の運動の軌跡を表しており、一点鎖線で囲まれた円は初期時刻および把持完了時の個々の指を、一点鎖線で囲まれた長方形は把持完了時の長方形物体を表している。

ここでは、3.5.1 節と同様に第 2 章 2.5.1 節におけるハンドの設計手法に則り、長方形物体を form closure の状態で把持するための最も単純な機構のハンドとして Fig. 3.15 (a), (b) に示すような四本指を持つ 1 自由度チャック型ハンドによる把持を想定している。ただし、ここでは 3.5.1 節で述べたようなハンド全体の回転は想定していない。

Fig. 3.14 (a), (b) のそれぞれの場合における個々のパラメータの値は、初期時刻  $t = 0$  における個々の指の中心位置、およびハンドの個々の指の中心の速度は (a) では 3.4.2.2 節の数値例のものに等しく、(b) では  ${}^w\mathbf{x}_{F_1} = -{}^w\mathbf{x}_{F_3} = [0.02, -0.04]^T$  [m],  ${}^w\mathbf{x}_{F_2} = -{}^w\mathbf{x}_{F_4} = [0.06, -0.005]^T$  [m],  ${}^w\mathbf{v}_{F_1} = -{}^w\mathbf{v}_{F_3} = [0, 0.005]^T$  [m/s],  ${}^w\mathbf{v}_{F_2} = -{}^w\mathbf{v}_{F_4} = [-0.005, 0]^T$  [m/s] である。なお、指の半径、長方形物体の寸法、および把持完了時の指と長方形物体の接触点位置は、(a), (b) の両方の場合において 3.4.2.2 節の数値例のものに等しい。

Fig. 3.14 の (a) と (b) を比較すると、許容初期誤差範囲は (a) よりも (b) の方が大きくなっている。このことから、Fig. 3.14 (b) に示すような把持戦略を用いると、対象物体の初期位置の誤差に対してよりロバストに把持することが可能であることがわかる。

なお、ここでは初期姿勢が  $\theta_0 = 0$  である場合の長方形物体の初期位置の誤差範囲のみを導出したが、初期時刻における  $\theta_0$  の値を様々に変化させて把持シミュレーションを行い、それぞれの場合における長方形物体の初期位置の誤差範囲を導出すれば、初期位置・姿勢の両方に含まれる誤差に対して把持戦略のロバスト性を評価することができる。

## 3.6 許容初期誤差範囲の実験的検証

本節では、4.4.2 節において理論的に導出した許容初期誤差範囲が実環境において妥当なものであるかどうかを検証するため、実験用のロボットハンドを製作し、これを用いて把持実験を行う。ここでは例として 3.5.1 節で述べたチャック型ハンドによる円形物体の把持を想定し、Fig. 3.12 (a) に示した許容初期誤差範囲を対象として検証を行う。

### 3.6.1 実験装置

実験装置の概観を Fig. 3.16 に示す。把持対象物体には、底面の直径が 0.02 [m]、高さ 0.042 [m]、質量  $19.5 \times 10^{-3}$  [kg] のジュラコン製の円柱を用いる。また、円柱の底面が接触する支持面にはアクリル樹脂板 (三菱レイヨン) を用いる。

実験用のロボットハンドには、ボールねじ (MISUMI, LX2001-B1-A2028-100) とそれを駆動するサーボモータ (三菱電機, HC-AQ0135D) が三組搭載されている。したがってハンド自体の自由度は 3 であるが、実験においては三つのサーボモータを同期させて動かし、Fig. 3.13 (a) に示すような 1 自由度のチャック型ハンドとして使用する。

個々のボールねじには、Fig. 3.17 に示すような円柱状の指と指先が取り付けられている。本論文では、4.3.1 節の仮定 (7) で述べたようにハンドの指先と対象物体は摩擦なし接触すると仮定しているが、これは理想的な条件であって実環境では摩擦が存在するため、実際のハンドの指先にはステンレス製のベアリングを用いて摩擦なし接触する場合と等価とみなせるようにしている。ベアリングの外径は 0.01 [m]、厚さは 0.004 [m] である。なお、指の長さ方向にはベアリングの側面から物体に摩擦力を加えることができるため、円柱物体を把持して持ち上げることが可能である。また、摩擦の有無による影響を比較するためにベアリングと同寸法で回転機構を有しないアルミ製の指も製作し、ベアリングを用いた指と交換できるようにしている。また、ハンドは垂直多関節型 6 自由度ロボットアーム (三菱電機, MELFA RV-6SL) の先端に取り付けられている。

### 3.6.2 実験方法

本実験では、支持面上の検査領域に置いた円柱物体がロボットハンドによって最終的に目的の位置で把持されるかどうかを確認する。ここでは、検査領域として許容初期誤差範囲の境界付近における刻み幅 0.002 [m] の格子点を用いる。

なお、円柱物体を格子点に置く際はロボットアームを用いる。また、ハンドの指先は円柱物体の底面から高さ 0.006~0.01 [m] の所で接触させ、ハンドの三本の指は一定の速さ  $1.875 \times 10^{-3}$  [m/s] で閉じる。

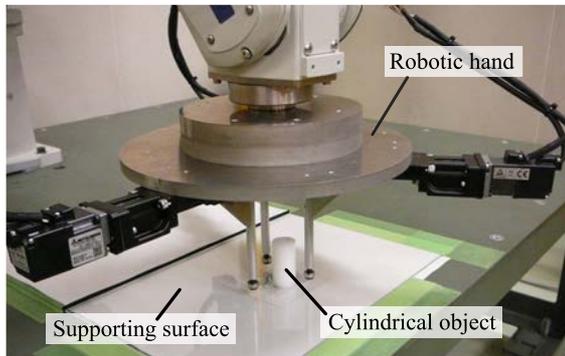


Fig. 3.16 Experimental setup

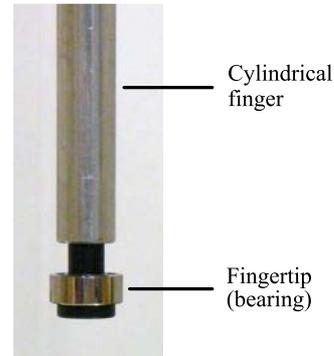
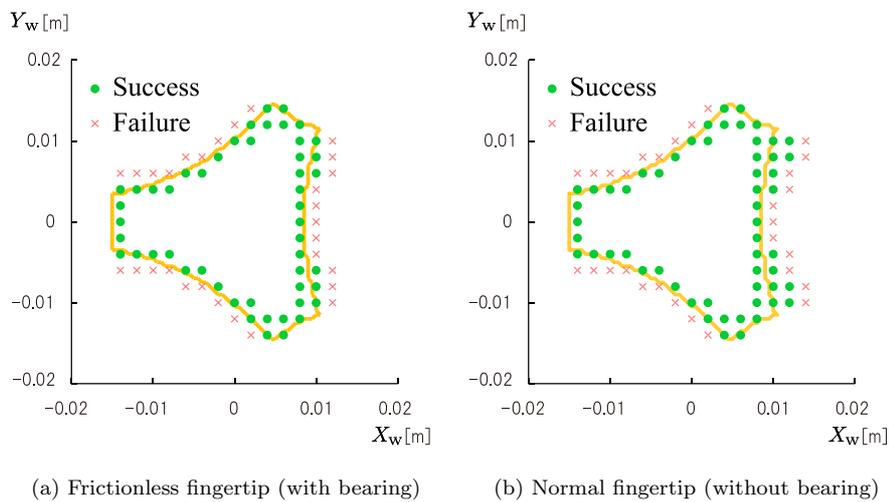


Fig. 3.17 Finger part



(a) Frictionless fingertip (with bearing) (b) Normal fingertip (without bearing)

Fig. 3.18 Experimental results

### 3.6.3 実験結果

3.6.2節で述べた実験方法により、個々の格子点を初期位置とした円柱物体の把持実験をベアリングの指先、回転機構のない指先のそれぞれを用いて一回ずつ行ったところ、Fig. 3.18 (a), (b)に示すような実験結果が得られた。図中の‘●’は目的の把持が成功した際の円柱物体の中心の初期位置、‘×’は失敗した際の初期位置を表している。なお、参考のため Fig. 3.12 (a) に示した許容初期誤差範囲の境界も併せてプロットしている。

Fig. 3.18 より、ベアリングの指先、回転機構のない指先のどちらを用いた場合でも、目的の把持が成功した場合の円柱物体の初期位置の集合と、理論的に導出された許容初期誤差範囲は概ね一致しており、理論的な許容初期誤差範囲は実環境においても妥当なものであると言える。ただし、Fig. 3.18 (b) の許容初期誤差範囲は (a) のものよりわずかに拡大しているが、これは回転機構のない指先との間の摩擦により円柱物体が引きずられることが理由として考えられ、今の場合、現実的に多少の摩擦があっても摩擦なしの条件下で導出した許容初期誤差範囲内の誤差であれば、これを吸収して目的の把持を達成することができると言える。

### 3.7 結言

本章では、ロボットセルでの組立作業を目的とした汎用多指ハンドの把持戦略を計画するための第一歩として、把持動作の最も基本的な要素である対象物体の押し操作を準静的に解析し、その解析結果に基づいて、多指ハンドによる任意形状の二次元物体を対象とした把持シミュレーションを行うための手法を提案した。また、この手法を用いて、ある把持戦略を与えるとそれによって許容できる対象物体の初期誤差範囲が得られることを示した。具体例として、円形指による円形物体および長方形物体の把持シミュレーションを行い、それらの物体の運動の軌跡と許容初期誤差範囲を実際に導出した。さらに、実際にロボットハンドを用いて円柱物体の把持実験を行い、理論的に導出した許容初期誤差範囲が実環境においても十分妥当なものであることを確認した。

今後の課題としては、個々の部品について想定される初期不確定性の情報が与えられた際に、それをロバストに吸収することができる把持戦略を導出するアルゴリズムを構築する必要がある。本章ではある与えられた把持戦略が許容できる対象物体の初期誤差範囲を求める順問題を扱っているが、最終的には吸収すべき初期誤差の範囲からその範囲内の誤差を確実に吸収することのできるような最適な把持戦略を求める問題、すなわち逆問題を解く必要がある。ただし、把持戦略とそのロバスト性との関係は一般に複雑であるため、逆問題を直接解くことは困難である。そこで、第1章1.3節でも述べたように様々な把持戦略について順問題を解き、それらの解を利用することで探索的に逆問題の解を導く方法 [40] が考えられる。ただし、このような方法においては探索空間が爆発しないようにして、解を効率的に求めるための手段を考える必要がある。

なお、本章では対象物体の運動は準静的であると仮定しており、対象物体の慣性や指との衝突については考慮していなかったが、たとえば指の速さを大きくした場合には把持戦略のロバスト性に影響を及ぼす可能性が予想されるため、慣性や衝突といった動力学的要素を考慮した解析を行い、動力学的要素の影響を検証する必要がある。これについては、次の第4章で議論する。

加えて、本章では対象物体として実製品の部品に数多く見られるような二次元的な形状を有するものに限定して議論を行ったが、実部品には三次元的な形状を有するものも存在するため、三次元形状物体のアライメントを行うための手法、ならびにその解析手法についても考慮する必要がある。さらに、ロバスト把持戦略が組立作業の遂行に有効であるかどうかについて、実験的に検証する必要がある。これらについては、後の第5章で述べる。

## 第4章

# 動力的押し操作解析に基づく ロバスト把持戦略の考察

### 4.1 緒言

前章では、アライメントを行う際の最も基本的な要素である押し操作の解析に基づき、ある把持戦略を用いてハンドの指を動かすときに、目的の把持を達成するために許容することのできる対象物体の初期誤差範囲を導出する方法を提案した。この手法では把持動作は確実性を重視して十分低速で行われ、したがって対象物体の運動は準静的であると仮定していたが、指と対象物体の衝突や対象物体の慣性といった動力的要素の影響、ならびにそれらを無視した準静的解析の適用性については議論していなかった。

そこで本章では、押し操作を動力的に解析し、その解析結果に基づく把持シミュレータを構築する。そして、その把持シミュレータを利用して動力的要素が把持戦略のロバスト性に与える影響について考察するとともに、第3章で行った準静的な把持動作解析の適用性について検証する。動力的要素の影響を知ることによって、たとえばセル生産においてタクトタイムを短縮するためにハンドの動作速度を大きくしなければならない場合でも、ロバスト性を有する把持戦略の計画に役立てることができる。また、準静的解析の適用可能範囲が明らかになれば、同定が困難な反発係数や動摩擦係数といった対象物体の動力的パラメータの値が不要で、動力的解析よりも簡便な準静的解析を用いてロバスト把持戦略の計画を行うことが可能となる。

以下では4.2節で関連研究について述べ、4.3節で押し操作の動力的解析について述べる。続く4.4節で把持戦略のロバスト性について述べ、最後に4.5節で結言を述べる。

### 4.2 関連研究

押し操作、ならびに押し操作を利用した対象物体のアライメントに関する研究は第3章3.2節で述べたようにこれまでに数多く行われているが、そのほとんどは対象物体の動きが準静的であると仮定しており、対象物体の慣性や衝突現象は考慮されていない [17]~[20][27]~[31][33]~[36]。これに対し、Wang ら [41] は簡単な例題について押し操作を動力的に解析し、対象物体の回転角速度の増減を判定するアルゴリズムを提案している。また、Jia ら [32] は動力的押し操作の一般的な定式化を行い、その解析結果を利用して対象物体を一点で押した際の物体の位置・姿勢を触覚セン

サにより推定する方法を提案している。さらに, Mason[37] や Su ら [42] は押し操作の例題を準静的, 動力学的の両方で解析し, 対象物体を押し速度や対象物体の慣性とその運動に与える影響について考察している。しかし, これらの文献では対象物体は一つの接触点でのみ押されると仮定していたり [32][37][41][42], 衝突が考慮されていなかったりする [32][42] など単純化された押し操作問題についての議論しか行われていないため, 本研究で対象としている多指ハンドによる対象物体の把持というより一般的な問題の解析には適用することができない。

また, 把持戦略のロバスト性について考察を行うためには多指ハンドによる把持動作をシミュレーションする必要がある, 本章では後の 4.3.5 節で述べるように指と対象物体をともに剛体としたシミュレータを構築している。剛体シミュレータはこれまでに様々なものが開発されており [43]~[46], 中には Miller ら [46] によって開発された, ロボットハンドによる把持動作に特化したシミュレータも存在する。従来のシミュレータで把持動作を精度よくシミュレートするためには, 予めハンドのダイナミクスや制御則などについての詳細な情報が必要となる。しかし, 本研究ではハンドを系統的に設計するための枠組みを構築することを目指しており, 未設計のハンドのダイナミクスを予めシミュレータに与えることは困難であるため, 従来のシミュレータを活用することは難しい。これに対し, 本章で構築する把持シミュレータでは Jia ら [32] と同様にハンドの指の動きをシミュレータへの入力として用いている。これは, ハンドの質量が把持対象物体に比べて十分大きく, かつまた, ハンドの指の位置あるいは速度制御系のサーボ剛性が十分高いため, ハンドの指が対象物体との衝突時の撃力などの外乱の影響をほとんど受けることなく動くことを意味する。この仮定は, 本研究で想定している把持動作においては十分妥当であるが, コンプライアンス制御などを用いた場合には, その限りではないことに注意されたい。

### 4.3 押し操作の動力学的解析と把持シミュレーション

本節では, 対象物体の慣性や指との衝突を考慮した, 押し操作の動力学的解析について述べる。動力学的解析においては, 押し操作を行っている際の接触点における指と対象物体との相対速度によって, 指と対象物体が接触を保つ場合とそれらが衝突する場合の二つの場合を考える必要がある。以下では, 4.3.1 節で押し操作の問題設定を行い, 続く 4.3.2 節で指と対象物体が接触を保っている場合の定式化について, 4.3.3 節で指と対象物体が衝突する場合の定式化について述べる。そして, 4.3.4 節において動力学的押し操作問題の解法を示す。さらに, 動力学的押し操作解析に基づく把持シミュレーションについて 4.3.5 節で述べる。

#### 4.3.1 問題設定

本論文中で扱う押し操作の問題は, 摩擦のある水平面上に置かれた対象物体を複数の指で押した際の指の動きから対象物体の動きを求めることと定義する。なお, 実際の製品を構成する部品の形状は多種多様であるが, 第2章 2.4.1 節で述べたように多くのものは柱状とみなせる。そのような部品の把持動作は二次元問題として考えることができるので, 以下では押し操作を二次元問題として議論する。

押し操作は以下の仮定 (1)~(5) が成立しているという条件下で行われるとする。なお, 第3章と同様に以下では対象物体が置かれている水平面を支持面とよぶこととする。

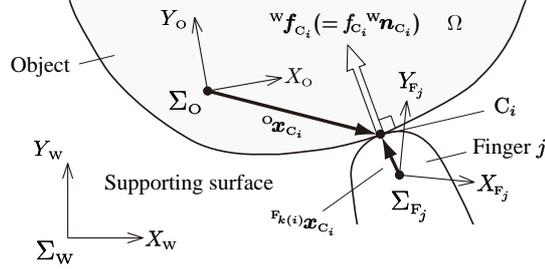


Fig. 4.1 Definition of coordinate systems and parameters

- (1) 対象物体は形状，面密度，ならびに指との反発係数が既知の二次元剛体である．
- (2) 対象物体と支持面の間に働く摩擦はクーロン摩擦であり，動摩擦係数は既知である．
- (3) ハンドの指先は剛体であり，指定した通りの動きを実現することが可能である．
- (4) 対象物体とハンドの指は有限個の点で摩擦なし点接触をし，線接触は生じない．
- (5) 指の輪郭は対象物体との接触点とその近傍で十分滑らかであり，2階微分可能である．

#### 4.3.2 指と対象物体が接触を保っている場合の定式化

本節では，指と対象物体が接触を保っている場合の押し操作問題の定式化を行う．

指と対象物体の接触点数を  $n_c$ ，第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n_c$ ) 番目の接触点を  $C_i$ ，指の本数を  $n_F$ ，個々の指の番号を  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n_F$ ) とする．ただし，指  $j$  が接触点  $C_i$  において物体と接触しているときは  $j = k(i)$  と表す．また，Fig. 4.1 に示すように世界座標系を  $\Sigma_w$ ，対象物体に固定された物体座標系を  $\Sigma_o$ ，指  $j$  に固定された指座標系を  $\Sigma_{F_j}$  とし，これらのうち任意の二つの座標系  $\Sigma_A, \Sigma_B$  の間の回転行列を  ${}^A R_B$  と表す．さらに， $\Sigma_o, \Sigma_{F_{k(i)}}$  から見た接触点  $C_i$  の位置をそれぞれ  ${}^o \mathbf{x}_{C_i}$ ， ${}^{F_{k(i)}} \mathbf{x}_{C_i}$  とし，接触点  $C_i$  の近傍では弧長パラメータ  $s_i, u_i$  を用いてそれぞれ  ${}^o \mathbf{x}_{C_i} = {}^o \mathbf{x}_{C_i}(s_i)$ ， ${}^{F_{k(i)}} \mathbf{x}_{C_i} = {}^{F_{k(i)}} \mathbf{x}_{C_i}(u_i)$  で与えられるとする．

指と対象物体との  $n_c$  個の接触が保持されるとすると，個々の接触点における指と対象物体の法線方向の加速度は等しいので，次式が成立する．

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{a}_o \\ \alpha_o \end{bmatrix} = \mathbf{h} \quad (4.1)$$

ここで， ${}^w \mathbf{a}_o$  は  $\Sigma_w$  から見た  $\Sigma_o$  の原点における対象物体の並進加速度， $\alpha_o$  は回転角加速度である．また， $\mathbf{A}, \mathbf{h}$  は以下で与えられる．

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_{n_c}]^T$$

$$\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_{n_c}]^T$$

$$\mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{n}_{C_i} \\ {}^w\mathbf{x}_{O,C_i} \times {}^w\mathbf{n}_{C_i} \end{bmatrix}$$

$$h_i = \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{n}_{C_i} \\ {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i} \times {}^w\mathbf{n}_{C_i} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{a}_{F_{k(i)}} \\ \alpha_{F_{k(i)}} \end{bmatrix} + l_i \quad (i=1,2,\dots,n_c) \quad (4.2)$$

ただし、 ${}^w\mathbf{n}_{C_i}$ は接触点  $C_i$  における指  $k(i)$  の輪郭に対する外向き単位法線ベクトル、 ${}^w\mathbf{a}_{F_{k(i)}}$  は  $\Sigma_w$  から見た  $\Sigma_{F_{k(i)}}$  の原点における指  $k(i)$  の並進加速度、 $\alpha_{F_{k(i)}}$  は指  $k(i)$  の回転角加速度を表す。また、 ${}^w\mathbf{x}_{O,C_i} = {}^w\mathbf{R}_{O} {}^O\mathbf{x}_{C_i}$ 、 ${}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i} = {}^w\mathbf{R}_{F_{k(i)}} {}^{F_{k(i)}}\mathbf{x}_{C_i}$  である。演算子 ‘ $\times$ ’ は任意の二つの二次元ベクトル  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_x, \alpha_y]^T$ 、 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_x, \beta_y]^T$  について  $\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\beta} = \alpha_x \beta_y - \alpha_y \beta_x$  を求めるためのものである。なお、 $l_i$  は対象物体と指  $k(i)$  の速度に関する項であり、付録 B の式 (B.1) で与えられる。

一方、対象物体の並進および回転の運動方程式より、次式が成立する。

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{a}_O \\ \alpha_O \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{f} + \mathbf{w}_s \quad (4.3)$$

ただし、物体座標系  $\Sigma_O$  の原点は対象物体の重心 (COG, center of gravity) に一致しているとす。対象物体の質量を  $M$ 、重心回りの慣性モーメントを  $I_G$  とおくと、式 (4.3) 中の  $\mathbf{M}$  は  $\mathbf{M} = \text{diag}(M, M, I_G)$  で与えられる対象物体の質量マトリクスである。また、 $\mathbf{f}$  は個々の接触点における指先力の大きさ  $f_{C_i}$  ( $f_{C_i} > 0$ ,  $i=1,2,\dots,n_c$ ) を用いて  $\mathbf{f} = [f_{C_1}, f_{C_2}, \dots, f_{C_{n_c}}]^T$  で与えられるベクトルである。ベクトル  $\mathbf{w}_s$  は支持面から対象物体に働く摩擦力および摩擦モーメントを表すレンチベクトルであり、付録 B の式 (B.4) で与えられる。

以上より、指と対象物体が衝突せずに接触する場合、押し操作問題は  ${}^w\mathbf{a}_{F_{k(i)}}$ 、 $\alpha_{F_{k(i)}}$  ( $i=1,2,\dots,n_c$ ) を与えて式 (4.1), (4.3) を  ${}^w\mathbf{a}_O$ 、 $\alpha_O$  について解く問題として記述される。これらは付録 4.3.4 に示すように、指先力の働く接触点が既知であるとする解析的に解くことができる。

### 4.3.3 指と対象物体が衝突する場合の定式化

本節では、指と対象物体が衝突する場合の押し操作問題（衝突問題）の定式化を行う。なお、剛体の衝突モデルとして propagation model と simultaneous model の二種類のモデルが存在する [43] が、本論文では計算コストを抑制するため、後者を適用する。本節で用いる物理量は原則として 4.3.2 節の定義に従うものとする。

衝突前後での個々の衝突点における対象物体の法線方向の速度変化と、指と対象物体の反発係数との関係から、次式が成立する。

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{v}_O^+ \\ \omega_O^+ \end{bmatrix} = (\mathbf{I}_{n_c} + \mathbf{E}_{\text{coef}}) \mathbf{b} - \mathbf{E}_{\text{coef}} \mathbf{A} \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{v}_O^- \\ \omega_O^- \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

ここで、 ${}^w\mathbf{v}_O^-$ 、 $\omega_O^-$  は衝突直前の対象物体の並進速度と回転角速度、 ${}^w\mathbf{v}_O^+$ 、 $\omega_O^+$  は衝突直後の並進速度と回転角速度を表す。また、 $\mathbf{I}_{n_c}$  は  $n_c$  次単位行列であり、 $\mathbf{E}_{\text{coef}}$  は個々の衝突点における指と対象物体の反発係数  $\epsilon_i$  ( $0 \leq \epsilon_i \leq 1$ ,  $i=1,2,\dots,n_c$ ) を用いて  $\mathbf{E}_{\text{coef}} = \text{diag}(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{n_c})$  で与え

られる。また、 $\mathbf{b}$  は以下で与えられる。

$$\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_{n_c}]^T$$

$$b_i = \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{n}_{C_i} \\ {}^w \mathbf{x}_{F_{k(i)}, C_i} \times {}^w \mathbf{n}_{C_i} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{v}_{F_{k(i)}} \\ \omega_{F_{k(i)}} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n_c) \quad (4.5)$$

ただし、 ${}^w \mathbf{v}_{F_{k(i)}}$  は  $\Sigma_w$  から見た  $\Sigma_{F_{k(i)}}$  の原点の並進速度、 $\omega_{F_{k(i)}}$  は指  $k(i)$  の回転角速度を表しており、これらは衝突の前後で変化しないとしていることに注意されたい。

一方、衝突前後での対象物体の運動量および角運動量の変化と、衝突時に対象物体に働く撃力との関係から、次式が成立する。

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{v}_o^+ \\ \omega_o^+ \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{j} + \mathbf{M} \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{v}_o^- \\ \omega_o^- \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

ここで、 $\mathbf{j}$  は個々の衝突点での撃力による力積の大きさ  $j_i$  ( $j_i > 0$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_c$ ) を用いて  $\mathbf{j} = [j_1, j_2, \dots, j_{n_c}]^T$  で与えられるベクトルである。

以上より、衝突問題は  ${}^w \mathbf{v}_{F_{k(i)}}, \omega_{F_{k(i)}}$  ( $i=1, 2, \dots, n_c$ ) を与えて式 (4.4), (4.6) を  ${}^w \mathbf{v}_o^+, \omega_o^+$  について解く問題として記述される。これらは式 (4.1), (4.3) と同様に撃力が働く衝突点が既知であるとすると、解析的に解くことができる。詳細は付録 4.3.4 を参照されたい。

#### 4.3.4 動学的押し操作問題の解法

本節では、4.3.2 節ならびに 4.3.3 節で定式化した動学的押し操作問題の解法について述べる。はじめに指と対象物体が接触を保っている場合の解法について述べ、次いで指と対象物体が衝突する場合(衝突問題)の解法を示す。

指と対象物体が衝突せずに接触する場合、式 (4.1), (4.3) を  ${}^w \mathbf{a}_o, \alpha_o$  について解くことにより、与えられた指の動き、すなわち把持戦略の下での物体の動きを求めることができる。簡単のため、 $n_c \leq 3$  かつ  $\mathbf{A}$  がフルランクであるとすると、式 (4.1), (4.3) より次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} {}^w \mathbf{a}_o \\ \alpha_o \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{I}_3 - \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{M}^{-1}) \mathbf{w}_s + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{h} \quad (4.7)$$

ここで、 $\mathbf{D}$  は  $\mathbf{D} = \mathbf{A} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}^T$  で与えられる  $n_c$  次正方行列で、証明は割愛するが  $n_c \leq 3$  かつ  $\mathbf{A}$  がフルランクであるときのみ正則となる。なお、 $\mathbf{A}$  は第 3 章 3.3.2 節における  $\mathbf{A}$  と同一のものであり、そのランク条件は第 3 章 3.3.3 節で述べたように指先力の作用線の位置関係に関するものである。また、式 (4.1), (4.3) を  $\mathbf{f}$  について解くと、個々の指先力の大きさを与える次式が得られる。

$$\mathbf{f} = \mathbf{D}^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{A} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{w}_s) \quad (4.8)$$

なお、 $\mathbf{D}$  が正則でない場合には  $\mathbf{f}$  が一意に定まらないが、 ${}^w \mathbf{a}_o, \alpha_o$  は一意に求めることができるため、対象物体の動きは一意に定まることに注意されたい。ただし、本論文ではその証明は割愛する。

次いで、指と対象物体が衝突する場合の解法について述べる．式 (4.4) の右辺を  $\mathbf{h}^\dagger$ ，式 (4.6) の右辺第二項を  $\mathbf{w}^\dagger$  とおくと，式 (4.4)，(4.6) 中のパラメータ  ${}^w\mathbf{v}_o^+$ ， $\omega_o^+$ ， $\mathbf{j}$ ， $\mathbf{h}^\dagger$ ， $\mathbf{w}^\dagger$  は式 (4.1)，(4.3) 中のパラメータ  ${}^w\mathbf{a}_o$ ， $\alpha_o$ ， $\mathbf{f}$ ， $\mathbf{h}$ ， $\mathbf{w}_s$  にそれぞれ対応しており，したがって式 (4.4)，(4.6) は上述の式 (4.1)，(4.3) の解法と同じ方法で解くことができる．たとえば  $\mathbf{D}$  が正則であるとき，衝突直後の対象物体の並進速度  ${}^w\mathbf{v}_o^+$ ，回転角速度  $\omega_o^+$ ，ならびに個々の撃力の大きさを与えるベクトル  $\mathbf{j}$  は以下のように求められる．

$$\begin{bmatrix} {}^w\mathbf{v}_o^+ \\ \omega_o^+ \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{j} + \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{v}_o^- \\ \omega_o^- \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{j} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{I}_{n_c} + \mathbf{E}_{\text{coef}}) \left( \mathbf{b} - \mathbf{A} \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{v}_o^- \\ \omega_o^- \end{bmatrix} \right) \quad (4.10)$$

以上のように，押し操作の動力学的解析は第3章で行った準静的解析に比べて定式化が複雑であるが，一般に条件式が非線形方程式となり解析的に解くことができない準静的解析の場合とは異なり，押し操作問題を解析的に解くことができる．ただし，押し操作の動力学的解析においては指先力の働く接触点ならびに撃力の働く衝突点が既知であるとしており，把持シミュレーションを行う際には第3章3.4.1節で示したアルゴリズムと同様に，指先力の働く接触点と撃力の働く衝突点を順次仮定して得られる解のうち，適切な解を選択するようにしている．

なお，押し操作解析では指と対象物体が接触していることを前提としているが，把持動作においては指と対象物体の接触が解消され，どの指も対象物体と接触しない場合が起こりうる．このような場合には，式 (4.3) において  $\mathbf{f}=\mathbf{0}$  としたものを  ${}^w\mathbf{a}_o$ ， $\alpha_o$  について解くことで，対象物体の動きを求めればよい．

#### 4.3.5 把持シミュレーション

前節までの解析に基づき，対象物体の慣性や指との衝突を加味した上で多指ハンドによる任意形状の対象物体の把持動作をシミュレートすることができる．

本研究では，第3章3.4節で述べた準静的把持シミュレータと同様に MATLAB 上で把持シミュレータを構築した．例として，四本の円形指によるギア形状物体の把持動作のシミュレーション結果を Fig. 4.2 に示す．

シミュレーションにおいて，物体の重心の初期位置は  $[0.01, -0.01]^T$  [m]，初期姿勢角は把持完了時の角度を 0 とすると 45 [deg] であるとしている．また，指の中心の初期位置は  $[\pm 0.04, 0]^T$  [m]， $[0, \pm 0.04]^T$  [m] であり，物体とすべての指の初期速度は  $\mathbf{0}$  であるとしている．指の動きについては，個々の指の中心位置が極座標  $(r_j, \theta_j)$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) で表されるとすると，個々の指は初期時刻から 0.1 [s] 秒の間に一定加速度  $\ddot{r}_j$ ， $\ddot{\theta}_j$  で  $\dot{r}_j = -0.033$  [m/s] かつ  $\dot{\theta}_j = 180$  [deg/s] ( $j=1, 2, 3, 4$ ) となるまで加速され，その後は一定の  $\dot{r}_j$ ， $\dot{\theta}_j$  で螺旋軌道上を動くとしている．なお，対象物体と支持面との動摩擦係数は 0.01，象物体が支持面から受ける鉛直方向の圧力の大きさは 98.0 [N/m<sup>2</sup>] としている．シミュレーションにおける対象物体の重心位置と姿勢角の履歴は Fig. 4.3 に示す通りである．Fig. 4.3 より，時刻  $t=0.45$  [s] 以降，対象物体の位置と姿勢角は振動的に変化しており，対象物体が指との衝突を繰り返しながら最終的に把持されていることがわかる．

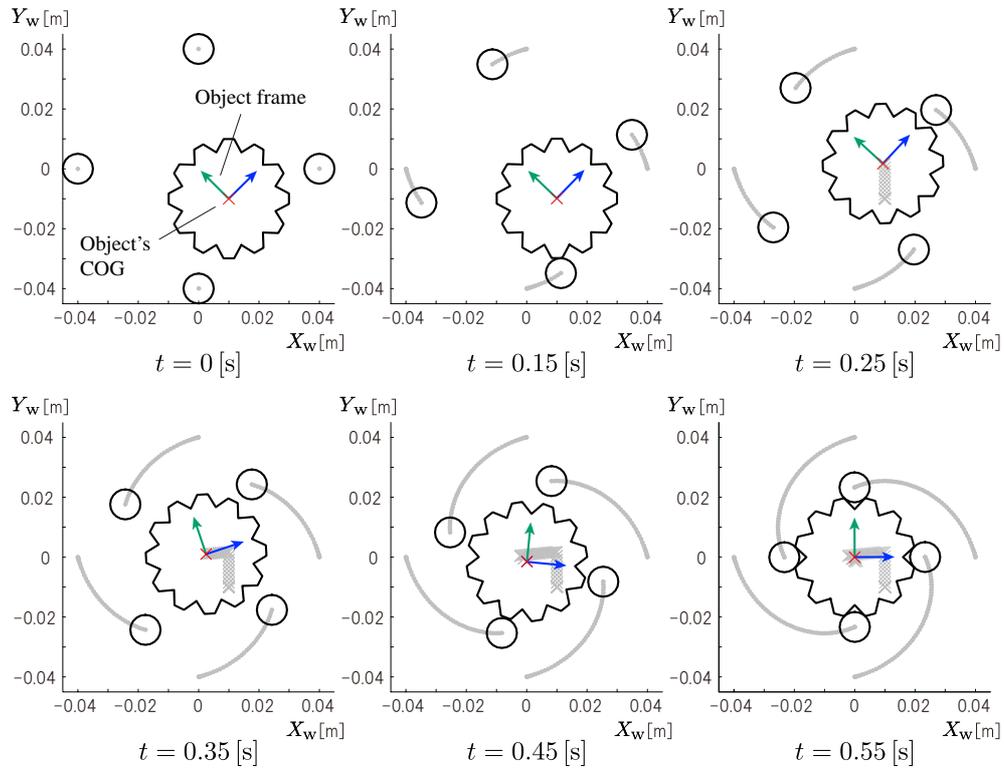


Fig. 4.2 Dynamic grasping simulation result

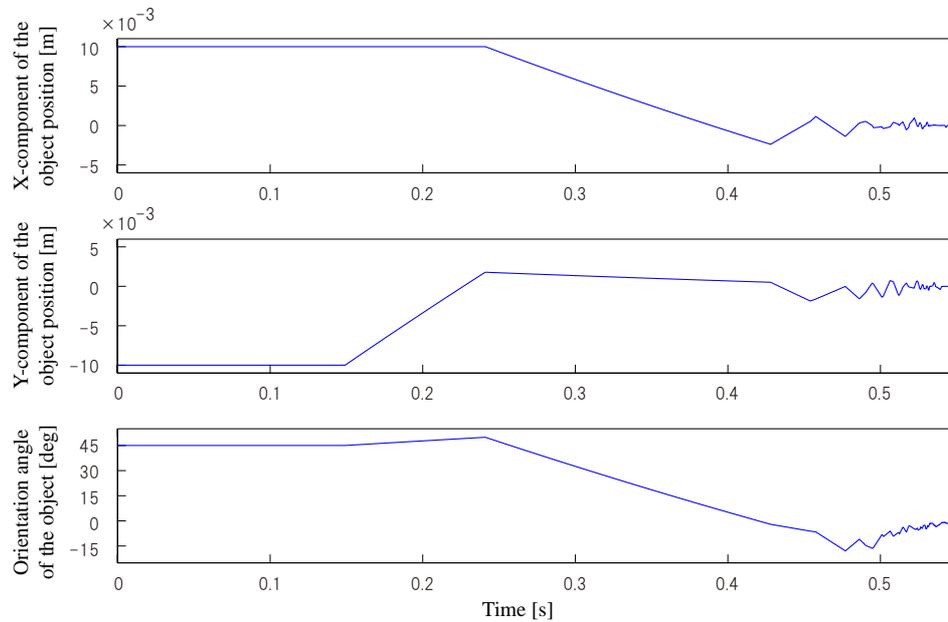


Fig. 4.3 History of the object position and orientation angle

シミュレーションの時間刻み幅は  $2.0 \times 10^{-4}$  [s] とし、Core 2 Duo P9500 2.53 [GHz] 搭載のパソコンを用いた際のシミュレーション時間は 23.8 [s] であった。なお、シミュレーション結果の妥当性については、今後実機実験によって検証することとしたい。

## 4.4 把持戦略のロバスト性

本節では、動力学的押し操作解析に基づく把持シミュレータを用いて把持戦略のロバスト性に対する動力学的要素の影響について考察するとともに、第3章で行った準静的な把持動作解析の適用性について検証する。

### 4.4.1 問題設定

具体例として、四本の円形指による長方形物体の把持動作を対象として議論する。ただし、把持戦略として Fig. 4.4 (a), (b) に示す二種類の把持戦略を想定する。以降では、それぞれの把持戦略を把持戦略 (A)、把持戦略 (B) と呼ぶこととする。なお、本研究では第2章で述べたように把持形態として form closure を適用することを想定しているため、把持戦略 (A)、(B) はともに form closure を実現するものとしている。ただし、それぞれの把持戦略で実現される form closure は厳密には (A) では 1st-order form closure[24]、(B) では 2nd-order form closure[26] であり、把持後に対象物体に働く外乱に対するロバスト性は (A) のほうが高くなっていることに注意されたい。

把持対象物体の寸法は  $\overline{V_1V_2} = \overline{V_3V_4} = 0.06$  [m]、 $\overline{V_1V_4} = \overline{V_2V_3} = 0.02$  [m] であり、対象物体が支持面から受ける鉛直方向の圧力の大きさは一様かつ一定で  $98.0$  [N/m<sup>2</sup>] であるとしている。また、四本の指の半径はすべて等しく  $0.005$  [m] である。把持戦略 (A) では、指の中心の初期位置は  $[\pm 0.028, \mp 0.021]^T$  [m]、 $[\pm 0.045, \mp 0.006]^T$  [m] であり、把持完了時の位置は  $[\pm 0.020, \mp 0.015]^T$  [m]、 $[\pm 0.035, \mp 0.005]^T$  [m] である。同様に、把持戦略 (B) では指の初期位置は  $[\pm 0, \mp 0.025]^T$  [m]、 $[\pm 0.045, \mp 0]^T$  [m]、把持完了時の位置は  $[\pm 0, \mp 0.015]^T$  [m]、 $[\pm 0.035, \mp 0]^T$  [m] である。なお、どちらの把持戦略においても、個々の指は初期時刻から  $0.1$  [s]

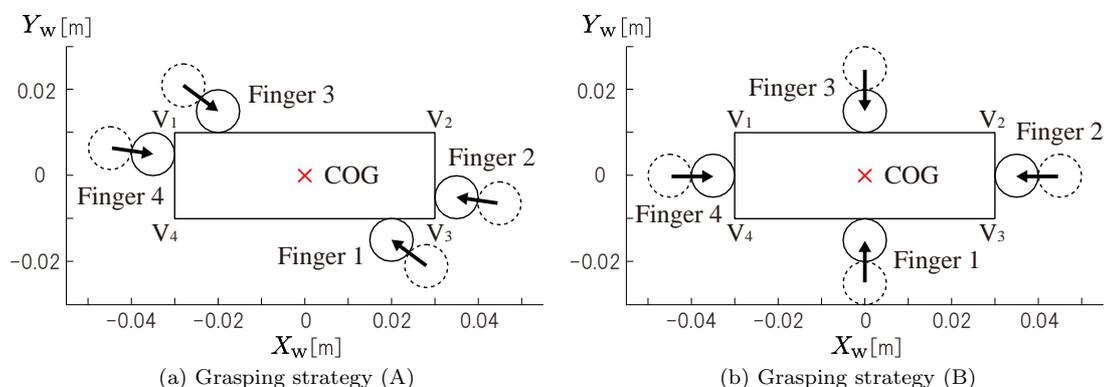


Fig. 4.4 Grasping of a rectangular object by two different grasping strategies

秒の間に一定加速度で速さ  $5 \times 10^{k-3}$  [m/s] ( $k$  は任意定数) まで加速され、その後は一定の速さで  $\Sigma_w$  の原点へ向かって動くとする。

加えて、衝突点における指と対象物体の反発係数は衝突点に依らず等しく  $\epsilon$  ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ) であり、また、対象物体と支持面との動摩擦係数も一樣かつ一定で  $\mu'$  ( $0 \leq \mu' \leq 1$ ) であるとする。次節以降では、これら三つのパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値の様々な組み合わせに対する把持戦略のロバスト性について考察する。

#### 4.4.2 許容初期誤差範囲

第3章 3.5 節と同様に対象物体の初期位置・姿勢を変えて把持シミュレーションを行うことで、ある与えられた把持戦略の下で目的とする最終的な把持が確実に達成されるような対象物体の初期位置・姿勢の誤差範囲、すなわち許容初期誤差範囲が得られる。許容初期誤差範囲は対象物体の初期位置・姿勢からなるコンフィギュレーション空間において三次元的な領域で表され、これを用いることで対象物体の初期誤差に対する把持戦略のロバスト性を定量的に評価することができる。本節では、前節で示した二つの把持戦略に対応する許容初期誤差範囲を示す。

把持戦略 (A) を用いた場合について、パラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値の様々な組み合わせに対する許容初期誤差範囲を Fig. 4.5 (a)~(d) に示す。個々の図において、水平二軸は対象物体の重心の初期位置、鉛直軸は対象物体の初期姿勢角  $\theta_0$  をそれぞれ表している。ただし、 $\theta_0$  は対象物体の二つの頂点を結ぶベクトル  $\overrightarrow{V_4 V_3}$  が  $\Sigma_w$  の  $X_w$  軸と成す角とする。図中の '●' は把持が成功するような対象物体の重心の初期位置・姿勢を表しており、許容初期誤差範囲はそのような初期位置・姿勢の集合で表される。同様に、把持戦略 (B) を用いた場合の許容初期誤差範囲を Fig. 4.6 (a)~(d) に示す。

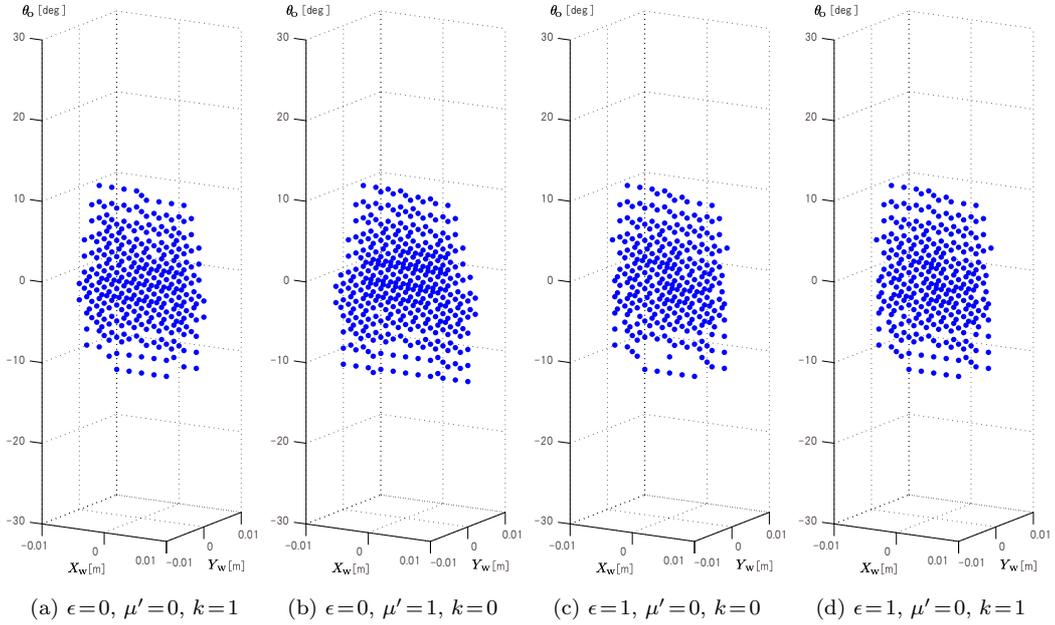
Fig. 4.5, 4.6 の比較より、把持戦略 (B) の許容初期誤差範囲は把持戦略 (A) のそれよりも大きくなっており、したがって把持戦略 (B) のほうが把持戦略 (A) よりも対象物体の初期位置・姿勢に対するロバスト性が高いことがわかる。しかし、どちらの把持戦略を用いた場合でもパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値によって許容初期誤差範囲が変化していることがわかる。次節では、これらのパラメータに対する把持戦略のロバスト性の依存性について述べる。

#### 4.4.3 動力学的要素の影響

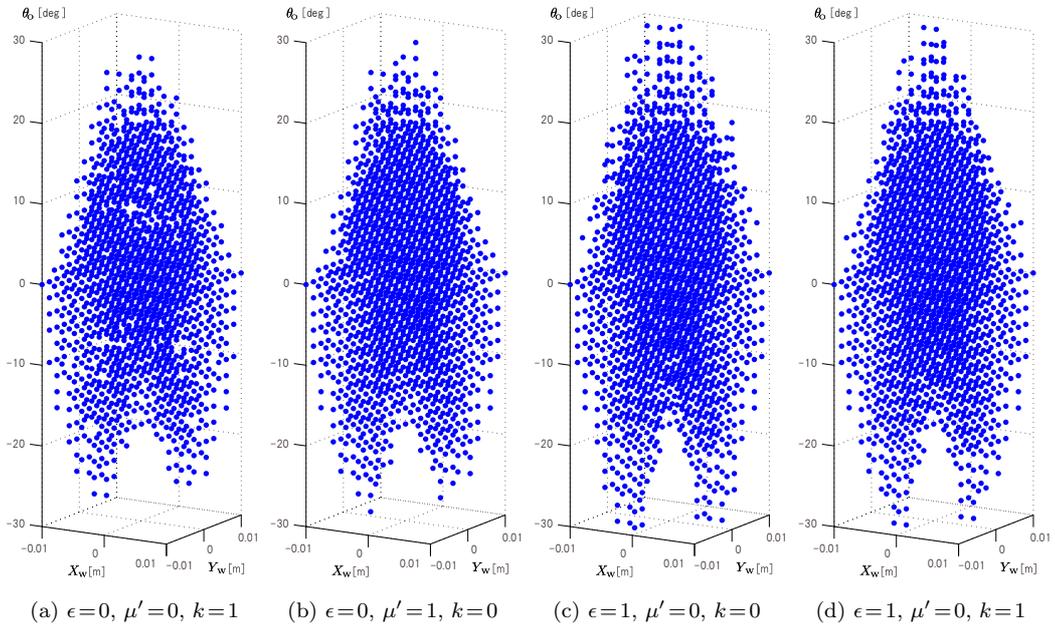
本節では、対象物体の動力学的要素が把持戦略のロバスト性に与える影響について調べる。具体的には、パラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値を様々に変化させて得られた許容初期誤差範囲を用いて、これらのパラメータに対する把持戦略のロバスト性の依存性について考察する。

把持戦略 (A), (B) について、前節の Fig. 4.5, 4.6 で示した  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値の四通りの組み合わせに加え、さらに四通りの組み合わせを用いて把持シミュレーションを行い、それぞれの場合における許容初期誤差範囲を求めた。以下では、把持戦略のロバスト性の指標として許容初期誤差範囲の格子点の数を用いることとし、先の結果と併せて個々の場合における格子点の数を Table 4.1 に示す。ただし、表中の '0', '1' はパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値を示している。

把持戦略のロバスト性に対するパラメータの影響を定量的に調べるため、Table 4.1 に示したデータを用いて多重線形回帰分析 [47] を行った。把持戦略 (A), (B) についての分析結果を Fig. 4.7 (a), (b) にそれぞれ示す。図中の横軸はパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  に関する要因を表している。ただし、'x'



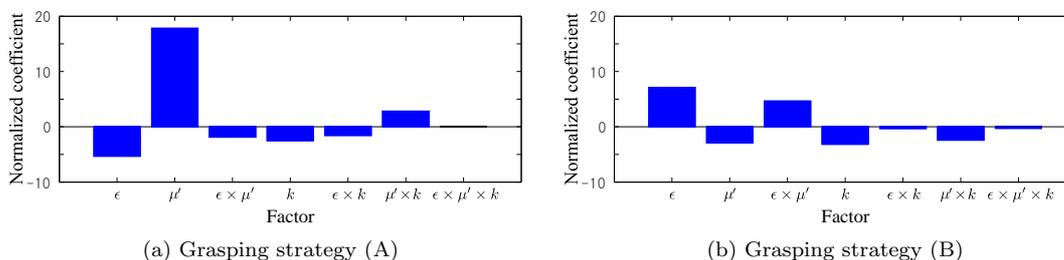
**Fig. 4.5** Permissible initial pose error region of the rectangular object in the case of grasping strategy (A)



**Fig. 4.6** Permissible initial pose error region of the rectangular object in the case of grasping strategy (B)

**Table 4.1** Number of grid points in the permissible initial pose error region obtained by the dynamic simulation

$\epsilon$	$\mu'$	$k$	Grasping strategy (A)	Grasping strategy (B)
0	0	0	320	1619
0	0	1	316	1519
0	1	0	380	1603
0	1	1	358	1591
1	0	0	292	1799
1	0	1	298	1719
1	1	0	364	1643
1	1	1	352	1631

**Fig. 4.7** Influence of the parameters on the robustness of grasping strategies (A) and (B)

はパラメータ間の交互作用を表す記号である。一方、縦軸は個々の要因に関する係数であり、把持戦略のロバスト性に対する影響の大きさを表している。ただし、個々の係数は(切片数/100)で正規化されており、把持戦略(A)、(B)における切片数はそれぞれ320、1617である。

Fig. 4.7 (a) より、把持戦略(A)のロバスト性については $\mu'$ が最も影響を及ぼす要因であり、ロバスト性を向上させるためには $\mu'$ の値はできるだけ大きいほうがよいことがわかる。次いで大きい影響を及ぼす要因は $\epsilon$ であり、その値は小さいほうがよいことがわかる。その他の要因については、把持戦略のロバスト性に与える影響は $\mu'$ 、 $\epsilon$ よりも小さく、また、 $k$ については、ロバスト性を高くするためにはその値は小さいほうがよいことがわかる。

例として、把持戦略(A)について $(\epsilon, \mu', k) = (0, 0, 1)$ 、 $(\epsilon, \mu', k) = (1, 0, 1)$ とした場合の把持シミュレーションの結果をそれぞれFig. 4.8 (a), (b)に示す。ただし、どちらの場合においても対象物体の重心の初期位置は $[0.006, 0]^T$  [m]であり、初期姿勢角 $\theta_0$ は $-6$  [deg]である。なお、図中の'x'は対象物体の重心位置を表している。Fig. 4.8 (a)の場合には目的の把持は成功しているが、Fig. 4.8 (b)の場合には対象物体は指との衝突により弾かれて四本の指に囲まれる領域から逸脱し、結果的に把持が失敗している。これは、把持戦略(A)を用いる場合には $\epsilon$ の値は小さいほうがよいことを示している。

一方、Fig. 4.7 (b) より、把持戦略(B)の場合にはそのロバスト性に与える影響はすべての要因について比較的小さいことがわかる。ただし、最も影響を及ぼすパラメータは $\epsilon$ であり、ロバスト性を向上させるためには $\epsilon$ の値は把持戦略(A)の場合とは逆に大きいほうがよいと言える。また、次いで大きい影響を及ぼす要因は $\epsilon \times \mu'$ であり、 $\epsilon$ と $\mu'$ は $(\epsilon, \mu') = (1, 0)$ または $(\epsilon, \mu') = (0, 1)$ となるのが望ましいことがわかる。これは、対象物体が指に弾かれやすく、かつ滑りやすい、または弾かれにくく滑りにくい、という条件が望ましいことを意味する。その他の要因については、把持

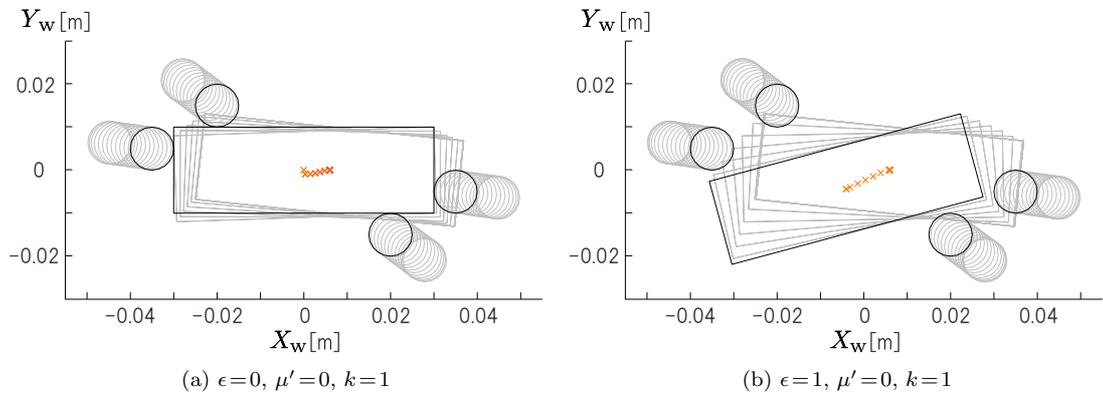


Fig. 4.8 Simulation result under grasping strategy (A)

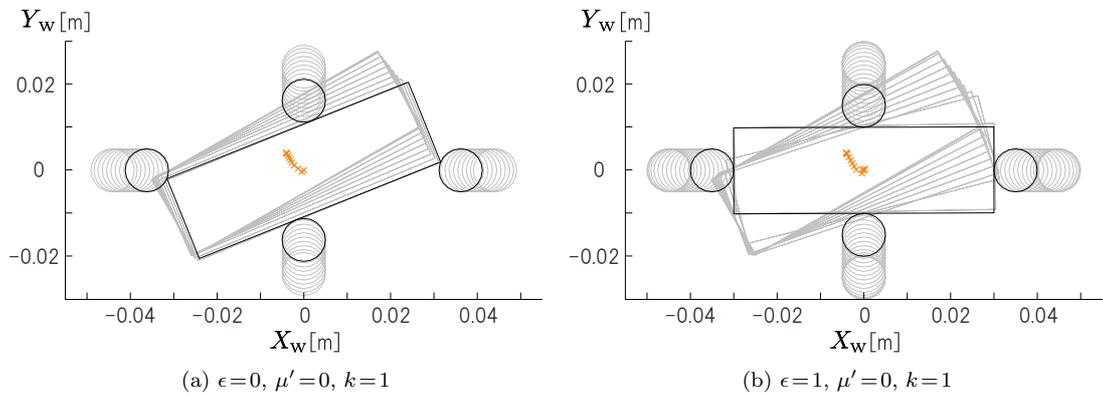
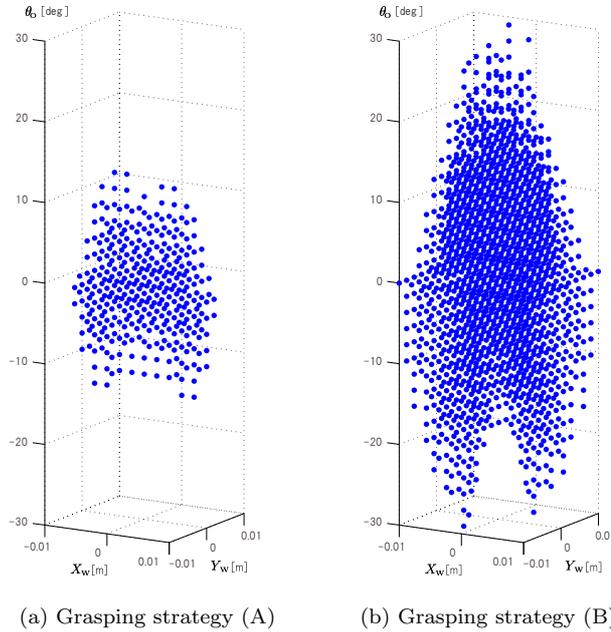


Fig. 4.9 Simulation result under grasping strategy (B)

戦略のロバスト性に与える影響は $\epsilon$ 、 $\epsilon \times \mu'$ よりも小さく、またロバスト性向上のためには $\mu'$ と $k$ はともに小さいほうがよいことがわかる。

把持戦略(A)の場合と同様に、例として、把持戦略(B)について $(\epsilon, \mu', k) = (0, 0, 1)$ 、 $(\epsilon, \mu', k) = (1, 0, 1)$ とした場合の把持シミュレーションの結果をそれぞれFig. 4.9 (a), (b)に示す。ただし、どちらの場合においても対象物体の重心の初期位置は $[-0.004, 0.004]^T$  [m]、初期姿勢角 $\theta_0$ は $30$  [deg]である。Fig. 4.9 (a)の場合には対象物体がジャミングに陥り、目的の把持が達成されない。しかし、Fig. 4.9 (b)の場合には対象物体は指に弾かれるため、結果的にジャミングに陥ることなく把持が成功する。これは、把持戦略(B)を用いる場合には $\epsilon$ の値は大きいほうがよいことを示しており、把持戦略(A)の場合と逆の結果となっている。この理由としては、把持戦略(B)では四本の指が常に対象物体の四方を効果的に囲むように動かされており、把持戦略(A)の場合と違って対象物体は指に弾かれても四本の指に囲まれる領域から逸脱することが起こりにくい、ということが考えられる。

以上より、動力学的要素が把持戦略のロバスト性に与える影響は把持戦略によって異なっており、特に把持動作の過程で対象物体がハンドの指に囲まれる領域から逸脱しにくいような把持戦略であれば、そのロバスト性は動力学的要素の影響を受けにくいということが示唆される。



**Fig. 4.10** Permissible initial pose error region of the rectangular object obtained by the quasi-static grasping simulation

**Table 4.2** Number of grid points in the permissible initial pose error region obtained by the quasi-static simulation

Grasping strategy (A)	Grasping strategy (B)
354	1623

#### 4.4.4 準静的解析の適用性

本節では、第3章で示した準静的押し操作解析に基づく把持戦略のロバスト性解析手法について、その適用性について述べる。

4.4.2節と同様にして、準静的把持シミュレーションによってFig. 4.4に示す把持戦略(A), (B)に対応する対象物体の許容初期誤差範囲を求めると、それぞれFig. 4.10(a), (b)に示すような結果が得られる。なお、個々の許容初期誤差範囲の格子点の数はTable 4.2に示す通りである。

準静的解析手法の適用性を調べるため、前節のTable 4.1に示した個々の $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$ の値の組み合わせについて、準静的シミュレーションと動学的シミュレーションのそれぞれによって得られた許容初期誤差範囲の相対誤差を求める。算出した相対誤差の値をTable 4.3に示す。ただし、ここでいう相対誤差とは単にTable 4.1, 4.2に示す格子点数を用いて求めたものではなく、動学的シミュレーションによって得られた許容初期誤差範囲の格子点のうち、Fig. 4.10に示す許容初期誤差範囲の格子点に一致するものの個数を用いて求めたものであることに注意されたい。

Table 4.3より、動学的把持シミュレーションにおいて $(\epsilon, \mu', k) = (0, 1, 0)$ とした場合、すなわち対象物体が指と衝突しても跳ね返らず、また支持面上をほとんど滑らないためその運動が準静的なものに近いと見なせる場合には、相対誤差は把持戦略(A), (B)の両方について3%未満であり、どちらの把持戦略についても準静的手法が十分適用可能であることが言える。しかし、 $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,

**Table 4.3** Relative error of the number of grid points in the permissible initial pose error region between dynamic and quasi-static simulations

			Unit: [%]	
$\epsilon$	$\mu'$	$k$	Grasping strategy (A)	Grasping strategy (B)
0	0	0	11.9	2.96
0	0	1	11.9	8.63
0	1	0	2.82	2.96
0	1	1	2.26	2.96
1	0	0	20.9	0.246
1	0	1	18.6	0.986
1	1	0	1.13	0.246
1	1	1	2.82	0.739

$k$  の値の他の組み合わせについては、把持戦略 (B) では相対誤差は 9% 未満であるのに対し、把持戦略 (A) では最大で 20% 以上となっている。したがって、把持戦略 (B) ではパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値に変動があっても準静的手法によって十分正確な結果が得られるのに対し、把持戦略 (A) ではそれらの値、特に前節で述べたように  $\mu'$  の値の変動によってそのロバスト性が大きく変化するため、準静的手法では十分に正しい結果を得られない可能性がある。

このように準静的手法の適用性は把持戦略によって異なっており、特に把持動作の過程で対象物体がハンドの指に囲まれる領域から逸脱しにくいような把持戦略であれば、パラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値の変動に対するロバスト性の変化が小さいため、これらのパラメータの広い範囲の値に対して準静的手法が適用可能であることが示唆される。

以上のように準静的手法の適用性を明らかにすることは、把持戦略を計画する上で重要である。実環境では反発係数や動摩擦係数といった対象物体の動力学的パラメータの値を正確に同定することは困難である。また、ハンドの指の速さを大きくした場合には、動力学的手法において把持動作を精度良くシミュレートするために把持シミュレーションの時間刻み幅を十分小さくする必要がある。したがって、本節で示したように動力学的手法と準静的手法のシミュレーション結果を比較することで準静的手法を用いても十分な精度の結果が得られることがわかれば、動力学的パラメータの値が不要で、かつ時間刻み幅を動力学的シミュレーションよりも大きく設定することができる準静的手法を用いることによって、把持戦略の計画を効率的に行うことができる。

## 4.5 結言

本章では、押し操作の動力学的解析に基づいて対象物体の初期誤差に対する把持戦略のロバスト性について考察を行った。はじめに押し操作の動力学的解析を行い、ハンドの指の動きから対象物体の動きをシミュレートする把持シミュレータを構築した。続いて、具体例として二つの異なる把持戦略による長方形物体の把持を採り上げ、把持シミュレータを用いることで対象物体と指との反発係数、対象物体と支持面の動摩擦係数、指の速さを表すパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の様々な値の組み合わせについて許容初期誤差範囲を求めた。そして、これらのパラメータが把持戦略のロバスト性に与える影響を分析し、把持戦略によってその影響が異なることを示した。なお、特に把持動作の過程で対象物体がハンドの指に囲まれる領域から逸脱しにくいような把持戦略であれば、そのロバ

スト性は動力的要素の影響を受けにくいことが示唆された。さらに、筆者らがこれまでに行ってきた準静的手法の適用性について考察を行ったところ、そのような把持戦略ならばパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値の変動に対してロバスト性の変化が小さいため、これらのパラメータの広い範囲の値に対して準静的手法が十分適用可能であることが示唆された。

今後の課題として、動力的把持シミュレーションの結果の妥当性を検証するために、実環境における把持実験を行い、シミュレーションと実験の結果を比較する必要がある。また、把持戦略ならびに対象物体の形状を様々に変化させて動力的把持シミュレーションを行い、本章で示唆された結果が普遍的なものであるかどうかを検証する必要がある。



## 第5章

# 三次元形状を含む多形状物体の組立作業のためのロバスト把持戦略

### 5.1 緒言

本章では、三次元形状を含む多形状部品の組立作業を実現できるようなロバストな把持戦略を計画するための手法について述べる。

第3章および第4章においては、第2章2.4.1節で述べたように実製品の部品の多くが二次元的に扱える柱状物体とみなせることから対象物体はFig. 5.1中の部品のような二次元形状物体に限定しており、二次元的に扱えない三次元的な形状を有するものについては議論していなかった。また、三次元形状を含む多形状の物体に対して、実環境における把持戦略のロバスト性と組立作業における有効性についても検証を行っていなかった。

そこで本章では、三次元形状を含む多形状部品の組立作業を実現できるようなロバストな把持戦略を計画するための手法を提案する。以下では5.2節で三次元形状部品をその初期位置・姿勢の不確定性に対してロバストに把持するための方法とその解析手法について述べる。続く5.3節では三次元形状を含む多形状部品の組立作業を行うためのロバスト把持戦略の計画手法を提案する。5.4節では具体例として立体パズルの組立作業をとりあげ、提案手法に基づいてロバスト把持戦略の計画を行う。さらに、5.5節では実際のロボットハンドと立体パズルを用いて、5.4節で計画した把持戦略が実環境においてもロバストであるかどうかを検証するとともに、ロバスト把持戦略が立体パズルの組立作業の遂行に有効であるかどうかを検証する。ただし、本節ではアライメントは準静的仮定が成立するという条件化で行われるものとする。

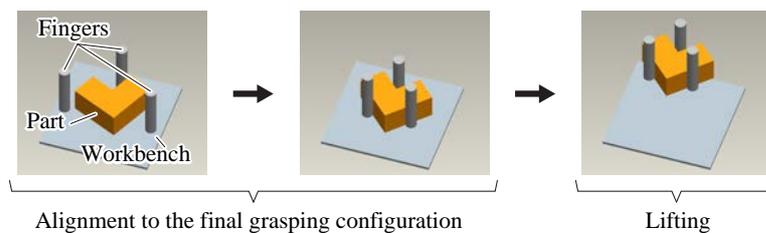


Fig. 5.1 One-step robust grasping of a part

## 5.2 三次元形状部品のロバスト把持

本節では、三次元形状部品の初期位置・姿勢に含まれる不確定性を吸収し目的とする最終的な把持を達成するためのアプローチを提案するとともに、そのようなアプローチを適用した場合の三次元形状部品のアライメントフェーズの解析方法について述べる。

### 5.2.1 アプローチ

前章までは Fig. 5.1 に示すように、ハンドの指を初期位置から組み付けのための最終的な把持を行うための位置に向かって動かすことにより、アライメントから最終的な把持までを単一の把持戦略で行うことを想定していた。以下では、このようなアプローチによる把持を 1 ステップ・ロバスト把持 (one-step robust grasping) と呼ぶこととする。二次元的な形状を有する部品については、アライメントフェーズにおける部品の運動が作業台面上の二次元的なものとなりやすいため、このようなアプローチによってアライメントを安定して行うことが容易である。一方、三次元形状部品の場合にはこのようなアプローチを適用した場合アライメントフェーズの途中で部品の運動が三次元的なものとなる可能性があり、アライメントを確実に行うことが難しい。

そこで、新たなアプローチとして Fig. 5.2 に示すような 2 ステップ・ロバスト把持 (two-step robust grasping) を導入する。このアプローチでは、アライメントと組み付けのための最終的な把持を分けて行う。はじめに、第一ステップとして Fig. 5.2 に示すように三次元部品が作業台面上での安定姿勢を保った状態でまずアライメントを行う。ここで、アライメントが完了したときの部品の位置・姿勢を一意に定めるため、アライメントは組み付けのための最終的な把持と同様に二次元的な form closure を実現するようなものとする。アライメントが完了すれば部品の位置・姿勢は既知となるため、第二ステップとしてはアライメントされた部品の位置・姿勢に合わせて最終的な把持形態での把持を行う。

なお、三次元形状部品であっても形状や最終的な把持形態によっては二次元形状部品と同様に 1 ステップ・ロバスト把持によって目的とする把持を確実に行うことができる場合もある。これは、部品の形状や重心位置から定まる部品の安定姿勢ならびにその安定性に依存する。部品の安定性については現在別途研究を行っているが、本論文では議論しない。

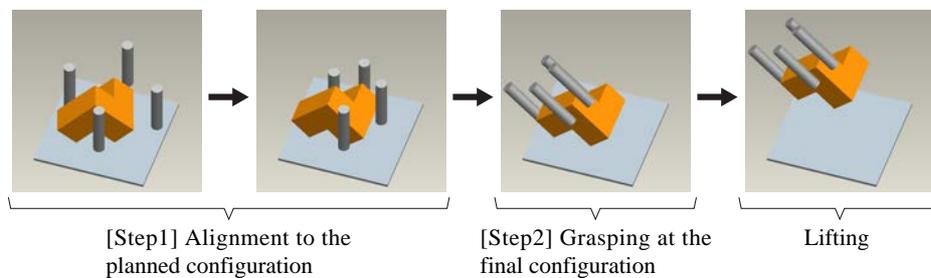


Fig. 5.2 Two-step robust grasping of a three-dimensional shaped part

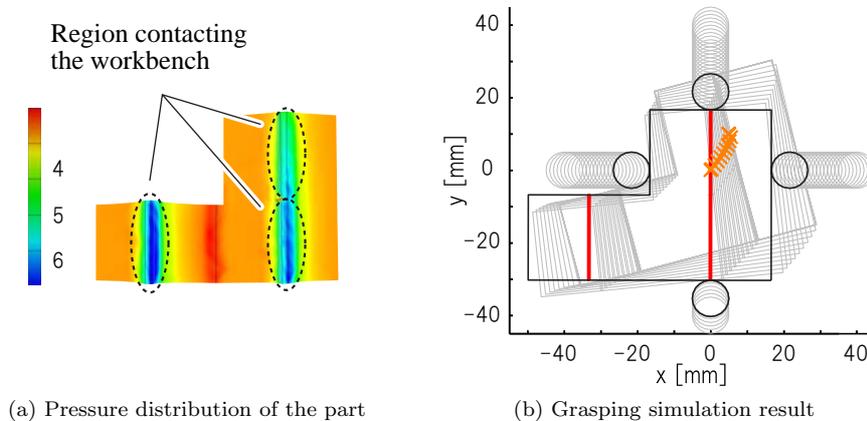


Fig. 5.3 Analysis of grasping of a three-dimensional shaped part

### 5.2.2 三次元形状部品の把持戦略の解析

三次元形状部品に対する把持戦略の解析には、二次元形状部品と同様に第3章3.4節で述べた準静的把持シミュレータを用いる。このシミュレータでは対象部品のアライメントを作業台面上における二次元問題としてシミュレートすることが可能であり、同章3.5節で示したように部品の初期位置・姿勢を様々に変化させてシミュレーションを行うことで、計画した把持戦略が許容できる対象部品の初期誤差範囲を求めることができる。

ただし、シミュレータ上での対象部品の形状としては二次元形状部品についてはその断面形状を用いるが、三次元形状部品についてはその輪郭を作業台面上へ投影して得られるシルエット形状を用いる。シルエット形状は、前節で述べたようにアライメントが部品の安定姿勢を保持した状態で行われるため一定であり、したがって三次元形状部品であっても二次元形状部品と同様にそのアライメントを二次元問題として扱うことができる。また、シミュレーションを行う際には第3章3.3.2節の式(3.6)中の $p_p$ に相当する作業台面上における対象部品の圧力分布情報が必要となるが、これについてはたとえばFig. 5.3(a)に示すように3DCADの解析機能を用いて得られたものを利用すればよい。なお、Fig. 5.3(a)はFig. 5.2中の三次元形状部品についての解析結果であり、図中の数値は便宜的に圧力分布の比を簡単な整数値で表したものである。また、Fig. 5.3(b)は同部品のある初期位置・姿勢に対して行った把持シミュレーションの結果の一例を示している。

## 5.3 把持戦略の計画手法

本節では、三次元形状を含む多形状の部品に対して、その初期位置・姿勢に不確実性がある場合でも組立作業を遂行することができるようなロバスト把持戦略の計画手法を提案する。

### 5.3.1 把持戦略の計画手順

本節では、把持戦略の計画手法について述べる。なお、ここでは個々の部品の形状は既知であり、部品は水平な作業台面上に互いに十分離れた位置に置かれているとする。ただし、それらの初期位

置・姿勢にはある程度の誤差が含まれているとする。また、使用する汎用ハンドは円柱状の指を複数本有しており、アライメント時には Fig. 5.1 に示すように個々の指を作業台面に対して鉛直となる状態を保持して動かせるものとする。把持戦略の具体的な計画手順を以下に示す。

- (P1) 組立作業の工程を計画する。
- (P2) 個々の工程における部品の最終把持形態を計画する。
- (P3) 計画した最終把持形態に基づき、作業台面上において個々の部品がとるべき安定姿勢を求める。
- (P4) 個々の部品について、アライメントと最終的な把持を単一の把持戦略で行う 1 ステップ把持と、アライメントを行った後に持ち直しによって最終的な把持を行う 2 ステップ把持のどちらを適用するかを決め、その結果に応じて把持戦略を計画する。
- (P5) 個々の部品に対して計画した把持戦略を解析し、そのロバスト性を評価する。
- (P6) 全ての把持戦略についてそのロバスト性が十分である場合は把持戦略の計画を終了し、そうでない場合は (P4) に戻って把持戦略を再設計し、ロバスト性が十分となるまで (P4),(P5) を繰り返す。

手順 (P2) における把持形態は二次元的な form closure を実現するものとしている。手順 (P4) では、二次元形状部品や単純な三次元形状の部品については原則として Fig. 5.1 に示すような 1 ステップ把持を行うが、三次元形状部品のうち 1 ステップ把持を用いた場合に作業台面上で安定姿勢が保たれずアライメントを確実にすることが困難であるものについては、Fig. 5.2 に示すような 2 ステップ把持を用いることで安定姿勢が保たれるようにアライメントを確実に達成し、最終的な把持は既にアライメントされた部品の位置・姿勢に合わせて行うこととしている。なお、ここでは簡単のため対象部品は初期状態において手順 (P3) で求めた安定姿勢をとっているものとする。そうでない場合には第 2 章 2.2 節でも述べたようにたとえば対象部品の置き直しや持ち替え操作が必要となるが、これは今後の課題としたい。手順 (P5) における把持戦略のロバスト性の評価方法については、次節で述べる。

### 5.3.2 把持戦略のロバスト性の評価

本節では、把持戦略のロバスト性を評価する方法について述べる。ここでは対象部品の初期姿勢の誤差がある範囲内であるとして、その範囲内で許容することのできる初期位置誤差の大きさを評価指標とする。具体的な算出方法としては、把持シミュレータによって Fig. 5.4 (a) に示すように求めた許容初期誤差範囲について、同図 (b) に示すようにある初期姿勢角と想定した姿勢角誤差の範囲内でのスライス、すなわち許容初期位置誤差範囲を考える。そして、Fig. 5.4 (c) のようにそれらの範囲の共通部分を求め、その共通部分における最大内接円の面積を求める。全ての初期姿勢角について同様の手順をとり、個々の最大内接円の面積の最大値をその把持戦略のロバスト性の評価値とする。これによって把持戦略のロバスト性を定量的に評価することが可能となり、計画した把持戦略のロバスト性が十分であるかどうかを判断することができる。

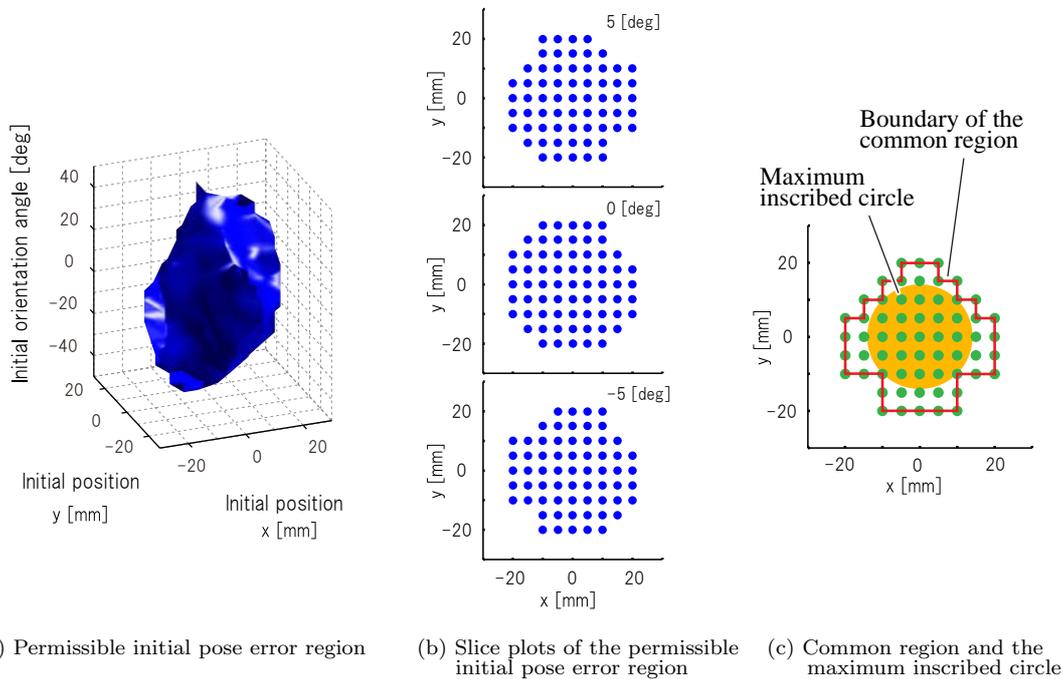


Fig. 5.4 Evaluation of the robustness of a grasping strategy

## 5.4 具体例：立体パズルの組立作業のための把持戦略の計画

本節では、前節で述べた提案手法による把持戦略の計画の具体例として立体パズルの組立作業を行うためのロバスト把持戦略の計画を行う。

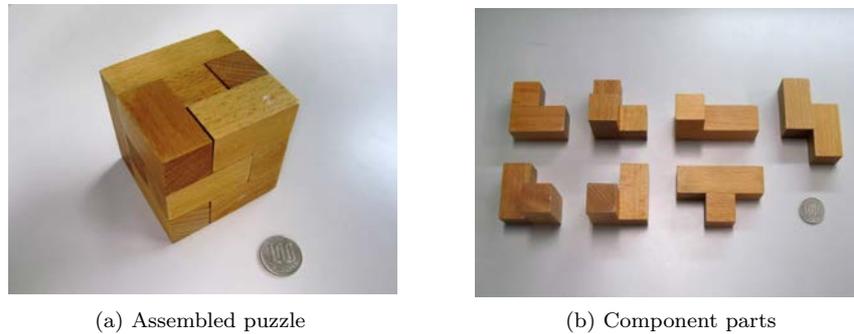
### 5.4.1 対象物体

対象とする立体パズルはFig. 5.5に示すような木製の立体パズル（ディンギー，WP-17）である。このパズルは組み上げるとFig. 5.5 (a)に示すように一辺70.5 [mm]の立方体となり、同図 (b)に示すように三次元形状を有するものを含む計七個のピースで構成されている。

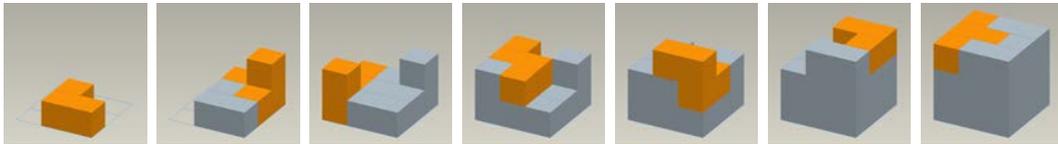
### 5.4.2 把持戦略の計画

計画した立体パズルの組立工程をFig. 5.6に示す。パズルにはこれ以外の組み立て方も存在するが、ここでは個々のピースを汎用ハンドを用いて把持することや、組み付け時にハンドの指と把持しているピース以外のピースとが干渉しないようにすることなどを考慮してこのような組立工程を計画していることに注意されたい。なお、以下では個々のピースを組み付け順序に合わせてピース1, 2, ..., 7と呼ぶ。ピース5, 6は互いに鏡対称な形状を有する。

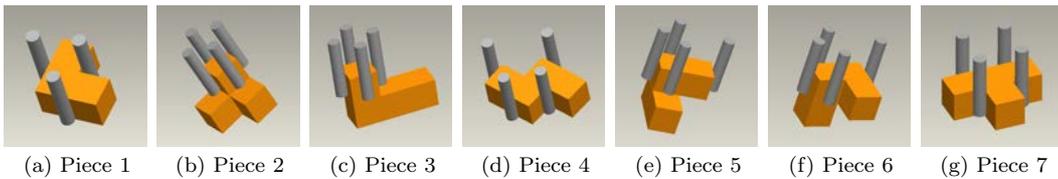
組立工程に基づいて計画した個々のピースの最終把持形態をFig. 5.7に示す。Fig. 5.7に示すようにピース1は三本指で、それ以外のピースは四本指で把持する。ただし、全ての把持形態は二次



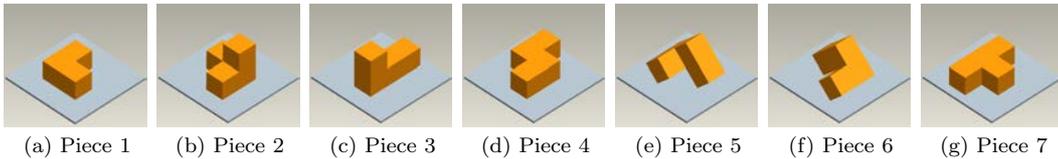
**Fig. 5.5** Typical example of a target product including three-dimensional shaped parts: three-dimensional wooden puzzle



**Fig. 5.6** Assembly procedure of the three-dimensional puzzle



**Fig. 5.7** Final grasping configuration for each part



**Fig. 5.8** Stable pose of each part

元的な form closure を実現しており，ピース 1, 7 については 1st-order form closure [24]，それ以外のピースについては 2nd-order form closure [26] となっている．ただし，ピース 7 を組み付ける際にはハンドの指と他のピースとの干渉が避けられないため，組み付けが完了する直前にハンドの指をピース 7 から離すこととする．これらの最終把持形態に基づいて求めた作業台面上における個々の部品の安定姿勢は Fig. 5.8 に示す通りである．

個々のピースに対して計画した把持戦略を Fig. 5.9 に示す．ピース 1~3, 7 に対しては 1 ステップ把持，その他のピースについては 2 ステップ把持を行うこととしている．ただし，ピース 6 に対する把持戦略はピース 5 の把持戦略と鏡対称となるように設定しており，図示を省略している．なお，ここではハンドの機構の複雑さや指のストローク，ハンドの体積などに留意して，ハンドの指は全て同じ速さでの直進動作のみ可能であり，個々の指の中心軸はハンドの中心軸から最大で 40 [mm] の位置まで開くことができるものとして把持戦略を計画している．また，ハンドの指の断

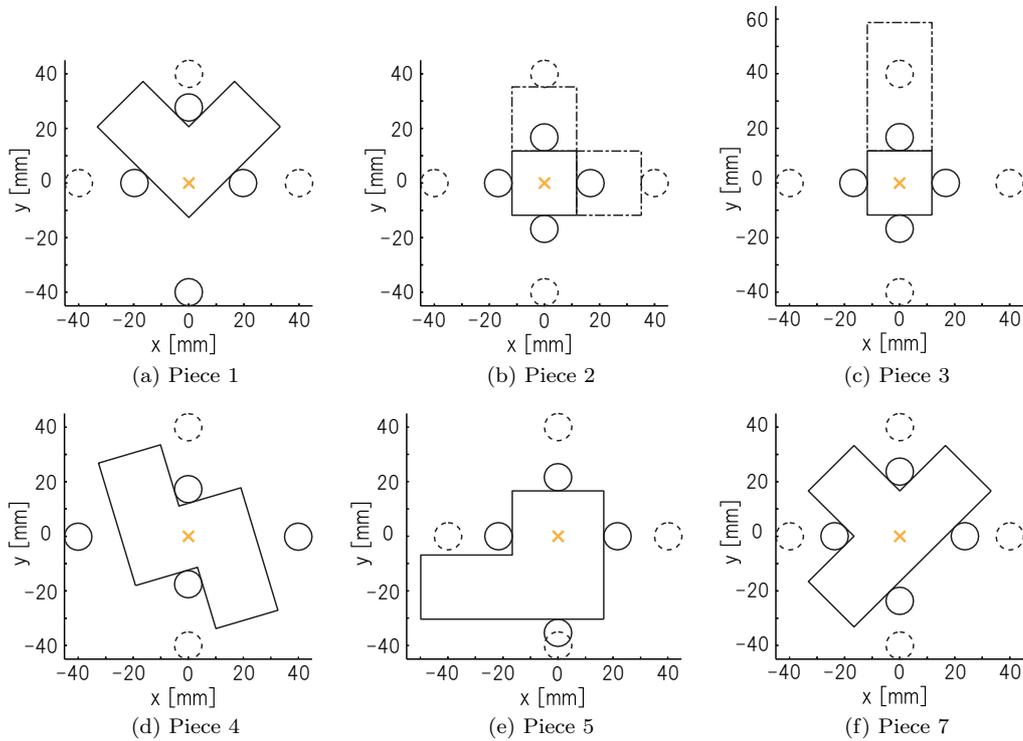


Fig. 5.9 Grasping strategy for each part

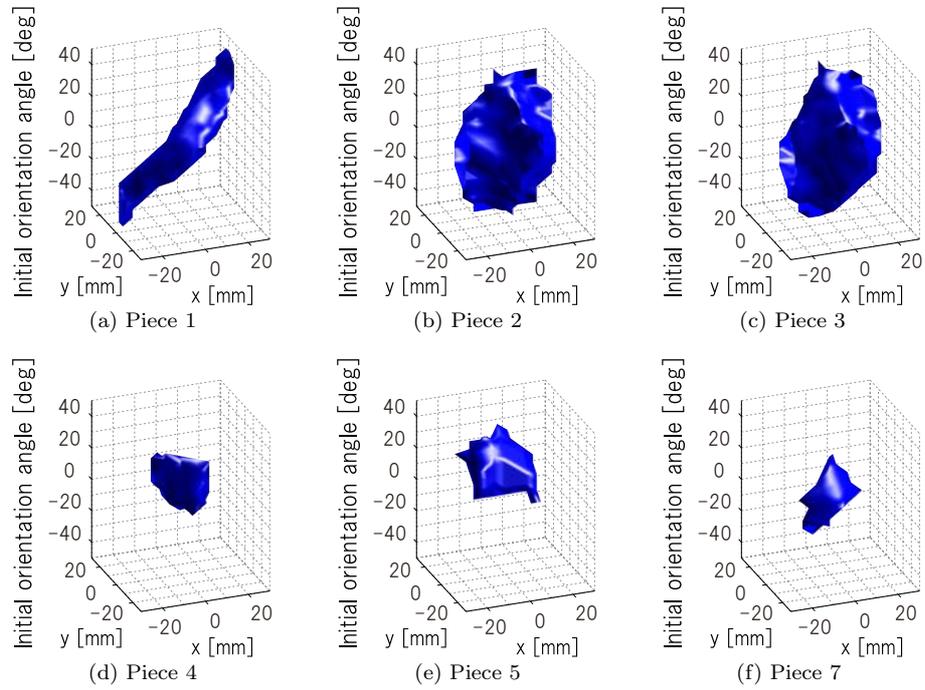
Table 5.1 Evaluation value of the robustness of each grasping strategy

Piece	1	2	3	4	5	6	7
Evaluation value [ $\text{mm}^2$ ]	78.5	491	628	78.5	27.0	27.0	78.5

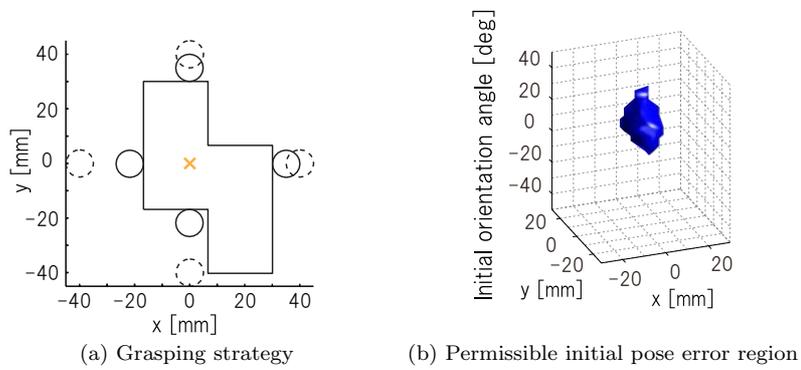
面の直径は個々のピースの大きさを考慮して 10 [mm] としている。

Fig. 5.9 中の個々のピースの形状は、Fig. 5.8 で示した安定姿勢におけるシルエット形状である。ただし、ピース 2,3 についてはハンドの指と接触しない部分の輪郭を一点鎖線で表している。図中の 'x' は個々のピースの参照点を表しており、実線と点線で表されている円は初期状態とアライメント完了時のそれぞれにおける指を表している。

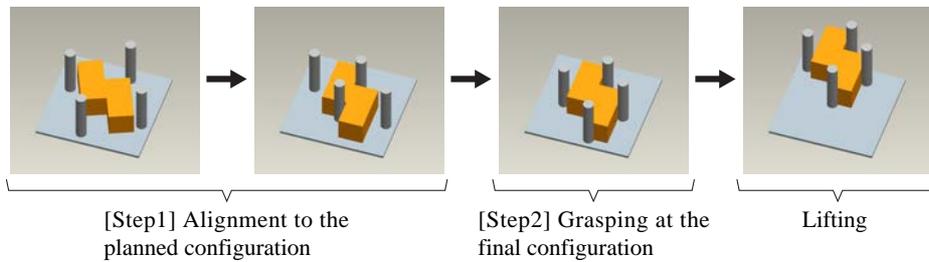
個々の把持戦略について求めた許容初期誤差範囲を Fig. 5.10 に示す。ここで、水平二軸は Fig. 5.9 に示したピースの参照点の初期位置を、鉛直軸は作業台面に対して鉛直な軸回りの初期姿勢角を表している。ただし、姿勢角はアライメント完了時のものを 0 [deg] とし、反時計回りを正としている。個々の許容初期誤差範囲から求めた把持戦略のロバスト性の評価値は Table 5.1 に示す通りである。なお、ここでは例として個々のピースの初期姿勢角の想定誤差範囲は  $\pm 5$  [deg] であり、評価値が 20 [ $\text{mm}^2$ ] であればロバスト性は十分であるとしている。ただしピース 4 については、Fig. 5.11 (a) に示すような 1 ステップ把持では許容初期誤差範囲は同図 (b) に示すようなものとなり、その評価値が 19.6 [ $\text{mm}^2$ ] となって 20 [ $\text{mm}^2$ ] 未満となるため、Fig. 5.12 に示すようにアライメントは Fig. 5.9 (d) に示すようによりロバストな把持戦略を用いて行い、次いで Fig. 5.11 (a) に示すような最終把持形態での把持を行うという 2 ステップ把持を適用している。



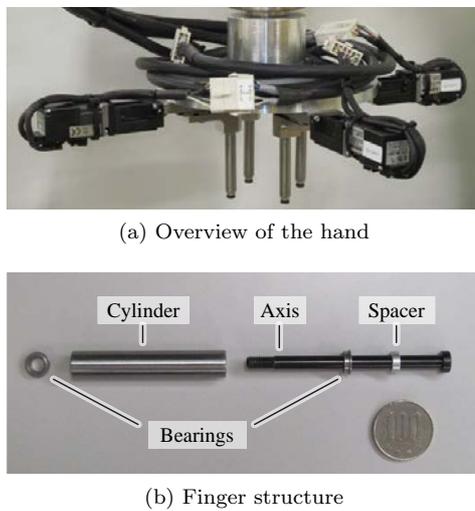
**Fig. 5.10** Permissible initial pose error regions and evaluation values of the robustness of grasping strategies [ $\text{mm}^2$ ]



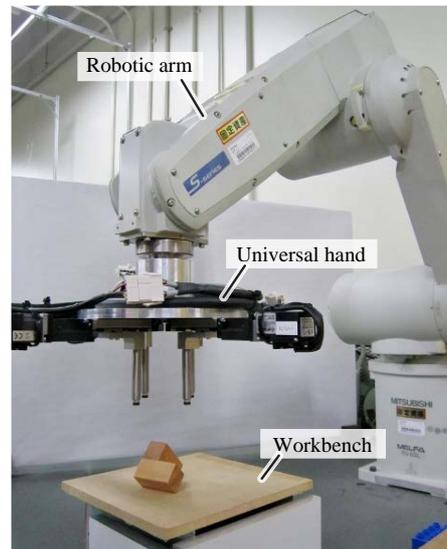
**Fig. 5.11** One-step grasping of Piece 4



**Fig. 5.12** Two-step robust grasping of Piece 4



**Fig. 5.13** Experimental universal robotic hand



**Fig. 5.14** Setup for grasping experiments

## 5.5 実機実験

本節では、5.3節で提案した手法に基づいて計画した把持戦略の実環境におけるロバスト性と組立作業における有効性を検証するため、5.4節で述べた立体パズルの組立作業を対象として、実際の立体パズルと実験用に製作した汎用ハンドを用いて実機実験を行う。

### 5.5.1 実験装置

実験用に製作した汎用ハンドの外観を Fig. 5.13 に示す。ハンドにはボールねじ (THK, KR1501A-0025-P0-000A) とそれを駆動するサーボモータ (三菱電機, HC-AQ0135D) が四組搭載されており、ハンド自体の自由度は4である。ただし、実験を行う際には Fig. 5.14 に示すようにこのハンドを垂直多関節型6自由度ロボットアーム (三菱電機, RV-6SL) に取り付けて使用する。

ハンドの個々のボールねじには直径10 [mm] の円柱状の指が取り付けられている。個々の指は Fig. 5.13 (b) に示すようにベアリングにより円筒部分が受動的に回転するような構造となっており、その回転面内においては立体パズルのピースと摩擦なし接触する場合と等価とみなせるようにすることで指とピースとの間の滑りによるアライメントを実現している。なお、指の長さ方向には指の円筒部の側面から対象物に摩擦力を加えることができるため、個々のピースを把持して持ち上げることが可能である。

立体パズルの個々のピースの把持動作、ならびに組立作業を行う作業台としては木板を使用する。

### 5.5.2 把持実験

5.4.2節で示した個々の把持戦略のロバスト性が実環境においても妥当であるかどうかを確かめるため、把持実験を行う。実験手順としては、対象とするピースをロボットアームを用いて作業台



Fig. 5.15 Grasping experiment of Piece 5

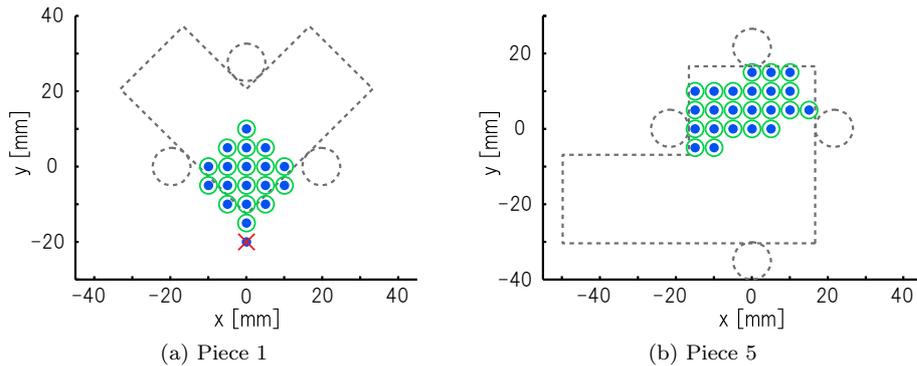


Fig. 5.16 Results of the grasping experiments

面上の様々な位置・姿勢に配置し、その初期状態から目的とする把持、あるいはアライメントが成功するかどうかを逐一確認する。なお、ハンドの指の速さは全て  $10[\text{mm/s}]$  とする。

Fig.5.15 にピース 5 の把持実験の様子を示す。初期状態におけるピースの初期位置・姿勢の誤差は Fig.5.9 に示す座標系においてそれぞれ  $(10, 15) [\text{mm}]$ ,  $20 [\text{deg}]$  であり、ハンドの指を閉じていくにつれてこの初期誤差が吸収され、最終的にアライメントが成功していることがわかる。

二次元形状部品、三次元形状部品に対する把持実験の結果の例として、Fig.5.16(a),(b) にそれぞれピース 1, 5 に対する把持実験の結果を示す。ただし、それぞれのピースの初期姿勢角は  $0 [\text{deg}]$ ,  $20 [\text{deg}]$  とした。図中の‘●’はシミュレーションで把持或いはアライメントが成功したピースの参照点の初期位置を、‘○’, ‘x’はそれぞれ実験で成功, 失敗した参照点の初期位置を表している。また、点線は把持或いはアライメント完了時のピースとハンドの指を表している。なお、‘●’が成す領域の境界近傍について、領域の外側ではピースが初期位置にある指と干渉してしまうため、把持実験を行っていないことに注意されたい。

Fig.5.16 からわかるように、シミュレーションと実験の結果はほぼ一致した。他の初期姿勢角、および他のピースについても同等の結果が得られ、シミュレーションから得られた把持戦略のロバスト性は実環境においても妥当であることが確認された。

### 5.5.3 組立実験

本節では、組立作業におけるロバスト把持戦略の有効性を検証するため、5.3 節で計画したロバスト把持戦略を用いた立体パズルの組立作業を行う。

立体パズルの個々のピースは、第2章 2.2 節で述べたように既に仮置きされている状態を想定する。ただし、実験を行う際には Fig.5.17 (a) に示すようにアライメントされた個々のピースに対して、その初期位置・姿勢に Fig.5.17 (b) に示すようなある程度の誤差を付加する。初期誤差の具体

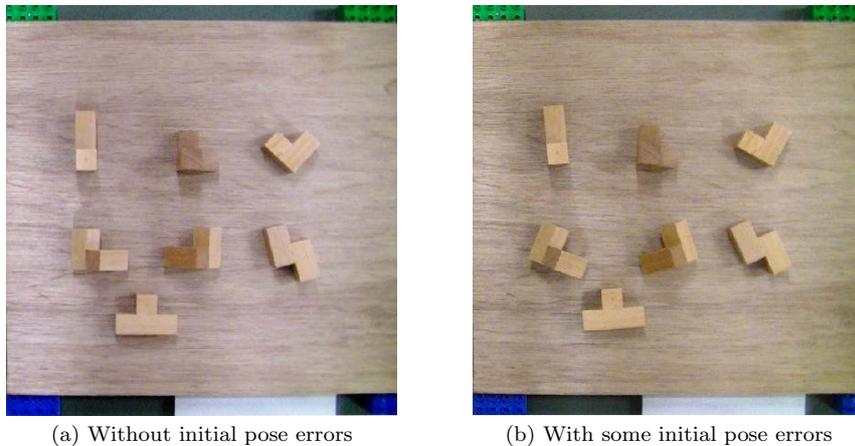


Fig. 5.17 Initial poses of the pieces

Table 5.2 Initial pose error of each piece in the assembly experiment

Piece	1	2	3	4	5	6	7
Position error [mm]	(10, 5)	(-10, 5)	(5, 5)	(0, 5)	(3, 3)	(-3, 3)	(0, 5)
Orientation error [deg]	15	-5	5	10	20	-20	5

的な数値は Table 5.2 に示す通りである。ただし、表中の位置誤差については Fig. 5.9 中の座標系における  $x$  方向、 $y$  方向の誤差量を表している。なお、組立作業におけるロボットアームの動作は Fig. 5.17 (a) に示すように個々のピースに初期誤差が付加されていない状況下で教示したものをを用いる。また、個々のピースの仮置き台には作業台の隣に設置した木板を使用する。

以上のような条件下で行った立体パズルの組立作業の様子を Fig. 5.18 に示す。Fig. 5.18 (1) は組立作業開始前の様子を俯瞰したものであり、同図 (2) 以降で立体パズルの組立作業が行われている。Fig. 5.18 (2)~(8) はピース 1, (9)~(15) はピース 2, (16)~(22) はピース 3, (23)~(32) はピース 4, (33)~(44) はピース 5, (45)~(56) はピース 6, (57)~(63) はピース 7 のアライメント、把持、および組み付けを行っている様子である。

ピース 4 については (24)~(26) において二本の指のみを用いてアライメントを行い、(28)~(29) において組み付けのための最終的な把持を行っている。ピース 5 については (34)~(36) でアライメントを行い、(40), (41) で最終的な把持を行っている。なお、(37)~(39) ではアライメントを行った後、掴み直しを行うためピースを組み付け作業を行う作業台の端に移動させているが、これは掴み直しの際にハンドの指がアライメントを行った作業台と干渉するのを防ぐためである。ピース 6 についてもピース 5 と同様にして 2 ステップ把持を行っている。また、ピース 7 の組み付けについては 5.3 節で述べたように、組み付けが完了する直前の (62) においてハンドの指をピース 7 から離すことで実現している。なお、ハンドの指の速さは全てのピースに対する把持動作において 10[mm/s] としている。

Fig. 5.18 からわかるように、5.4.2 節で計画したロボスト把持戦略を用いることで三次元形状のピースを含む全てのピースについてその組み付け作業が成功し、立体パズルの組立作業を遂行することができた。以上より、組立作業において対象部品の初期位置・姿勢に誤差がある場合、ロボスト把持戦略が有効であることが示された。

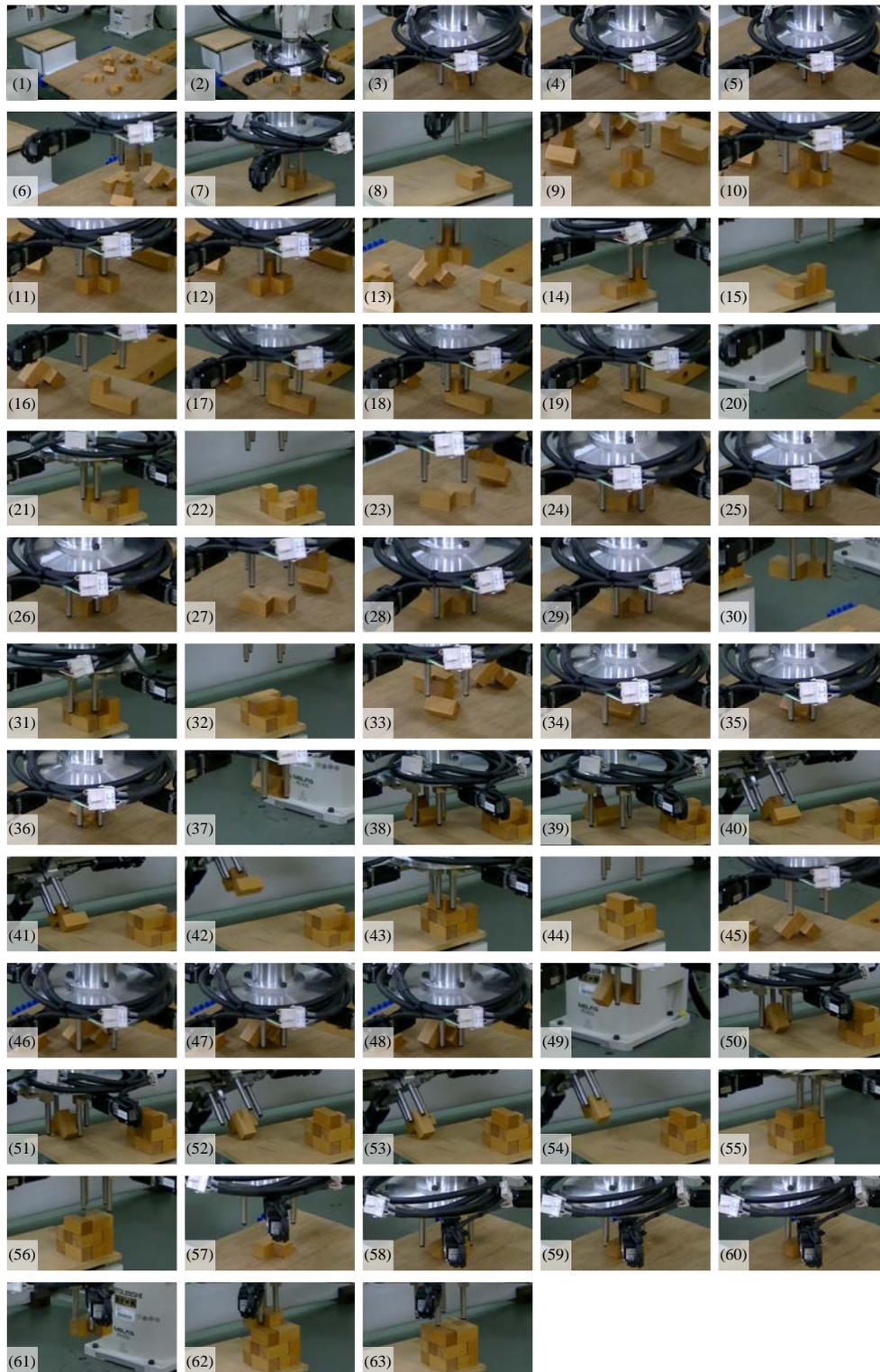


Fig. 5.18 Assembly of the three-dimensional puzzle by robust grasping strategies

## 5.6 結言

本章では、三次元形状を含む多形状の部品の組立作業において、個々の部品の初期位置・姿勢に不確定性があってもそれを吸収して目的の把持を確実に達成し、組立作業を遂行することができるようなロバスト把持戦略の計画手法を提案した。はじめに、三次元形状部品をロバストに把持するためのアプローチとしてアライメントから組み付けのための最終的な把持までを単一の把持戦略で行う1ステップ・ロバスト把持と、ある把持戦略でアライメントを行った後に持ち直しによって最終的な把持を行う2ステップ・ロバスト把持を提案するとともに、三次元形状部品のアライメントフェーズを解析するための方法を示した。そして、それらに基づいて組立作業を遂行することができるような把持戦略を計画するための手法を提案した。また、具体例として立体パズルの組立作業をとりあげ、提案手法に沿って把持戦略の計画を行った。さらに、計画した把持戦略の実環境におけるロバスト性を汎用ハンドを用いた実機実験によって確認するとともに、実際にロバスト把持戦略を用いて立体パズルの組立作業を行い、個々の部品の初期位置・姿勢に不確定性があっても組立作業の遂行が可能であることを示した。

今後の課題としては、工業製品など、より複雑な三次元形状部品を含む製品の組立作業を対象として把持戦略の計画を行うとともに、実機実験によって把持戦略のロバスト性と組立実験における有効性を検証する必要がある。なお、本章で扱った立体パズルの組立作業においては、第2章2.3節で明確化した組立作業に必要なハンドの機能のうち‘Grasp’のみが使用されており、‘Apply’、‘Support’といった機能が不要な場合であった。しかし、実製品の組み付け作業においてはそれら二つの機能も必要となる作業が多く存在するため、そのような組立作業を対象として検証を行う必要がある。

また、本章では部品がその安定姿勢を保持した状態でアライメントを行うとしているが、アライメントフェーズにおける部品の安定性の解析は行っていない。したがって、力学的な解析に基づき、安定姿勢を保持した状態での部品のアライメントの実現性について検証する必要がある。さらに、本章では安定姿勢で仮置きされた部品を別の安定姿勢で置き直したり持ち替えを行ったりする必要がない場合を扱ったが、実際の組立作業においては部品がそのような所望の安定姿勢以外の姿勢をとっている場合も起こり得る。したがって、そのような場合における置き直しや持ち替え操作の計画についても議論する必要がある。



## 第6章

### 結論

#### 6.1 本論文のまとめ

本論文では、ロボットセル生産システムにおける組立作業において、多種多様な形状の部品の初期位置・姿勢にある程度の不確定性があっても部品の初期不確定性をロバストに吸収し、最終的に組み付けに必要な精度での部品の把持を確実に達成することができるような汎用ハンドの設計と、その把持戦略の計画を系統的に行うための基礎的な手法を構築した。本節では、以下に本論文で得られた成果について述べる。

第2章では、組立作業を遂行することができる汎用ハンドを系統的に設計するための素地として、組立作業を行うために汎用ハンドに必要とされる機能・機構の明確化を行った。組立作業を遂行するために汎用ハンドに必要とされる機能・機構の明確化を行った。はじめに、モータドライバ、サーボモータ、電気ポットといった実際の製品を人がどのように組み立てるのかを仔細に観察し、その観察結果から人が組立作業を行っているときに用いている手の機能が‘Grasp’、‘Apply’、‘Support’の三種類に大別されることを見出した。そして、これらの機能を組立作業を行うために汎用ハンドにも必要とされる機能であると位置づけ、個々の機能を実現させるために必要となるハンドの機構について議論した。特に、‘Grasp’については幾何的な拘束であり把持した際の部品の位置・姿勢が一意に定まる form closure を適用し、多種多様な形状の部品を form closure によって把持するために円柱状の指を用いることとした。また、ある与えられた製品の組立作業を遂行するための汎用ハンドの機構を系統的に設計する手法を提案し、具体例としてモータドライバの組立作業を行うための汎用ハンドの機構を提案手法に則って設計した。

第3章では、第2章における議論から見出された機構を有する汎用ハンドによって対象部品の初期位置・姿勢に対する不確定性、すなわち初期誤差を吸収する過渡現象、すなわちアライメントが行われるフェーズをハンドの複数の指による対象物体の「押し操作」と捉え、これを準静的に解析した。そして、その解析結果に基づき、ある与えられた把持戦略のもとで汎用ハンドの指を動かしたときに、対象物体がどのように動くのかをシミュレートするための手法を提案した。また、この手法による把持シミュレーションを行うことで、与えられた把持戦略が吸収できる対象物体の初期誤差の範囲、すなわち許容初期誤差範囲を求める方法を示した。実際にロボットハンドを用いて円柱物体の把持実験を行い、理論的に導出した許容初期誤差範囲が実環境においても十分妥当なものであることを確認した。

第4章では、第3章において対象物体の運動が準静的であるとして無視していた物体の慣性や

ハンドの指との衝突といった動力的な要素が、把持戦略のロバスト性にどのような影響を与えるのかについて考察した。はじめに押し操作の動力的解析を行い、ハンドの指の動きから対象物体の動きをシミュレートする把持シミュレータを構築した。続いて、具体例として二つの異なる把持戦略による長方形物体の把持を採り上げ、把持シミュレータを用いることで対象物体と指との反発係数、対象物体と支持面の動摩擦係数、指の速さを表すパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の様々な値の組み合わせについて許容初期誤差範囲を求めた。そして、これらのパラメータが把持戦略のロバスト性に与える影響を分析し、把持戦略によってその影響が異なることを示した。なお、特に把持動作の過程で対象物体がハンドの指に囲まれる領域から逸脱しにくいような把持戦略であれば、そのロバスト性は動力的要素の影響を受けにくいことが示唆された。さらに、筆者らがこれまでに行ってきた準静的手法の適用性について考察を行ったところ、そのような把持戦略ならばパラメータ  $\epsilon$ ,  $\mu'$ ,  $k$  の値の変動に対してロバスト性の変化が小さいため、これらのパラメータの広い範囲の値に対して準静的手法が十分適用可能であることが示唆された。

第5章では、三次元形状を含む多形状部品の組立作業を実現できるようなロバストな把持戦略を計画するための手法を提案した。はじめに、三次元形状部品をロバストに把持するためのアプローチとしてアライメントから組み付けのための最終的な把持までを単一の把持戦略で行う1ステップ・ロバスト把持と、ある把持戦略でアライメントを行った後に持ち直しによって最終的な把持を行う2ステップ・ロバスト把持を提案するとともに、三次元形状部品のアライメントフェーズを解析するための方法を示した。そして、それらに基づいて組立作業を遂行することができるような把持戦略を計画するための手法を提案した。また、具体例として立体パズルの組立作業をとりあげ、提案手法に沿って把持戦略の計画を行った。さらに、計画した把持戦略の実環境におけるロバスト性を汎用ハンドを用いた実機実験によって確認するとともに、実際にロバスト把持戦略を用いて立体パズルの組立作業を行い、個々の部品の初期位置・姿勢に不確定性があっても組立作業の遂行が可能であることを示した。

## 6.2 今後の課題

本節では、本論文の各章で述べた内容についての課題点をまとめるとともに、本研究全体に対する今後の課題について述べる。はじめに、各章における課題点を述べる。

第2章において提案した汎用ハンドの機構の設計手法については、具体例としてモータドライブ組立用汎用ハンドの機構を設計したが、その機構によって実際に組立作業を遂行することができるかどうかについては未検証である。したがって、設計した汎用ハンドを実際に製作し、それを用いて実機実験を行うことで、汎用ハンドによる組立作業の実現性を確認する必要がある。また、現状では‘Grasp’, ‘Apply’, ‘Support’のそれぞれについて定量的な力学的解析を行っていないため、設計した機構で目的とする把持や組み付け作業を安定して行うことができるかどうかを解析に基づいて検証する必要がある。

第3章では、ある与えられた把持戦略が許容できる対象物体の初期誤差範囲を求める順問題を解く手法を提案し、第5章5.4節においては第3章で構築した把持シミュレータを用いて筆者らが最終的な把持戦略を決定した。したがって、5.4節における把持戦略は必ずしも最適なものではなかった可能性がある。最適な把持戦略を求めるためには、与えられたある初期誤差範囲を許容できるような把持戦略を求める問題、すなわち逆問題を解く必要がある。逆問題を直接解くことは困難

であるが、順問題の解を利用することで逆問題を探索的に解き、最適な把持戦略を導出することは原理的に可能である。実際に、筆者らはそのような手法を提案し、具体例としてチャック型三本指ハンドによる円柱物体の把持を対象とした最適ロバスト把持戦略の導出を行っている [40]。なお、その具体例においては把持戦略を表すパラメータをハンドの指のストローク、指の閉じる速さ、そしてハンドを取り付けたロボットアームの最終軸の回転によるハンドの回転角速度に限定しているが、一般に把持戦略は無制限に存在するため、そのような制約条件がない場合には探索空間が爆発してしまう。したがって、逆問題を解く際の探索空間の制限方法について議論する必要がある。

第4章では、アライメントフェーズを動力学的にシミュレートすることが可能な把持シミュレータを構築したが、シミュレーション結果が妥当なものであるかどうかについては未検証である。したがって、動力学的把持シミュレーションの結果の妥当性を検証するために実機実験を行い、シミュレーションと実験の結果を比較する必要がある。また、第4章では動力学的要素が把持戦略のロバスト性に与える影響ならびに準静的解析手法の適用性について、異なる二つの把持戦略による長方形物体の把持を例題として議論したが、例題から得られた結果が異なる把持戦略を用いた場合や、他の形状を有する物体の把持動作についても当てはまるかどうかということについては確認されていない。よって、把持戦略ならびに対象物体の形状を様々に変化させて動力学的把持シミュレーションを行い、第4章で得られた結果の普遍性について検証する必要がある。

第5章では、多形状部品の組立作業の例題として立体パズルの組立作業をとりあげたが、今後は工業製品など、より複雑な三次元形状部品を含む製品の組立作業を対象として把持戦略の計画を行うとともに、実機実験によって把持戦略のロバスト性と組立実験における有効性を検証する必要がある。なお、第5章で扱った立体パズルの組立作業においては、第2章2.3節で明確化した組立作業に必要なハンドの機能のうち‘Grasp’のみが使用されており、‘Apply’、‘Support’といった機能が不要な場合であった。しかし、実製品の組み付け作業においてはそれら二つの機能も必要となる作業が多く存在するため、そのような組立作業を対象として検証を行う必要がある。

最後に、本研究全体に対する今後の課題について述べる。本論文では、汎用ハンドの機構の設計とロバスト把持戦略を系統的に計画するための基礎的な手法を構築したが、現状では結果として得られる汎用ハンドの機構ならびに把持戦略はいずれも設計者の裁量に依存する可能性がある。設計者の負担をできるだけ小さくし、機構の設計・把持戦略の計画を効率よく、そして確実に行うためには、これらの作業をある程度自動化することが望まれる。

機構の設計については、組立作業の個々の工程に応じて一から新たな機構を自動的に設計することは現実的に困難であると考えられる。これに対しては、たとえば本論文で見出した‘Grasp’、‘Apply’、‘Support’を実現するための基本要素となる機構を予め複数設定しておき、その中から組立作業に必要となるものを選定して最終的に統合するという方法が考えられる。これを実現するためには、基本要素となる機構としてどのようなものが必要となるのかを議論し、また、それらの中から選定されたものを統合するためのアルゴリズムを構築する必要がある。把持戦略の計画については、先に第3章についての課題点として述べたような逆問題を解くアルゴリズムを構築することができれば、これを用いて自動化を図ることができると期待される。

本論文で得られた成果を素地として以上を実現することができれば、現状のロボットセル生産システムの重要課題となっている汎用ハンドの開発と把持戦略の計画を効率的に、そして確実に行うことが可能となり、その結果人セル生産からロボットセル生産への移行の促進に大いに貢献することができると考えられる。



## 付録 A

# 準静的押し操作において対象物体の運動が 並進/回転運動であるための条件

Mason[28] や吉川 [29] らは、一点接触による物体の押し操作において対象物体が運動する際、指先力の作用線が対象物体の摩擦中心を通ることが対象物体の運動が並進運動のみであるための必要十分条件であると述べており、このことは文献 [28][29][34] において事実として用いられているが、文献 [28][29] における証明では、「指先力の作用線が摩擦中心を通ること」が「物体の運動が並進運動のみである」ための必要条件であることは示されているものの、十分条件であることが正しく示されていない。また、先行研究においては、多点接触による押し操作について上記の一点接触の場合の条件に相当する条件は議論されていない。

そこで、本付録では押し操作における接触点数を一般化した上で、対象物体の運動が並進運動のみであるための必要十分条件、および回転運動であるための必要十分条件を明確に示す。

### A.1 物体の運動が並進運動のみであるための必要条件

本節では、「対象物体がある時刻において並進運動のみ行う」ための必要条件が、「その時刻において、指先力により対象物体に働く、摩擦中心の周りの合モーメントが 0 となる」であることを示す。ここで、この条件は Mason[28] や吉川 [29] らが述べた一点接触による押し操作における条件を、多点接触の場合に拡張したものであることに注意されたい。

$\Sigma_0$  から見た  $\Omega$  内の任意の点 P の位置を  ${}^0\mathbf{x}_P$  とすると、物体座標系  $\Sigma_0$  から見た対象物体の摩擦中心の位置  ${}^0\mathbf{x}_{\text{COF}}$  は

$${}^0\mathbf{x}_{\text{COF}} = \int_{\Omega} \mu p {}^0\mathbf{x}_P d\Omega \left( \int_{\Omega} \mu p d\Omega \right)^{-1} \quad (\text{A.1})$$

で与えられる。ただし、式 (A.1) は Mason による摩擦中心の定義 [28] を拡張した、吉川らの定義 [29] に基づいている。物体座標系  $\Sigma_0$  の原点を対象物体の摩擦中心にとっても一般性は失われないので、以下では  ${}^0\mathbf{x}_{\text{COF}} = \mathbf{0}$  とする。なお、 ${}^0\mathbf{x}_{\text{COF}} \neq \mathbf{0}$  である場合でも、本節と同様の議論による証明が可能である。

支持面からの摩擦力により対象物体に働く、摩擦中心の周りの合モーメント  $m_{S,\text{COF}}$  は次式で与えられる。

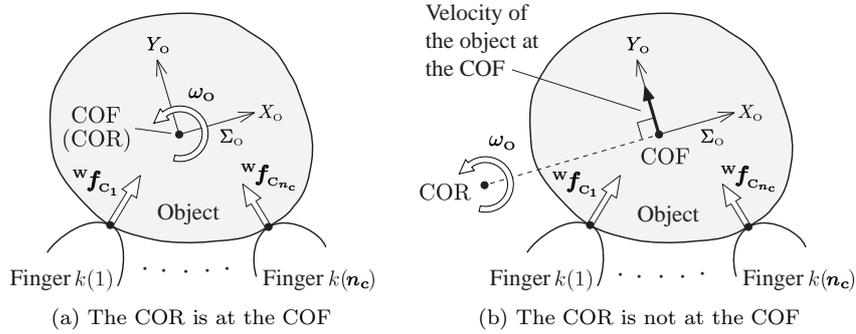


Fig. A.1 Two cases when the object has a rotational motion component

$$m_{s,COF} = - \int_{\Omega} \mu p \, {}^o \mathbf{x}_P \times {}^o \hat{\mathbf{v}}_P \, d\Omega \quad (\text{A.2})$$

ただし、 ${}^o \hat{\mathbf{v}}_P$  は  $\Sigma_0$  から見た点 P における支持面に対する対象物体の速度方向の単位ベクトルである。ここで、式 (3.4) の Q を物体の摩擦中心として両辺の第三行目の成分のみを取り出すと、物体に働く摩擦中心の回りのモーメントについて次の釣り合い式が得られる。

$$\sum_{i=1}^{n_c} m_{C_i,COF} + m_{s,COF} = 0 \quad (\text{A.3})$$

対象物体が並進運動のみ行う場合、 $\Sigma_0$  から見た物体の速度は  $\Omega$  内の任意の点 P において一定であり、したがって速度方向の単位ベクトル  ${}^o \hat{\mathbf{v}}_P$  も  ${}^o \mathbf{x}_P$  に依らず一定である。このとき、式 (A.1)、(A.2) および  ${}^o \mathbf{x}_{COF} = \mathbf{0}$  であることを用いると、次式が成立する。

$$m_{s,COF} = - \int_{\Omega} \mu p \, d\Omega \, {}^o \mathbf{x}_{COF} \times {}^o \hat{\mathbf{v}}_P = 0 \quad (\text{A.4})$$

式 (A.3)、(A.4) より、指先力によって対象物体の摩擦中心の回りに働く合モーメントは、次のようになる。

$$\sum_{i=1}^{n_c} m_{C_i,COF} = 0 \quad (\text{A.5})$$

よって、「対象物体がある時刻において並進運動のみ行うならば、その時刻において指先力により対象物体に働く、摩擦中心の回りの合モーメントは 0 となる」ことが示された。

なお、 $n_c = 1$  の場合には、「摩擦中心の回りの合モーメントは 0 となる」ことは「指先力の作用線が摩擦中心を通る」ことに帰着されることに注意されたい。

## A.2 物体の運動が並進運動のみであるための十分条件

本節では、「対象物体がある時刻において並進運動のみ行う」ための十分条件が、「その時刻において、指先力により対象物体に働く、摩擦中心の回りの合モーメントが 0 となる」であることを、背理法により示す。すなわち、「ある時刻において指先力により対象物体に働く、摩擦中心の回りの

合モーメントが0となる場合にも、「対象物体にある回転運動が生じる」と仮定すると矛盾が生じることを示す。

本節においても A.1 と同様に、物体座標系  $\Sigma_o$  の原点が対象物体の摩擦中心に一致している、すなわち  ${}^o\mathbf{x}_{\text{COF}} = \mathbf{0}$  であるとするが、 ${}^o\mathbf{x}_{\text{COF}} \neq \mathbf{0}$  である場合でも、本節と同様の議論により証明を行うことは可能である。

仮定より、式 (A.3) の左辺の第1項は0であるから、

$$m_{\text{S,COF}} = 0 \quad (\text{A.6})$$

となる。ここで、 $\Sigma_o$  から見た物体の回転中心 (center of rotation, COR) の位置を  ${}^o\mathbf{x}_{\text{COR}}$  とおく。今、Fig. A.1 (a) に示すように回転中心がたまたま物体の摩擦中心に一致している、すなわち  ${}^o\mathbf{x}_{\text{COR}} = {}^o\mathbf{x}_{\text{COF}}$  であるとする、 $\Sigma_o$  から見た  $\Omega$  内の任意の点 P における物体の速度は  $\omega_o \otimes {}^o\mathbf{x}_P$  と表されるから、速度方向の単位ベクトル  ${}^o\hat{\mathbf{v}}_P$  は次式で与えられる。

$${}^o\hat{\mathbf{v}}_P = \frac{\omega_o \otimes {}^o\mathbf{x}_P}{\|\omega_o \otimes {}^o\mathbf{x}_P\|} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.2) に式 (A.7) を代入すると、次式が得られる。

$$m_{\text{S,COF}} = -\text{sgn}(\omega_o) \int_{\Omega} \mu p \|\omega_o \otimes {}^o\mathbf{x}_P\| d\Omega \quad (\text{A.8})$$

ただし、 $\text{sgn}(\omega_o)$  は  $\omega_o$  の値が正のときには1、 $\omega_o$  の値が負のときには-1となる。式 (A.8) の右辺の積分項は正の値をとるため、 $m_{\text{S,COF}}$  の値が0となることはなく、式 (A.6) に矛盾する。

続いて、Fig. A.1 (b) に示すように対象物体が摩擦中心以外の点を回転中心として回転運動を行うと仮定する。回転中心が摩擦中心以外の点にあるので、摩擦中心において対象物体は必ずある方向に並進速度を持つ。Fig. A.1 に示すように  $\Sigma_o$  の  $Y_o$  軸の正の方向をその速度方向に一致するようにとると、回転中心は  $\Sigma_o$  の  $X_o$  軸上に位置し、 ${}^o\mathbf{x}_{\text{COR}} = [{}^o x_{\text{COR}}, 0]^T$  と表される。ここで、 ${}^o x_{\text{COR}}$  は  ${}^o\mathbf{x}_{\text{COR}}$  の  $x$  成分であり、回転中心が摩擦中心以外の点であることから、 ${}^o x_{\text{COR}} \neq 0$  である。

物体座標系  $\Sigma_o$  から見た  $\Omega$  内の任意の点 P における物体の速度は  $\omega_o \otimes ({}^o\mathbf{x}_P - {}^o\mathbf{x}_{\text{COR}})$  と表されるから、速度方向の単位ベクトル  ${}^o\hat{\mathbf{v}}_P$  は次式で与えられる。

$${}^o\hat{\mathbf{v}}_P = \frac{\omega_o \otimes ({}^o\mathbf{x}_P - {}^o\mathbf{x}_{\text{COR}})}{\|\omega_o \otimes ({}^o\mathbf{x}_P - {}^o\mathbf{x}_{\text{COR}})\|} \quad (\text{A.9})$$

式 (A.2) に式 (A.9) を代入すると、次式が得られる。

$$m_{\text{S,COF}} = -\text{sgn}(\omega_o) \int_{\Omega} \mu p \frac{N}{D} d\Omega \quad (\text{A.10})$$

ここで、 $D, N$  はそれぞれ式 (A.11), (A.12) で与えられる。

$$D = \sqrt{({}^o x_P - {}^o x_{\text{COR}})^2 + {}^o y_P^2} \quad (\text{A.11})$$

$$N = {}^o x_P ({}^o x_P - {}^o x_{\text{COR}}) + {}^o y_P^2 \quad (\text{A.12})$$

ただし、 ${}^o x_P, {}^o y_P$  はそれぞれ  ${}^o\mathbf{x}_P$  の  $x$  成分、 $y$  成分である。 $m_{\text{S,COF}}$  を  ${}^o x_{\text{COR}}$  の関数とみなして式 (A.10) の両辺を  ${}^o x_{\text{COR}}$  で微分すると、次式が得られる。

$$\frac{d m_{\text{S,COF}}}{d {}^o x_{\text{COR}}} = \text{sgn}(\omega_o) \int_{\Omega} \mu p \frac{{}^o y_P^2}{D^3} d\Omega \quad (\text{A.13})$$

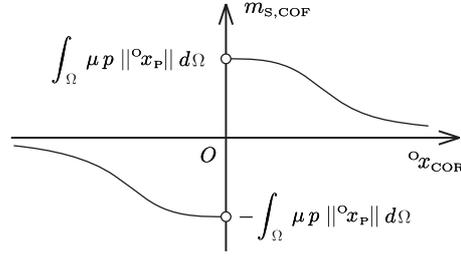


Fig. A.2 Outline plot of the total frictional moment  $m_{S,COF}$

摩擦中心における対象物体の速度方向が  $Y_O$  軸の正の方向に一致することから、 ${}^o x_{COR} < 0$  のときは  $\omega_O > 0$ 、 ${}^o x_{COR} > 0$  のときは  $\omega_O < 0$  となるので、 $\text{sgn}(\omega_O) {}^o x_{COR}$  は常に負の値をとる。また、4.3.1 節の仮定 (2) より  $\Omega$  内のすべての点 P で  ${}^o y_P$  の値が 0 であることはなく、かつまた 4.3.1 節の仮定 (4) より  $\mu p$  が常に正の値をとることに注意すると、式 (A.13) の右辺の積分項は正の値をとることがわかる。よって、任意の  ${}^o x_{COR} \neq 0$  について次式が成立する。

$$\frac{d m_{S,COF}}{d {}^o x_{COR}} < 0 \quad (\text{A.14})$$

式 (A.14) より、 $m_{S,COF}$  は  ${}^o x_{COR}$  について単調減少することがわかる。また、式 (A.10) より、 $m_{S,COF}$  についての関係式 (A.15)~(A.17) が得られる。

$$\lim_{{}^o x_{COR} \rightarrow \pm\infty} m_{S,COF} = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$\lim_{{}^o x_{COR} \rightarrow +0} m_{S,COF} = \int_{\Omega} \mu p \|{}^o \mathbf{x}_P\| d\Omega \quad (\text{A.16})$$

$$\lim_{{}^o x_{COR} \rightarrow -0} m_{S,COF} = - \int_{\Omega} \mu p \|{}^o \mathbf{x}_P\| d\Omega \quad (\text{A.17})$$

式 (A.14)~(A.17) より、 ${}^o x_{COR}$  の関数として見た  $m_{S,COF}$  のグラフの概形は Fig. A.2 に示すようになる。グラフからも明らかのように、 $m_{S,COF}$  は任意の  ${}^o x_{COR} \neq 0$  について 0 となることはない。これは式 (A.6) に矛盾する。

摩擦中心における対象物体の速度方向をどの方向に仮定しても、以上の議論は同様に行うことができるので、対象物体の回転中心が摩擦中心以外の任意の点であるとき、 $m_{S,COF}$  が 0 とならないことが言える。これも式 (A.6) に矛盾する。

以上のように対象物体が回転運動すると仮定すると、その回転中心が摩擦中心に一致しても、またそれ以外の点にあっても、摩擦中心の回りの合モーメントが 0 という条件と矛盾するので、「指先力により対象物体に働く、摩擦中心の回りの合モーメントが 0 となる場合、対象物体の運動は回転運動ではない、すなわち対象物体の運動は並進運動のみである」ことが示された。なお、 $n_c = 1$  の場合には「指先力により対象物体に働く、摩擦中心の回りの合モーメントが 0 となる」ことが「指先力の作用線が摩擦中心を通る」ことに帰着されるので、以上に示したことは「指先力の作用線が摩擦中心を通る場合、対象物体の運動は並進運動のみである」ことを意味する。

### A.3 物体の運動が回転運動であるための必要条件

A.2 節の命題の対偶をとることにより、「対象物体がある時刻において回転運動を行う」ための必要条件が、「その時刻において、指先力により対象物体に働く、摩擦中心の回りの合モーメントが 0 でない」であることが示される。

### A.4 物体の運動が回転運動であるための十分条件

A.1 節の命題の対偶をとることにより、「対象物体がある時刻において回転運動を行う」ための十分条件が、「その時刻において、指先力により対象物体に働く、摩擦中心の回りの合モーメントが 0 でない」ことが示される。



## 付録B

### 動力学的押し操作解析の定式化に関する補足式

本節では、4.3.2節の式(4.2)中のスカラ  $l_i$ 、ならびに式(4.3)中の  $\mathbf{w}_s$  を与える式を順に示す。式(4.2)中のスカラ  $l_i$  ( $i=1, 2, \dots, n_c$ ) は次式で与えられる。

$$l_i = -{}^w\mathbf{n}_{C_i}^T {}^w\mathbf{x}_{O,C_i}'' \dot{s}_i^2 - 2\omega_O \dot{s}_i + \omega_O^2 {}^w\mathbf{n}_{C_i}^T {}^w\mathbf{x}_{O,C_i} + {}^w\mathbf{n}_{C_i}^T {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}'' \dot{u}_i^2 - 2\omega_{F_{k(i)}} \dot{u}_i - \omega_{F_{k(i)}}^2 {}^w\mathbf{n}_{C_i}^T {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i} \quad (\text{B.1})$$

ここで、ベクトル  ${}^w\mathbf{x}_{O,C_i}''$ ,  ${}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}''$  はそれぞれ  ${}^w\mathbf{x}_{O,C_i}'' = d^2 {}^w\mathbf{x}_{O,C_i} / d s_i^2$ ,  ${}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}'' = d^2 {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i} / d u_i^2$  で与えられる。ただし、 ${}^o\mathbf{x}_{C_i}(s_i)$  は  $C^2$  級であると仮定している。スカラ  $\omega_O$ ,  $\omega_{F_{k(i)}}$  はそれぞれ対象物体と指  $k(i)$  の回転角速度を表している。また、 $\dot{s}_i$ ,  $\dot{u}_i$  はそれぞれ対象物体と指の輪郭上での接触点  $C_i$  の移動速度を表しており、文献[32]と同様にして導出される以下の式で与えられる。

$$\dot{s}_i = \frac{1}{{}^w\mathbf{n}_{C_i}^T ({}^w\mathbf{x}_{O,C_i}'' - {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}'')} \left\{ \omega_{F_{k(i)}} - \omega_O - ({}^w\mathbf{n}_{C_i}^T {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}'') {}^w\mathbf{n}_{C_i} \times ({}^w\mathbf{v}_O - {}^w\mathbf{v}_{F_{k(i)}} + \omega_O \otimes {}^w\mathbf{x}_{O,C_i} - \omega_{F_{k(i)}} \otimes {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}) \right\} \quad (\text{B.2})$$

$$\dot{u}_i = \frac{1}{{}^w\mathbf{n}_{C_i}^T ({}^w\mathbf{x}_{O,C_i}'' - {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}'')} \left\{ \omega_O - \omega_{F_{k(i)}} + ({}^w\mathbf{n}_{C_i}^T {}^w\mathbf{x}_{O,C_i}'') {}^w\mathbf{n}_{C_i} \times ({}^w\mathbf{v}_O - {}^w\mathbf{v}_{F_{k(i)}} + \omega_O \otimes {}^w\mathbf{x}_{O,C_i} - \omega_{F_{k(i)}} \otimes {}^w\mathbf{x}_{F_{k(i)},C_i}) \right\} \quad (\text{B.3})$$

ベクトル  ${}^w\mathbf{v}_O$ ,  ${}^w\mathbf{v}_{F_{k(i)}}$  はそれぞれ  $\Sigma_W$  から見た  $\Sigma_O$  と  $\Sigma_{F_{k(i)}}$  の原点の並進速度を表す。また、演算子 ' $\otimes$ ' は任意のスカラ  $\alpha$  と任意の二次元ベクトル  $\boldsymbol{\beta} = [\beta_x, \beta_y]^T$  についてベクトル  $\alpha \otimes \boldsymbol{\beta} = \alpha [-\beta_y, \beta_x]^T$  を求めるためのものである。

なお、 ${}^o\mathbf{x}_{C_i}$  が  $C^2$  級でない場合でも式(4.2)中の  $l_i$  は同様に計算することができるが、本論文では紙面の都合上そのような場合についての説明は割愛する。

続いて、式(4.3)中の  $\mathbf{w}_s$  は次式で与えられる。

$$\mathbf{w}_s = \begin{bmatrix} -\int_{\Omega} \mu'_P p_P {}^w\hat{\mathbf{v}}_P d\Omega \\ -\int_{\Omega} \mu'_P p_P {}^w\mathbf{x}_{O,P} \times {}^w\hat{\mathbf{v}}_P d\Omega \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

ここで、 $\Omega$  は対象物体と支持面の接触領域、 $\mu'_P$  ( $0 \leq \mu'_P \leq 1$ ) は  $\Omega$  内の任意の点  $P$  における対象物体と支持面との動摩擦係数、 $p_P$  ( $p_P > 0$ ) は  $\Omega$  内の任意の点  $P$  において対象物体が支持面から受ける鉛直方向の圧力の大きさ、 ${}^w\mathbf{x}_{O,P}$  は  $\Sigma_W$  から見た、 $\Sigma_O$  の原点から点  $P$  へ向かうベクトルを表す。

また、 ${}^w\hat{\boldsymbol{v}}_P$  は  $\Sigma_w$  から見た、点 P における対象物体の速度方向の単位ベクトルであり、次式で与えられる。

$${}^w\hat{\boldsymbol{v}}_P = \frac{{}^w\boldsymbol{v}_O + \omega_O \otimes {}^w\boldsymbol{x}_{O,P}}{\|{}^w\boldsymbol{v}_O + \omega_O \otimes {}^w\boldsymbol{x}_{O,P}\|} \quad (\text{B.5})$$

ただし、 $\|\cdot\|$  は任意のベクトルのノルムを表す。

## 参考文献

- [1] 三菱電機姫路製作所紹介パンフレット. 三菱電機株式会社, 2011.
- [2] 富岡恒憲, 近岡裕, 木崎健太郎: “ロボットで反撃する日本工場”, 日経ものづくり, 5月号, pp.50-85, 2008.
- [3] 小島悟理, 橋本秀紀: “3次元CADデータ駆動型組立ロボットセルシステムの構築に関する研究—機能モジュール間のAMDインターフェース開発とAMDの評価—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99講演論文集, 1P2-20-011, 1999.
- [4] 前田雄介, 井澤秀益, 池田優, 新井民夫: “マルチエージェント・アーキテクチャによる柔軟な組立ロボットセル”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集, 2P2-3F-C3, 2003.
- [5] 藤田俊弘, 樋口伸夫, 菅野祥人, 林弘之: “多品種変量生産に最適な千手観音モデルによるロボット制御セル生産システム”, 日本ロボット工業会機関誌ロボット, no.173, pp.7-14, 2006.
- [6] 松岡眞, 清水武, 北島功朗, 渡部透: “ロボットセル生産システム”, 日本ロボット工業会機関誌ロボット, no.173, pp.21-26, 2006.
- [7] 山口賢治, 山梨光司: “ファナックロボットセル”, 日本ロボット工業会機関誌ロボット, no.173, pp.27-31, 2006.
- [8] 野田哲男, 奥田晴久, 田中健一, 永谷達也, 北明靖雄, 堂前幸康, 榎木哲夫, 横小路泰義, 堀口由貴男, 幸田武久, 宇津野秀夫, 松久寛, 水山元, 小森雅晴, 泉井一浩, 西脇眞二: “次世代セル生産を実現するロボット知能化技術”, 第10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論文集, pp.766-769, 2009.
- [9] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, G. Hirzinger: “DLR-Hand II: next generation of a dextrous robot hand,” Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.109-114, 2001.
- [10] H. Kawasaki, T. Komatsu, K. Uchiyama: “Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.7, no.3, pp.296-303, 2002.
- [11] Shadow Robot Company: “Shadow Hand range,” <http://www.shadowrobot.com/hand/overview.shtml>

- 
- [12] W. Townsend: "The BarrettHand grasper—programmably flexible part handling and assembly," *Industrial Robot: An International Journal*, vol.27, no.3, pp.181-188, 2000.
- [13] IDEC: "MH1A 形 マルチハンド", <http://www.idec.com/jpja/promo/hand/index.html#header>
- [14] R. Brown, R. Brost: "A 3-D Modular Gripper Design Tool," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.15, no.1, pp.174-186, 1999.
- [15] A.S. Wallack, J.F. Canny: "Modular fixture design for generalized polyhedra," *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.1, pp.830-837, 1996.
- [16] L. Balan, G. Bone: "Automated Gripper Jaw Design and Grasp Planning for Sets of 3D Objects," *Journal of Robotic Systems*, vol.20, no.3, pp.147-162, 2003.
- [17] R.C. Brost: "Automatic Grasp Planning in the Presence of Uncertainty," *The International Journal of Robotics Research*, vol.7, no.1, pp.3-17, 1988.
- [18] K. Goldberg: "Orienting Polygonal Parts Without Sensors," *Algorithmica*, vol.10, pp.201-225, 1993.
- [19] Z. Balorda, T. Bajd: "Reducing Positioning Uncertainty of Objects by Robot Pushing," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.10, no.4, pp.535-541, 1994.
- [20] M. Dogar, S. Srinivasa: "Push-Grasping with Dexterous Hands: Mechanics and a Method," *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, WeAT2.5*, 2010.
- [21] 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允: "グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現", *日本ロボット学会誌*, vol.14, no.1, pp.114-121, 1996.
- [22] 野田哲男, 堂前幸康, 永谷達也, 長野陽, 田中健一: "ロボットによるバラ積み部品供給", 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC3B2-2, 2011.
- [23] V. Nguyen: "Constructing Force-Closure Grasps," *International Journal of Robotics Research*, vol.7, no.3, pp. 3-16, 1988.
- [24] F. Reuleaux: *The Kinematics of Machinery*. Macmillan, New York, 1876.
- [25] X. Markenscoff, L. Ni, C.H. Papadimitriou: "The geometry of grasping," *The International Journal of Robotics Research*, vol.9, no.1, pp.61-74, 1990.
- [26] E. Rimon, J.W. Burdick: "Mobility of Bodies in Contact—Part I: A 2nd-Order Mobility Index for Multiple-Finger Grasps," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.14, no.5, pp.696-708, 1998.
- [27] W.D. MacMillan: *Dynamics of Rigid Bodies*. pp.146-152, Dover Publications, 1936.

- 
- [28] M.T. Mason: "Mechanics and Planning of Manipulator Pushing Operations," The International Journal of Robotics Research, vol.5, no.3, pp.53-71, 1986.
- [29] 吉川恒夫, 栗栖正充: "対象物押し操作にもとづく摩擦力分布の推定法", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.632-638, 1992.
- [30] J.D. Bernhisel, K.M. Lynch: "Stable Transport of Assemblies: Pushing Stacked Parts," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol.1, no.2, 2004.
- [31] K. Harada: "Pushing Manipulation for Multiple Objects," Transactions of the ASME, vol.128, no.2, pp.422-427, 2006.
- [32] Y.B. Jia, M. Erdmann: "Pose and Motion from Contact," The International Journal of Robotics Research, vol.18, no.5, pp.466-487, 1999.
- [33] M.A. Peshkin, A.C. Sanderson: "The Motion of a Pushed, Sliding Workpiece," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.4, no.6, pp.569-598, 1988.
- [34] 吉川恒夫, 栗栖正充, 水野光政: "ロボットによる対象物の押し作業の最適計画", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.6, pp.846-852, 1996.
- [35] S. Akella, M.T. Mason: "Posing Polygonal Objects in the Plane by Pushing," The International Journal of Robotics Research, vol.17, no.1, pp.70-88, 1998.
- [36] Y. Maeda, T. Arai: "Planning of grasplless manipulation by a multifingered robot hand," Advanced Robotics, vol.19, no.5, pp.501-521, 2005.
- [37] M.T. Mason: "On the Scope of Quasi-Static Pushing," International Symposium on Robotics Research, pp.229-233, 1986.
- [38] 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.
- [39] 土橋宏規: "物体の押し操作解析に基づく組立作業用汎用ハンドの把持戦略の検討", 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻修士学位論文, 2009.
- [40] H. Dobashi, A. Noda, Y. Yokokohji, H. Nagano, T. Nagatani, H. Okuda: "Derivation of Optimal Robust Grasping Strategy under Initial Object Pose Errors," Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, WeAT2.1, 2010.
- [41] Y. Wang, M. Mason: "Modeling Impact Dynamics for Robotic Operations," Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.678-685, 1987.
- [42] S. Su, I. Uzmay: "Dynamic Model for High-speed Pushing as a Manipulator Operation," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.850-855, 1998.

- [43] D. Baraff: "Analytical Methods for Dynamic Simulation of Non-penetrating Rigid Bodies," Computer Graphics, vol.23, no.3, pp.223-232, 1989.
- [44] R. Smith: "Open Dynamics Engine," <http://opende.sourceforge.net/>
- [45] S. Hasegawa, M. Sato: "Real-time Rigid Body Simulation for Haptic Interactions Based on Contact Volume of Polygonal Objects," Computer Graphics Forum, vol.23, no.3, pp.529-538, 2004.
- [46] A. Miller, P. Allen: "Graspit!: A versatile simulator for grasping analysis," Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, vol.2, pp.1251-1258, 2000.
- [47] 山田秀: 実験計画法 -方法編-, 日科技連, 東京, 2004.

# 関連業績一覧

## 1 学術論文

- [1] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 奥田晴久: “準静的押し操作解析に基づく多指ハンドによる把持シミュレーションと対象物体の許容初期誤差範囲の導出”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.10, pp.1201-1212, 2010.
- [2] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “動力学的押し操作解析に基づくロバスト把持戦略の考察”, 計測自動制御学会論文集 (再投稿準備中).
- [3] H. Dobashi, J. Hiraoka, Y. Yokokohji A. Noda, H. Nagano, T. Nagatani, H. Okuda, K. Tanaka: “Assembly of Variously Shaped Parts By Robust Grasping,” Advanced Robotics (投稿準備中).
- [4] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “ロボットセルにおける組立作業のための汎用ハンドの設計”, 日本ロボット学会誌 (投稿準備中).

## 2 国際会議論文 (査読あり)

- [1] H. Dobashi, Y. Yokokohji, A. Noda, H. Okuda: “Permissible Initial Pose Error Region of an Object Grasped by a Universal Hand,” Proceedings of 2010 International Symposium on Flexible Automation, JPL-2452, 2010.
- [2] A. Noda, K. Tanaka, H. Okuda, T. Nagatani, Y. Kitaaki, Y. Domae, H. Dobashi, Y. Yokokohji, K. Kurono, Y. Horiguchi, H. Nakanishi, T. Sawaragi, K. Isomura, H. Utsuno, H. Matsuhisa, S. Kazama, T. Kohda: “Intelligent Robot Technologies for Cell Production System,” Proceedings of 2010 International Symposium on Flexible Automation, JPS-2562, 2010.
- [3] H. Dobashi, A. Noda, Y. Yokokohji, H. Nagano, T. Nagatani, H. Okuda: “Derivation of Optimal Robust Grasping Strategy under Initial Object Pose Errors,” Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, WeAT2.1, 2010.

### 3 国内学会論文

- [1] 土橋宏規, 横小路泰義, 前川清石: “ロボットセル生産システムの為の汎用ハンドの設計手法”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3M25, 2007.
- [2] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 奥田晴久: “物体の押し操作解析に基づく組立作業用汎用ハンドのロバスト把持戦略”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC1F2-01, 2008.
- [3] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 奥田晴久: “ロボットセルにおける組立作業用汎用ハンドの設計手法”, 電子情報通信学会技術研究報告ヒューマン情報処理, vol.108, no.282, pp.177-182, 2008.
- [4] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 奥田晴久: “組立作業ロボットの汎用ハンドライブラリ構築のためのロバスト把持戦略の検討”, 第 9 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論文集, pp.189-190, 2008.
- [5] 土橋宏規, 野田哲男, 横小路泰義, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “能動探索アルゴリズムによる組立作業用汎用ハンドのロバスト把持戦略の最適化”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, AC1D2-03, 2009.
- [6] 土橋宏規, 野田哲男, 横小路泰義, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “把持シミュレーションに基づく組立作業用汎用ハンドのロバスト把持戦略の実験的評価”, 第 10 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論文集, pp.777-778, 2009.
- [7] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “動力的押し操作解析に基づく把持戦略のロバスト性の考察”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC3P1-2, 2010.
- [8] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “動力的押し操作解析に基づく準静的把持動作解析の妥当性の検証”, 第 53 回自動制御連合講演会, pp.1192-1196, 2010.
- [9] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “対象物体の初期誤差に対する把持戦略のロバスト性への動力的要素の影響”, 第 11 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論文集, pp.696-699, 2010.
- [10] 土橋宏規, 平岡隼一, 横小路泰義, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “ロボットセル生産のためのロバスト把持戦略を用いた三次元形状物体を含む多形状物体の組立作業”, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC3B2-3, 2011.
- [11] 土橋宏規, 平岡隼一, 横小路泰義, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一: “ロボットセルにおける組立作業のためのロバスト把持戦略の計画手法”, 第 12 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論文集, pp.358-361, 2011.

## 4 開発したもの

- [1] “ハンドライブラリモジュール”, RTC 再利用 Web ID:337, <http://www.openrtp.jp/reuse-web/top.php>, 2011.

## 5 賞罰

- [1] 第 11 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 SI2010 優秀講演賞, 2010.
- [2] 第 12 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 SI2011 優秀講演賞, 2011.
- [3] 2011 年度計測自動制御学会学会賞 学術奨励賞 研究奨励賞, 2012.