

博士論文

生産機械における運動生成と制御の
高機能化に関する研究

Study on Improvement of Motion Generation and Control
for Production Machine

金沢大学大学院自然科学研究科

氏 名 疋津 正利

提出年月 2016年6月27日

目次

第 1 章 緒言	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 サーボ技術の発展.....	2
1.3 産業用ロボットの発展.....	4
1.4 研究目的.....	6
1.5 本論文の構成.....	7
第 2 章 間欠運動の高速化に関する考察	9
2.1 はじめに.....	9
2.2 サーボ系を構成した間欠運動の生成.....	10
2.2.1 位置制御系の設計	11
2.2.2 間欠運動性能の評価.....	16
2.3 カム機構による間欠運動の生成.....	20
2.4 考察.....	27
2.4.1 モータに流れる電流値の飽和の影響.....	27
2.4.2 非対称なカム曲線の提案.....	29
2.5 まとめ.....	32
第 3 章 サーボモータ系に含まれる電流制限と電流フィードバックとの関係に関する考察	33
3.1 はじめに.....	33
3.2 電流フィードバックを持たないサーボモータの速度制御系とその応答.....	34
3.3 電流フィードバックを持たせたサーボモータの速度制御系とその応答.....	42
3.4 電流フィードバックを与えることによる力制御の効果.....	48
3.5 まとめ.....	50
第 4 章 真空吸着式搬送リフトのためのパワーアシスト技術の改善	51
4.1 はじめに.....	51
4.2 コンプライアンス制御を実装したパワーアシスト装置.....	53
4.2.1 制御系の構成方法.....	53

4.2.2 本制御系の安定性.....	55
4.3 ロープ張力をフィードバックしたときのパワーアシスト性能の評価...	57
4.4 吊り上げた負荷の安定性の向上.....	62
4.5 まとめ.....	66
第5章 ロボットハンドリング技術の高機能化.....	67
5.1 はじめに.....	67
5.2 システム概要.....	70
5.2.1 3次元環境の計測.....	70
5.2.2 物体の3次元位置・姿勢の認識.....	70
5.2.3 物体のハンドリング計画.....	71
5.3 センサ(LRF : Laser Range Finder)による3次元環境計測.....	72
5.3.1 LRFの3次元測距原理.....	72
5.3.2 ロボットアームの自由度を利用した距離点群の取得.....	73
5.3.3 多方面から測定した点群の統合.....	76
5.3.4 測定結果の統合時の位置ずれの補正.....	79
5.4 物体の3次元位置・姿勢の認識.....	83
5.4.1 モデルの点群化.....	83
5.4.2 ICPアルゴリズムを用いたマッチング.....	84
5.4.3 マッチングの工夫.....	87
5.4.4 マッチング後の流れ.....	91
5.5 点群によるマッチングの検証.....	96
5.5.1 データ誤差と認識精度との関連.....	96
5.5.2 マッチング原理の種々の検証比較.....	100
5.6 物体のハンドリング計画.....	105
5.6.1 事前知識.....	105
5.6.2 把持位置・姿勢候補の決定.....	106
5.6.3 ロボットアームの姿勢の導出.....	112
5.6.4 ロボットの動作範囲内における把持位置・姿勢の探索.....	115
5.6.5 干渉評価.....	119
5.6.6 プレーシング計画.....	122
5.7 検証実験.....	125

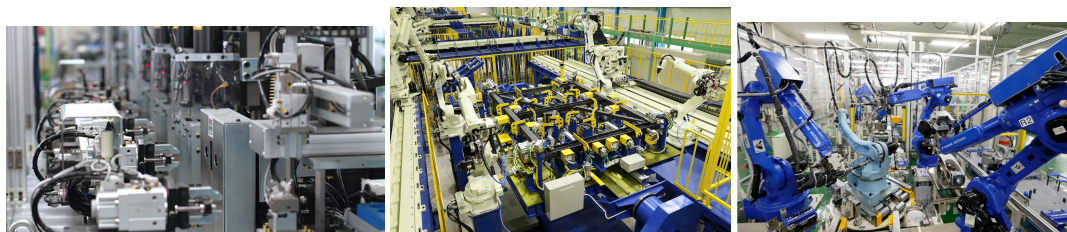
5.7.1 事前情報.....	125
5.7.2 対象物が単体である場合.....	125
5.7.3 複数の対象物が独立している場合.....	131
5.7.4 複数の対象物がバラ積みされている場合.....	136
5.7.5 種類の異なる対象物が同時に存在する場合.....	144
5.7.6 対象物の形状が複雑な場合.....	146
5.7.7 検証結果のまとめ.....	151
5.8 まとめ.....	152
第 6 章 結言.....	153
参考文献.....	156

第1章 緒言

1.1 はじめに

日本の工業は自動機械に代表される生産技術の発展と共に成長してきている。特に図 1.1 に示すような生産ラインにおける自動化技術において、その発展は目覚ましいものとなっており、それらの技術は様々な分野にも応用されている。生産機械に必要とされる要素技術として最も基本となる技術はアクチュエータの制御であり、様々な環境および対象物の測定とその情報のフィードバックになる。これらのメカトロニクス技術は様々な対象物と様々な環境に対して柔軟に対応出来るフレキシビリティの高さから、生産機械の発達に大いに貢献している。生産機械の発展と共に生産機械が扱う物の多様化が進み、生産機械自体の動きの複雑化、扱う情報の複雑化も進んできている。このため、生産機械の高機能化を考える場合にそれを構成する各要素技術自体の高機能化を考えた上で、それらの要素技術を取りまとめたシステムとしての高機能化を図ることが大事となる。

生産機械の高機能化を行う場合、それ自身の高速化や高精度化が考えられる。生産機械の高速化を図ろうとする場合には各要素技術がそれぞれかかえる問題を無視できなくなる。特に要素技術の基本であるアクチュエータの制御においては、一般的な制御理論では余り考慮に入れられないが、現実的な問題からアクチュエータをコントロールするドライバ回路内に設けざるをえない電流制限要素の影響が大きい。高精度化を図る場合には計測された情報そのものの精度と、その情報をフィードバックすることによる制御系自体の安定性の問題が大きい。



(a) 渋谷工業

(b) ナスラック

(c) 安川電機

図 1.1 生産ラインにおける自動機械

また、生産機械はそれ自身が単体で動くことをよしとするのではなく、別の物体の搬送・把持・加工・組付け等を行うことを主目的とするため、扱う対象物を含めての議論をする必要がある。近年、生産機械が扱う対象物の種類も増え、強度が高く形状も画一的な金属部品だけではなく、材質も様々で複雑な形状をしたものを扱う必要性が増えてきている。このため、扱う対象物の形状や材質に応じて加わる衝撃力等を考慮に入れた上で生産機械の高速化などを図ることが重要となる。

1.2 サーボ技術の発展

サーボ機構とは物体の位置や姿勢等を制御量として、与えられた目標値に対して追従する様に自動制御された機構であり、生産機械における自動化技術において欠かせない技術となっている。特に工作機械の分野ではサーボ機構による数値制御(NC : Numerical Control)による NC 工作機械が発展してきている。サーボ機構の基本的な流れは図 1.2 に示す通りである。



図 1.2 サーボ機構の基本

サーボ機構において駆動部となるサーボモータは、DC サーボモータが 1950 年代後半から商品化が始まり、1970 年代後半から産業用ロボットが出始めたのを機に、DC サーボモータの進歩が早まった。DC サーボモータはブラシが摩耗することによって保守性や信頼性に問題が生じることから、1980 年代後半には DC サーボモータよりも保守性や信頼性が高い AC サーボモータが製品化された。DC サーボモータから AC サーボモータに変わることによってモータから摩耗部品であるブラシがなくなったことが、生産機械の信頼性の向上とメンテナンス性の向上に大きく貢献した。AC サーボモータは巻線の高密度化、マグネットの特性や絶縁技術の進歩により、飛躍的に小型・高トルク化が進んでいる。同時期に位置検出器として用いられてきたインクリメンタル方式エンコーダが、ア

ブソリユート式エンコーダに置き換わり，原点復帰作業が不要となったことで生産機械の信頼性がさらに高まった。

サーボ機構に NC コントローラが導入された当初，サーボ機構における制御部であるサーボアンプは，入力される指令値をアナログ値でしか受け取れなかった。しかしながら，NC コントローラは位置と速度を同時に表現可能であり，工作機械やロボットの様な分野では 1 パルス毎の速度や位置の同期性を必要とするため，デジタル値であるパルス列を指令値として使用している。このため，NC コントローラとサーボアンプの間に D/A コンバータを入れざるをえず，余分なコストとしてかかっていた。1980 年代半ばにサーボアンプがデジタル化されることにより，高価格化を抑え，簡便な操作性へと変化してきた。コントローラとして NC コントローラを利用することにより，作業工程を全て数値化することができ，多軸の座標変換を行うことで直線動作や円弧補間動作などを安定して行うことが可能となった。これにより多種少量生産や複雑形状の加工等への対応が容易となってきている。ただし，サーボドアンプ内の回路を保護する目的で電流制限が設けられており，通常の制御理論に則った扱い方では上手く制御できない場合が出てくる。このため，回路内での電流値が飽和した時の非線形性を考慮に入れた運用をする必要がある。

表 1.1 世界の産業用ロボット稼働台数（日本ロボット工業会調べ）

世界の産業用ロボット稼働台数

（マニピュレーティングロボットのみ）

Estimated operational stock of multipurpose industrial robots at year-end in selected countries, Number of units										
	2014 END	2010 END	2005 END	2000 END	1995 END	1990 END	1985 END			
日本	295,829	307,698	373,481	389,442	387,290	274,210	93,000	Japan (85) 93,000 67.3% (90) 274,210 60.9% (95) 387,290 64.1% (00) 389,442 51.9% (05) 373,481 40.7% (10) 307,698 29.1% (14) 295,829 20.0%	Asia, Oceania (85) 93,427 67.6% (90) 282,239 62.6% (95) 416,820 69.0% (00) 447,165 59.6% (05) 482,543 52.6% (10) 523,644 49.4% (14) 785,028 53.0%	
中国	189,358	52,290	11,557	930						
インド	11,760	4,855	1,069	70						
マレーシア	5,730	3,677	1,695	390						
韓国	176,833	101,080	61,576	37,988	18,149	3,020				
シンガポール	7,454	3,685	5,463	5,370	3,275	1,389	200			
台湾	43,484	26,896	15,464	6,942	3,849	1,290	227			
タイ	23,893	9,635	2,472							
その他のアジア	21,896	6,762	4,828	3,200	2,417	900				
オーストラリア/ニュージーランド	8,791	7,066	4,938	2,833	1,840	1,430				
米国	219,434	148,836	85,476	89,880	56,945	34,090	20,000			America (85) 20,000 14.5% (90) 34,090 7.6% (95) 56,945 9.4% (00) 89,880 12.0% (05) 139,984 9.3% (10) 173,174 14.1% (14) 248,430 14.8%
カナダ	8,180	15,760	7,596							
メキシコ	9,277	7,578	2,948							
ブラジル	9,557	5,721	2,672	1,230						
その他の中南米	1,982	890	886	845	479	150	375			
その他			43,962							
オーストリア	7,237	5,749	4,148	3,046	2,323	1,150	249			
ベルギー	7,995	6,251	6,124	8,212	5,096	2,422	604			
オランダ	8,470	5,438	3,238	*1	*1	*1	*1			
チェコ	9,543	4,462	1,971	915	375					
デンマーク	5,119	4,234	2,661	1,414	672	470	164			
フィンランド	4,178	4,611	4,159	2,647	1,398	810	257			
フランス	32,233	34,495	30,236	20,674	13,276	8,350	4,150			
ドイツ	175,768	148,256	126,294	91,184	51,375	27,320	8,800			
ハンガリー	4,302	1,406	458	261	247	200	67			
イタリア	59,823	62,378	56,198	39,238	22,963	12,200	4,000			
ポーランド	6,401	3,321	846	474	493	520				
ポルトガル	2,870	2,280	1,542	1,090	496	56				
ロシア	2,894	1,058	173	5,000	10,000	64,204				
スロバキア	3,891	1,870	576	500	532					
スロベニア	1,819	1,032	460	363	238					
スペイン	27,983	28,868	24,141	13,163	4,913	2,100	688			
スウェーデン	10,742	9,387	8,028	6,276	4,459	3,340	2,046			
スイス	5,764	4,417	3,732	3,742	2,672	1,510	290			
英国	16,935	13,519	14,948	12,344	8,314	5,940	3,017			
その他の欧州	17,295	6,297	1,224	976	223	3,477				
南アフリカ	3,452	2,074	622	90				Africa (00) 90 0.0% (05) 634 0.1% (10) 2,232 0.2% (14) 3,874 0.3%		
その他のアフリカ	422	158	12							
その他	32,384	4,172								
Total	1,480,778	1,059,162	917,874	750,729	604,309	450,548	138,134	Total (85) 138,134 100.0% (90) 450,548 100.0% (95) 604,309 100.0% (00) 750,729 100.0% (05) 917,874 100.0% (10) 1,059,162 100.0% (14) 1,480,778 100.0%		

出所) 国際ロボット連盟(IFR)

*1 2000年まではベルギーとオランダの2ヶ国合計値

1.3 産業用ロボットの発展

ロボットは代表的な生産機械の一つである。日本は世界一のロボット生産国であり、ロボット使用国である。表 1.1 から分かるとおり、近年ではアメリカや中国、韓国、ドイツが稼働台数を伸ばしてきているものの、日本で稼働しているロボットの台数は2014年末現在で世界で稼働している台数の20%を占めており、依然として世界一の使用国である。また、1980年代に比べて、世界での産業用ロボットの総稼働台数が10倍に増えており、各国で導入が進んでいることがわかる。

1960年代に最初の産業用ロボットが商品化された時から今日まで、ロボット技術の発展は目覚ましいものがあり、様々な分野への応用が広がってきている[82, 83]。図 1.3 に示す様に、初期の産業用ロボットはプログラム可能な汎用的な搬送機械と言ってもよく、ワークの供給程度の簡単な作業の専用機に近いものであった。

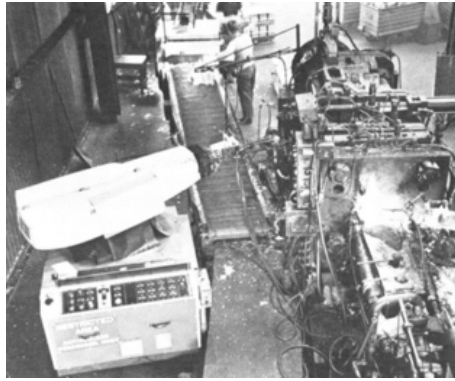


図 1.3 初期の産業用ロボット[82]

日本では 1970 年に第一回産業用ロボット展が東京で開催されたのを機に、世界に先駆けて日本産業用ロボット工業会が設立された。産業用ロボットの実用化のきっかけになったのは 1973 年にトヨタ自動車と日産自動車のスポット溶接ラインにロボットが導入されたことである。これ以降、ロボットを用いた工場の自動化が一気に進んだ。当初は 3K（きつい，汚い，危険）の作業を回避することを目的に日本での導入が拡大されていったのだが，現在ではロボットでしかできないものを高速で高精度に扱い，さらには人が作業できない様な極限環境への対応する技術が開発されてきている。特に NC 制御を産業用ロボットの制御に転用できるようになってから，産業用ロボットの信頼性が増加し，産業用ロボット自体が産業として確立していった。NC 制御を産業用ロボットに転用することにより，ロボットの動作制御は作業対象によって点から点への PTP (Point to Point)制御と連続経路の CP(Continuous Path)制御を使い分けながら動作を作り出すことができ，より複雑な経路も高精度に対応することが可能となった。

ロボットの動作軸を駆動するアクチュエータは，発展の過程で油圧や空気圧，DC サーボモータが使用されていたが，サーボモータの発展と共に近年では信頼性の高い AC サーボモータが広く使用されるようになっている。

現在，以下に示す様に様々な作業に対して産業用ロボットの技術が導入されている。

- **加工** : スポット溶接，塗装，バリ取り
- **搬送** : ハンドリング，ビンピッキング，入出荷
- **組立** : ピックアンドプレース，はめ込み，ネジ止め

- **建設** : 鉄筋加工, 被覆, 玉掛け, 塗装, 保守・点検
- **サービス** : 搬送, 掃除, 警備, 案内
- **農林** : 耕運, 収穫, 搬送, 農薬散布, 伐採
- **医療福祉** : 手術支援, 義肢, リハビリ, パワーアシスト
- **原子力** : 保守・点検

1.4 研究目的

本研究は生産機械に必要とされる様々な要素技術の高機能化およびそれら要素技術を統合して運用するシステムの高機能化を目指す。そのため、基本となるアクチュエータに関する要素技術から、それらをシステムとして応用的に運用するロボット技術を範囲として、以下の項目にスポットを当て、各要素技術における高機能化に関する検討、および考察を行う。

- 高速位置決めのための要素技術であるカム機構と汎用性の高いサーボ系の比較と検討。
- メカトロニクス技術の基本となるサーボ系に含まれる電流制限と電流フィードバックに関する考察と応用。
- 重量物を搬送することに利用されている搬送リフトのためのパワーアシスト技術における制御系の改善と考察。
- ロボットを用いたピッキング作業を行うシステムの高機能化に関する検討。

これらの要素技術に関する検討・考察を通して生産機械に必要な要素技術の高機能化を目指す。

1.5 本論文の構成

本論文は第 1 章から第 6 章で構成されており、各章毎にスポットを当てた生産機械のための要素技術に関する検討と考察を行っている。

第 1 章では本論文の背景と生産機械の基本となるサーボ技術の発展、および生産機械の代表である産業用ロボットの発展に関して述べた。また、生産機械の高機能化を行う上で考慮しなければならない問題点の提示を行い、生産機械を構成する要素技術の中からスポットを当てた要素技術に関する説明を行った。

第 2 章では一般的な生産ラインでよく用いられている割り出し機構を対象にして、古くから用いられているカム機構とメカトロニクス技術の発展と共に普及してきているサーボ系を間欠運動の高速化という視点で比較を行う。カム機構は機械運動における移動量の変化への対応といったフレキシビリティにかけると機械剛性が高いという面があり、サーボ系は移動距離の変化に対して柔軟に対応可能であるが、サーボ剛性を上げる為のチューニングが難しく、限界もあるといった面がある。間欠運動を高速化するにつれ、これらの問題が明確に現れてくることから、両方式を比較・検討し改善案の提案を行う。

第 3 章ではメカトロニクス技術の基本となるサーボモータにおいて、そのサーボドライバ内に含まれる飽和要素と電流フィードバックの効果と影響を考察する。飽和要素の影響が出ない線形領域のみでサーボ系を駆動することが理想ではあるが、現実的にはサーボドライバ内の回路の保護の為に飽和要素を設けざるをえず、その影響を受けずに運用することは難しい。また、これまでモータの電氣的な時定数を見かけ上小さくする為と捉えられてきた電流フィードバックの効果がそれだけではないことがわかってきている。これらを検討した上で、飽和要素の効果を積極的に利用してセンサレスな力制御を実現する方法について述べる。

第 4 章では工場内や倉庫内での重量物の搬送装置としてよく用いられている懸垂型の搬送リフトを対象にして、その搬送リフトのためパワーアシスト技術のための制御系に関する検討と考察を行う。搬送リフトはまず重量物を持ち上げる時において使用者にかかる重量負担をできるだけ軽減することが求められており、クレーンの様にモータの駆動力等を用いて重量物を持ち上げるパワーアシスト装置が開発されてきている。しかしながら、引き上げ時に対象物に対して瞬間的にかかる大きな衝撃力への対処が不十分である。このことから引き上げ時の衝撃力の緩和を目標としてパワーアシスト装置の制御系の検討を行う。

第 5 章ではシステムの生産機械の例としてロボットを用いたピッキング作業の高機能化に関して述べる。ピッキング作業はロボットを用いた作業において最もよく行われる作業である。そして、ピッキング作業を自動化するには様々な技術を必要とし、それらをシステムとして運用する必要がある。特に今後は生産ラインの様な、部品の供給装置が無いような場所での運用が増えると考えられるため、様々な物体が雑多に積み重ねられているような状況を想定すると環境および対象物の 3 次元計測、対象物の位置・姿勢の認識、干渉問題を回避したピッキングを実行する為のロボットの動作計画が重要となってくる。3 次元計測においては **Laser Range Finder(LRF)**を用いた 3 次元点群情報の測定とロボットを利用した多方面測定の方法を述べる。対象物の位置・姿勢の認識では測定により得られた 3 次元の環境点群に対して、事前に用意したモデルとのマッチング方法を基本として、複数の物体が積み重ねられている様な環境でも認識精度を高める方法を述べる。ロボットの動作計画においてはモデルに付与した把持の為の情報とロボットに付与した干渉モデルを用いて対象物や環境との干渉問題を回避しての把持位置およびアプローチ経路の生成方法を述べる。それぞれの技術に関しての検討および考察を行い、最後にピッキング作業を一連の流れとして処理可能なシステムの提案を行う。

第 6 章では本論文の成果をまとめる。

第2章 間欠運動の高速化に関する考察

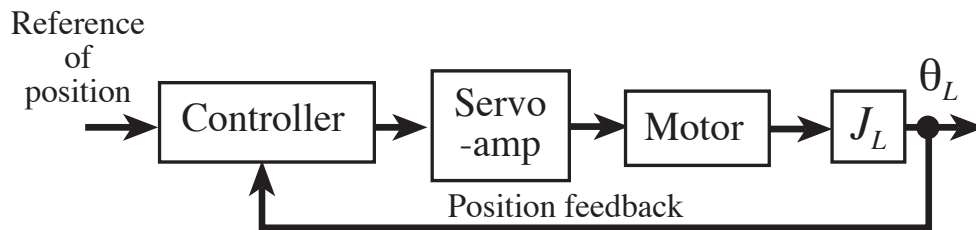
2.1 はじめに

近年のメカトロニクス技術の発展に伴い、機械運動の全てを制御を主体としたメカトロニクス技術によりその目的を達してしまおうとする機構設計の考え方[1-3]も普及してきているが、間欠運動を得るのに本研究ではサーボ系を構成したメカトロニクス系を用いる場合と、カム機構によるこれまでの手法により間欠運動を得る場合とを比較することにより、間欠運動の高速化における性能を評価する。

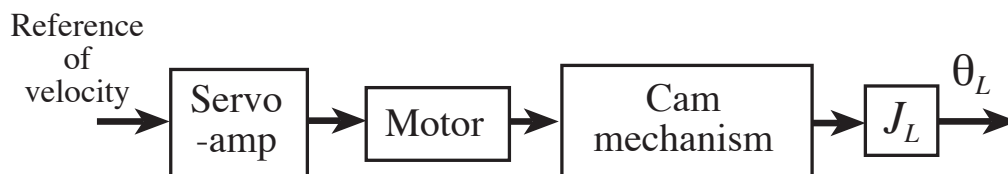
機械運動における移動量の変化といったフレキシビリティにおいては、従来のカムやリンク機構ではその限界はおのずと明らかなことであるため、好んでサーボ系を構成したメカトロニクス技術がより多く採用されてきているものと思われる。固有振動数が比較的低いロボットアーム等の運動制御においては仮想的なカム曲線制御を用いて運動の高速化による残留振動の発生を少なくする研究もされている[4-7]が、機械系の間欠運動の中には同じ量の移動を速くかつ正確に繰り返し行うことが求められることも多い。こうした間欠運動においてサーボ系とカム機構に同等の位置決め精度を与えることを前提とし、どちらの方式がより高速化が可能であるかを考えてみることにする。サーボ系においては運動の高速化に伴って目標値と実際に得られる間欠運動との間の遅れにより位置決め精度の劣化が予想される。これに対してカム機構においても駆動反力によりカム入力軸の回転角速度が変化してしまい、そのために位置決め時間の増大と同時にカムの加減速性能の劣化を引き起こすことが予想される[8, 9]。これより本研究では、ほぼ同程度の駆動源を用いて同じ大きさの負荷を駆動する場合を考え、サーボ系とカム機構のそれぞれの方式がもつ特徴と同時に、どちらの方式が間欠運動の高速化に有利であるかを明確にすることを試みる。

本研究の背景として、モータの電機子には最大電流値が設定されている[10, 11]ということがあり、それは通常サーボアンプ内のツェナーダイオードによりハード的にその限界値が設定されている。これにより飽和要素が制御系内に含まれることになる。非線形要素としての上述の飽和要素の限界値を利用したモータ駆動系についてはこれまであまり議論されてきていない。そこで本研究では電機子に流れる飽和電流値が間欠運動の高速化に関してその限界を決めていることを明らかにしたい。他方、電流値が飽和領域に達してしまうような非線型

なモータ駆動系においては2自由度制御系や外乱オブザーバ等を用いても間欠運動の高速化に関してほとんどその効果は期待できない。



(a) サーボ機構を用いた間欠運動のモデル



(b) カム機構を用いた間欠運動のモデル

図 2.1 位置制御システムのブロック線図

2.2 サーボ系を構成した間欠運動の生成

サーボ系を利用して間欠運動を得るシステムのモデルとカム機構により間欠運動を得るシステムのモデルを図 2.1 に示す. 図 2.1(a)に示すようにサーボ系を利用して間欠運動を実現する場合には負荷軸の角度位置情報をフィードバックした位置制御系を構成することになる. この場合, 位置指令値として目的とするカム曲線を入力することにより出力軸側に間欠運動を実現させる. 本研究では間欠運動機構の一例として出力軸 1 回転中に 6 インデックスの割り出しを想定し, そのカム曲線にはサイクロイド曲線を使用することにする. このとき, サーボ系への位置指令値 θ_{ref} は式(2.1)および(2.2)のように与えられる.

運動時 : $\left(\frac{2\pi}{3} + 2\pi N \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} + 2\pi N\right)$

$$\theta_{ref} = 2\pi \left(\frac{N}{6}\right) + \frac{1}{2} \left(\theta - \frac{2\pi}{3} - 2\pi N\right) - \frac{1}{6} \sin \left[3 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} - 2\pi N\right)\right] \quad (2.1)$$

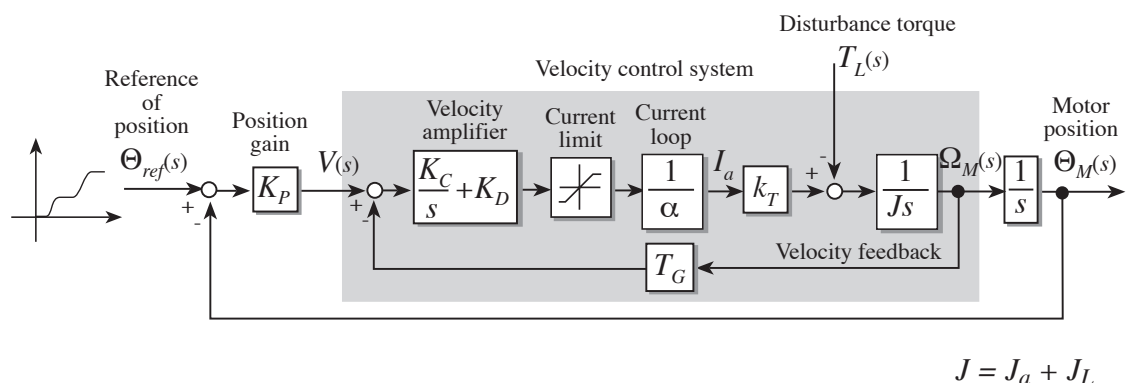


図 2.2 位置制御系のブロック線図

停止時： $\left(-\frac{2\pi}{3} + 2\pi N < \theta < \frac{2\pi}{3} + 2\pi N\right)$

$$\theta_{ref} = 2\pi \left(\frac{N}{6}\right) \quad (2.2)$$

ただし、 $N(=0,1,\dots,6)$ はインデックス数を、また q はカム入力軸の回転量を表す。

2.2.1 位置制御系の設計

サーボ系を利用して間欠運動を得るための位置制御系のブロック線図を図 2.2 に示す。サーボ系を利用した間欠運動においてもカム機構を用いた間欠運動と同程度の割り出し精度を得ることが必要であり、まず最初にそのための位置決め制御系を設計することが求められる。図 2.2 のブロック線図から得られる伝達関数は式(2.3)のように与えられる。

$$\Theta_M(s) = \frac{A_4 s + A_5}{A_0 s^3 + A_1 s^2 + A_2 s + A_3} \Theta_{ref}(s) - \frac{\alpha s}{A_0 s^3 + A_1 s^2 + A_2 s + A_3} T_L(s) \quad (2.3)$$

$$A_0 = \alpha(J_a + J_L) = \alpha J$$

$$A_1 = k_T T_G K_D$$

$$A_2 = k_T (T_G K_C + K_P K_D)$$

$$A_3 = k_T K_P K_C$$

$$A_4 = k_T K_P K_D$$

表 2.1 位置制御システムのパラメータ

Parameter	Symbol	Value
Inertia of motor	J_a	$5.586 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Max. of current	I_{\max}	3.5 A
Torque constant	k_T	0.188 N · m/A
Current feedback gain	α	2.0 V/A
Tachometer generator coefficient	T_G	0.0668 V/(rad/s)
Inertia of load	J_L	$5.586 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$$A_5 = k_T K_P K_C$$

ここで J_a はモータのイナーシャ, J_L は負荷のイナーシャであり, $J (= J_a + J_L)$ として一体で運動するものとする. K_C は速度制御系の積分ゲイン, K_D は速度制御系の比例ゲイン, K_P は位置制御系の比例ゲインである. k_T はトルク定数, T_G は速度制御系のフィードバック係数 (タコジェネレータの変換係数) である. α はサーボアンプ内の電流フィードバック係数であり, 図 2.2 の様に電流フィードバックループを $1/\alpha$ で近似する事が可能であることが分かっている.

サーボ系を利用した間欠運動においてもカム機構の加工精度と同程度の位置決め精度を得るものとして $1/60$ [deg] という十分に小さい分解能を設定する. $1/60$ [deg] という負荷の位置決め精度を実現するためには検出器であるエンコーダの分解能も少なくとも $1/60$ [deg] 以上を与えることが必要であり, このときノイズを考慮してエンコーダの 1 [bit] を 5 [mV] に対応させることにすれば, 位置フィードバックゲインとして $K_P = 17.19$ [V/rad]* 以上を与えることが必要になる. 他方, 図 2.2 に示すようにサーボ系内にはモータ保護の為に保護回路として電流飽和要素が一般的に含ませてある. 電流飽和要素の最大電流値を I_{\max} [A] としたとき, モータの最大発生トルク τ_{\max} [Nm] は

$$\tau_{\max} = k_T I_{\max} \quad (2.4)$$

として与えられ, この最大トルクを使った最大加速と最大減速による負荷の位置決め (移動量 $\pi/3$ [rad]) に必要な時間が最小インデックス時間 T [s] となる. このとき T は次のように求められる[12].

* $1/60$ [deg] $\times \pi/180 \times K_P = 5/1000$ [V] より K_P を求める.

$$T = \sqrt{\frac{4\pi J}{2k_T I_{max}}} \quad (= 0.027 \text{ [s]}) \quad (2.5)$$

上式の()内は表 2.1 のパラメータを使用して求めた最小インデックス時間であり、このためモータの位置制御系としては $1/T$ の周波数までフラットな動特性を持つようにサーボアンプ中の速度ゲイン K_C 、 K_D を決定することが必要になる。位置制御系の特性方程式は式 (2.3) に示すように s に関して 3 次式であるが式 (2.6) に示すように 1 次式($s+a$)と 2 次式($s^2+2\zeta cs+c^2$)の積として近似することができる[13].

$$\begin{aligned} s^3 + \frac{A_1}{A_0} s^2 + \frac{A_2}{A_0} s + \frac{A_3}{A_0} &\approx \left(s + \frac{A_1}{A_0}\right) \left[s^2 + \frac{1}{A_1} \left(A_2 - A_3 \frac{A_0}{A_1}\right) s + \frac{A_3}{A_1}\right] \\ &= (s+a)(s^2 + 2\zeta cs + c^2) \\ a &= \frac{k_T T_G K_D}{\alpha J} \\ \zeta &= \frac{k_T T_G K_D (T_G K_C + K_P K_D) - \alpha J K_P K_C}{2k_T T_G^2 K_D^2 c} \\ c^2 &= \frac{K_P K_C}{T_G K_D} \end{aligned} \quad (2.6)$$

式 (2.6) に示すように、1 次式の極である $a (= A_1/A_0)$ を小さく設定しすぎると 2 次式側の系が不安定になりやすいため、

$$a = \gamma c \quad (\gamma = 2.0 \sim 3.0) \quad (2.7)$$

とすると、 K_C 、 K_D が次式のように求められる。

$$K_C = \gamma c^3 \frac{\alpha J}{k_T K_P} \quad (2.8)$$

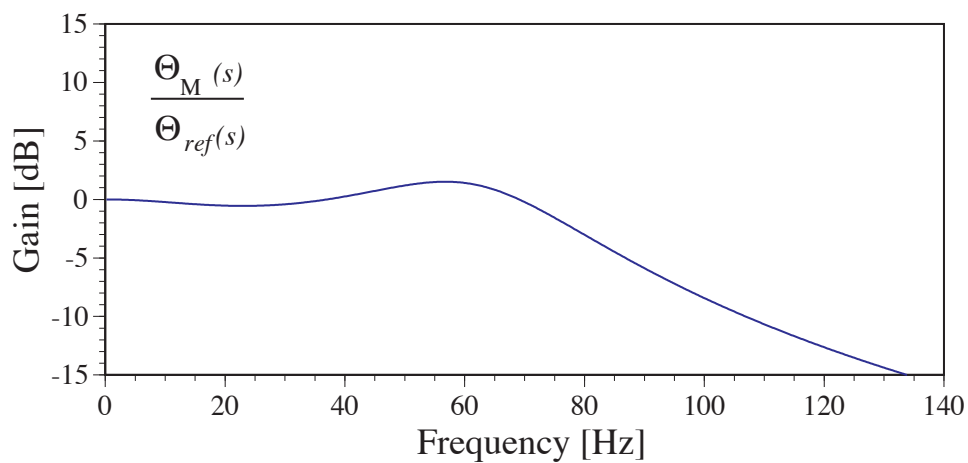
表 2.2 K_C と K_D の値

γ	c [rad/s]	a	K_C	K_D	ζ
2.0	$2\pi \cdot 40$	$2\pi \cdot 80$	2195.21	8.94	0.75

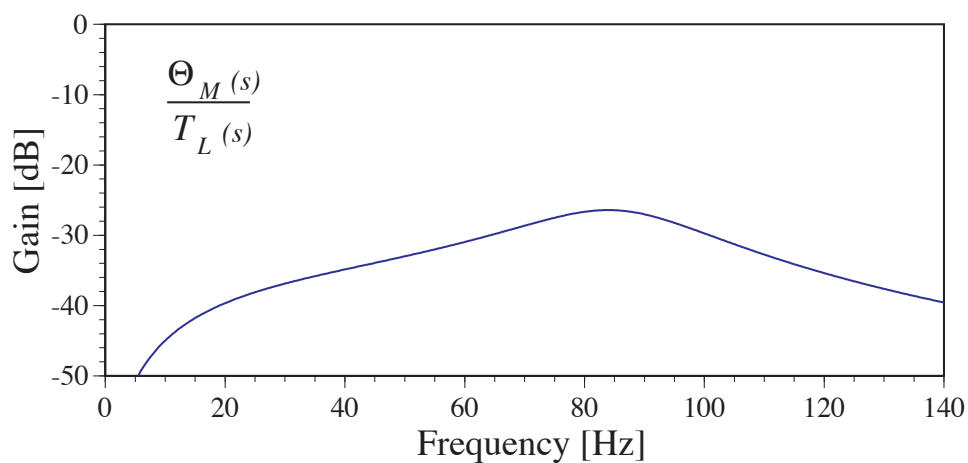
2.2	$2\pi \cdot 40$	$2\pi \cdot 88$	2414.73	9.83	0.77
2.4	$2\pi \cdot 40$	$2\pi \cdot 96$	2634.25	10.73	0.79
2.6	$2\pi \cdot 40$	$2\pi \cdot 104$	2853.78	11.63	0.81
2.8	$2\pi \cdot 40$	$2\pi \cdot 112$	3073.30	12.52	0.82
3.0	$2\pi \cdot 40$	$2\pi \cdot 120$	3292.82	13.41	0.83

$$K_D = \gamma c^2 \frac{\alpha J}{k_T T_G} \quad (2.9)$$

式 (2.5) より $T = 0.027$ [s]である 37Hz の周波数までフラットな特性を有する位置制御系を構成するために $c = 2\pi \times 40$ [rad/s]として与えたとき、 K_C 、 K_D は表 2.2 に示すような値となる。図 2.3 に設計した位置制御系の一例として $(K_C, K_D) = (2853.78, 11.63)$ のときの周波数応答と外乱がモータ軸に与える影響を示す。図 2.3(a)からは式 (2.3) の伝達関数における分子($A_4s + A_5$)の効果によりフラットな動特性が約 70Hz まで伸びていることがわかる。また停止時のサーボ剛性は図 2.3(b)に示すようにそれほど大きなものではなく、このため負荷は外乱力が作用した場合には微動してしまうことになる。



(a) $\Theta_{ref}(s)$ と $\Theta_M(s)$ の関係



(b) $T_L(s)$ と $\Theta_M(s)$ の関係

図 2.3 位置制御系の周波数応答 ($K_C = 2853.78$, $K_D = 11.63$)

2.2.2 間欠運動性能の評価

式 (2.1), (2.2) を位置制御系の指令入力としてサーボ系を利用した間欠運動のシミュレーションを行う。ここで、間欠運動時にモータが消費するエネルギーの指標として、式 (2.10) に示すようなモータ電流値 I_a の 2 乗の積分値を定義する。

$$L_M = \int_{t_0}^t I_a^2 d\tau \quad (t_0 < t \leq t_1) \quad (2.10)$$

ただし、 t_0 はインデックス開始時間、 t_1 はインデックス終了時間である。

図 2.4, 2.5, 2.6 にインデックス速度として 8, 10, 12 [index/s] を与えたときのそれぞれの間欠運動における負荷の回転速度 ω_M とその時の変位 θ_M および駆動モータの電流値を示す。割り出し時間 $0.042\text{s} = 24\text{Hz}$ である 8 [index/s] においてもすでに目標値としての ω_{ref} , θ_{ref} との間に大きな遅れが見られ停留時間が短くなってしまっている。割り出し時間 $0.033\text{s} = 30\text{Hz}$ である 10 [index/s] においては必要とされる停留時間の約半分にまで停留時間が短くなってしまっている。図 2.6 に示すように割り出し時間 $0.027\text{s} = 37\text{Hz}$ である 12 [index/s] までインデックス速度を上げると駆動用モータに流れる電流値がその限界値 ($\pm 3.5\text{A}$) に達してしまい間欠運動性能を著しく劣化させてしまっており、本研究で設計した位置制御系では 12 [index/s] までのインデックス速度を得ることは実用上困難であることがわかる。

図 2.7 には式 (2.10) で定義したモータ消費エネルギーを示す。インデックス速度の上昇に伴って消費エネルギーが大きくなるのは当然であるが、12 [index/s] のように電流がその限界値に達してしまうインデックス速度においてはエネルギー消費が極端に大きくなってくる。

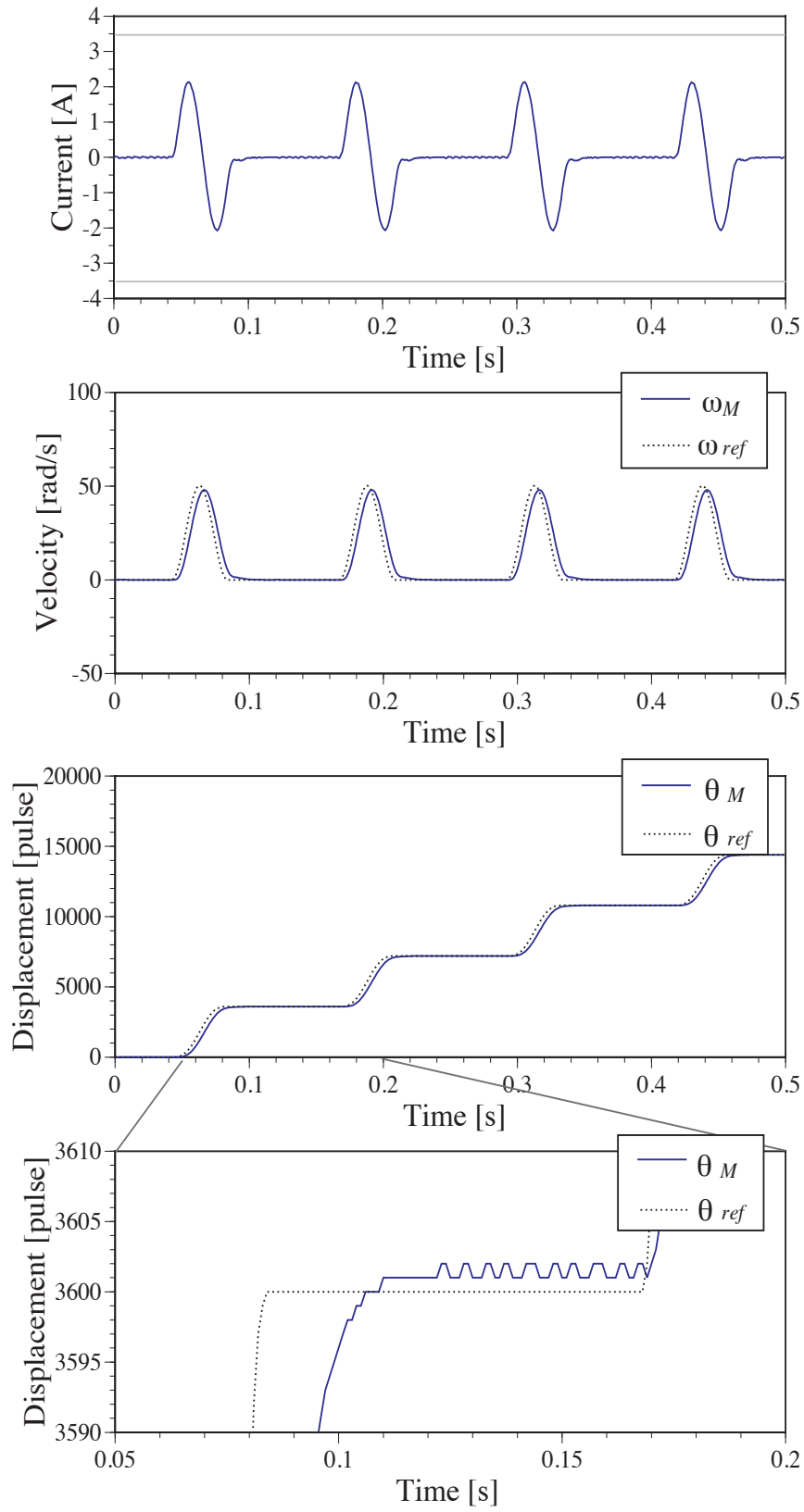


図 2.4 サーボシステムによる間欠運動 (8 [index/s])

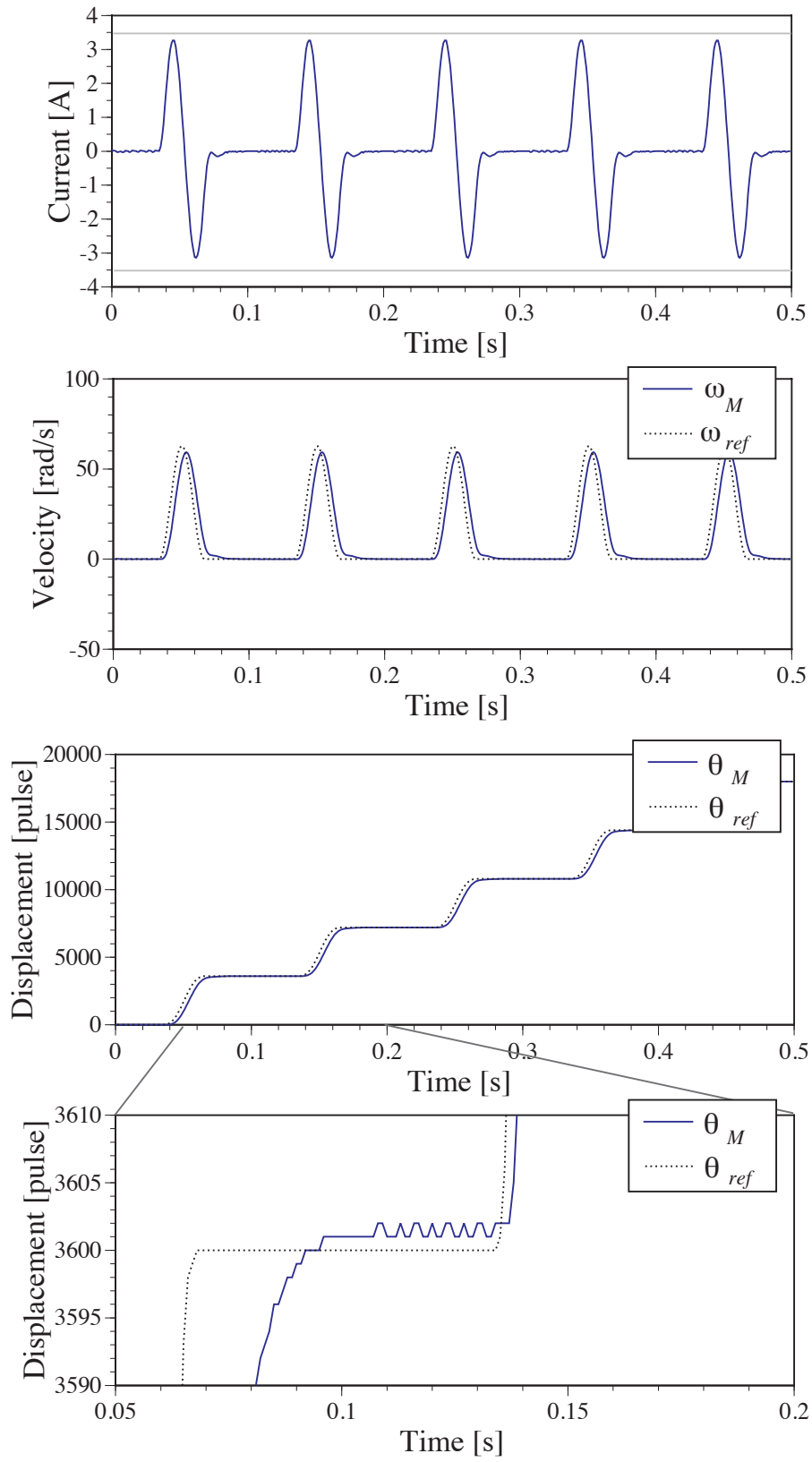


図 2.5 サーボシステムによる間欠運動 (10 [index/s])

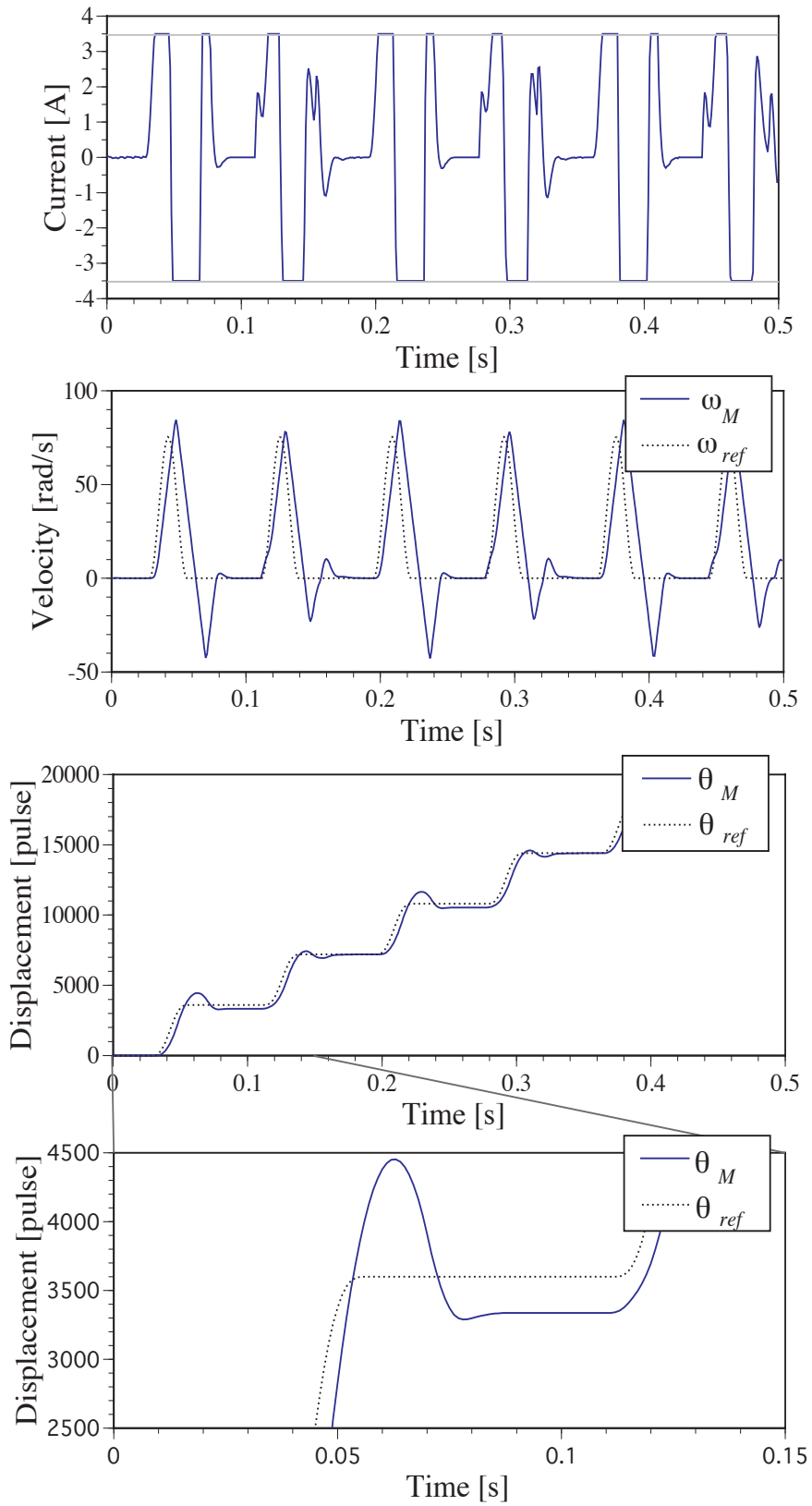


図 2.6 サーボシステムによる間欠運動 (12 [index/s])

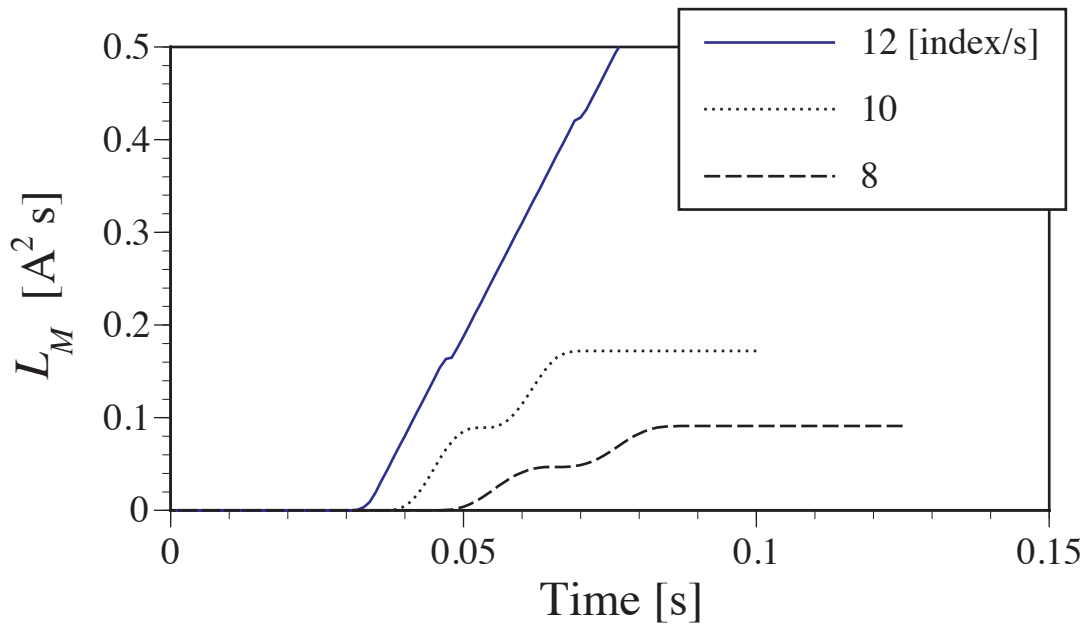


図 2.7 サーボ機構によるモータの消費エネルギー

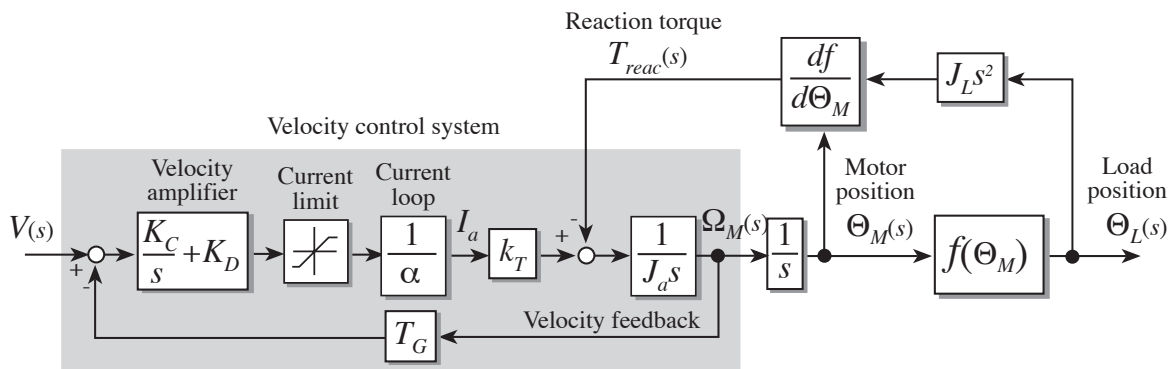
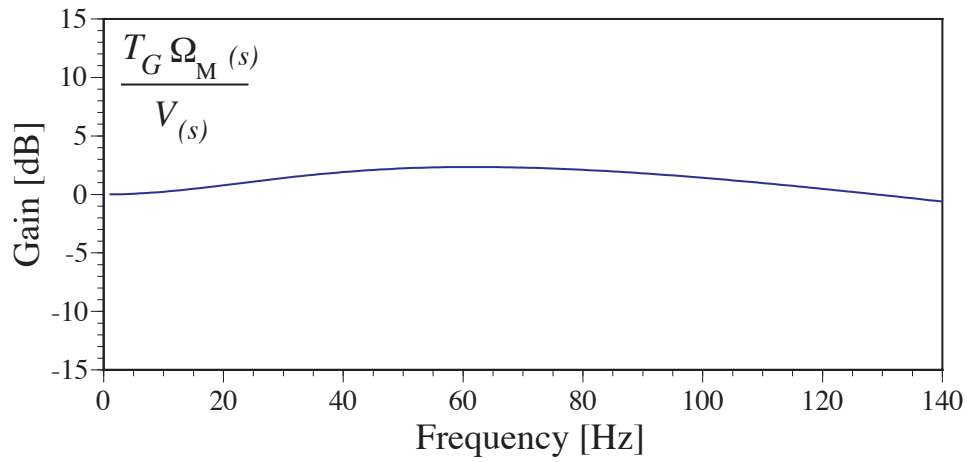


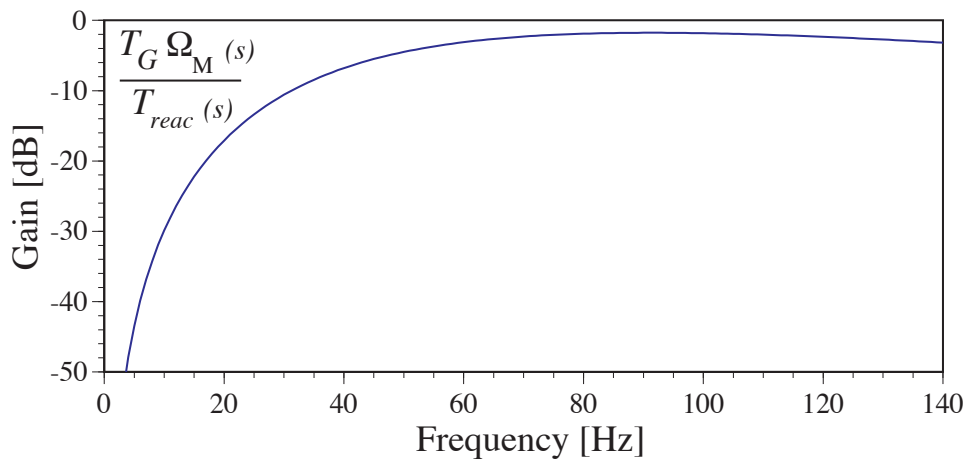
図 2.8 カム機構による間欠運動のブロック線図

2.3 カム機構による間欠運動の生成

図 2.1(b)に示したカム機構による間欠運動を定量的に評価するためのブロック線図を図 2.8 に示す。カム機構による間欠運動では図 2.8 に示すようにカムを通して駆動する負荷の駆動反力がモータ軸に外乱として作用するために、カム入力軸であるモータ軸の回転が一定に保たれないことに留意しなければならない。サーボ系を利用した間欠運動との性能比較のために前章と同じ慣性モーメントをもつ負荷を同じモータの速度制御系で駆動することとする。図 2.8 に示す速度



(a) $\Omega_M(s)$ と $V(s)$ の関係



(b) $\Omega_M(s)$ と $T_{\text{reac}}(s)$ の関係

図 2.9 速度制御系の周波数応答 ($K_C = 2853.78$, $K_D = 11.63$)

制御系の伝達関数は次式のように与えられる.

$$\Omega_M(s) = \frac{k_T K_D s + k_T K_C}{\alpha J_a s^2 + k_T T_G K_D s + k_T T_G K_C} V(s) - \frac{\alpha s}{\alpha J_a s^2 + k_T T_G K_D s + k_T T_G K_C} T_{\text{reac}}(s) \quad (2.11)$$

速度アンプゲインとして前章と同じ $(K_C, K_D) = (2853.78, 11.63)$ を与えた

きの周波数応答と負荷駆動時の外乱がモータの回転速度に与える影響を図 2.9 に示す。

図 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 にインデックス速度として 8, 10, 12, 14 [index/s] を与えたときのそれぞれの間欠運動におけるカム出力軸である負荷の回転速度 ω_L とその時の変位 θ_L および駆動モータの電流値を示す。カム機構を通して駆動する負荷からの駆動反力がモータ軸に外乱として作用し、図 2.9(b) の特性に従いモータ軸の回転速度が乱されるためモータに流れる電流値も変化してくる。回転変動を伴うモータ軸の回転速度変動 ω_M も同図中に示す。図 2.10~2.13 中に示す ω_{ideal} および θ_{ideal} はカム機構において入力軸モータの速度変動が全く無いとしたときの理想的なカム曲線である。モータ軸の回転変動および駆動用モータの電流値はインデックス速度の上昇に伴って大きくなっており、その結果として出力軸側のカムの加速度曲線は歪み、加速側と減速側とで非対称になってくるが、図 2.13 に示すように 14 [index/s] まではカム曲線の速度および変位はそれぞれ ω_{ideal} と θ_{ideal} とほぼ等しくなっており、サーボ系を利用した間欠運動と比較すればほぼ理想的な間欠運動が得られているといえる。

図 2.13 よりインデックス速度 14 [index/s] においてモータにはほぼ限界に近い電流値が流れており、サーボ系を構成して得られる間欠運動の上限である 10 [index/s] よりカム機構の方が間欠運動の高速化が可能となる。図 2.14 には式 (2.10) で定義したカム機構における消費エネルギーを示す。インデックス速度の上昇に伴って消費エネルギーは大きくなるが、図 2.7 と比較してわかるようにサーボ系を用いて得る間欠運動よりはるかにその消費エネルギーは小さくなる。

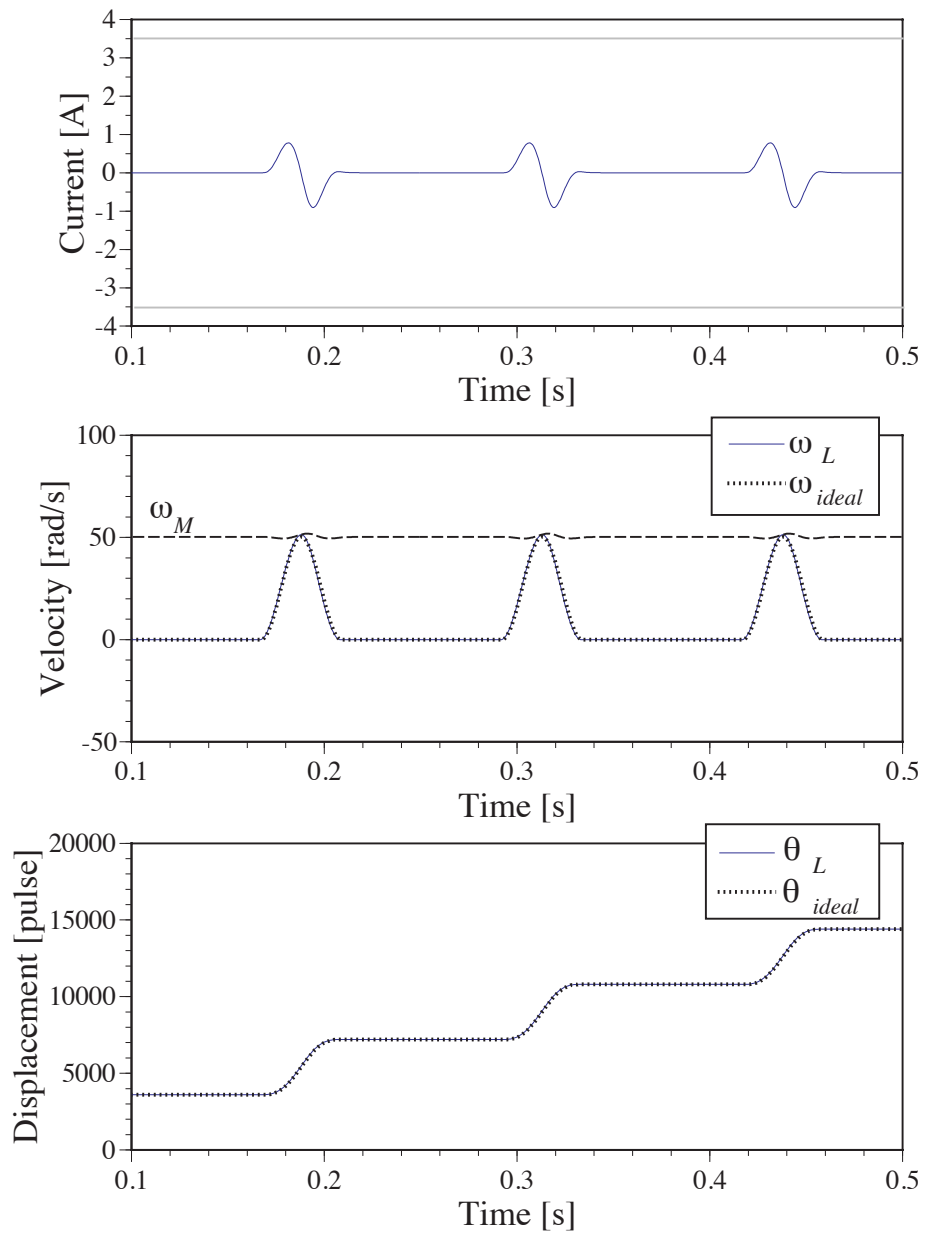


図 2.10 カム機構による間欠運動 (8 [index/s])

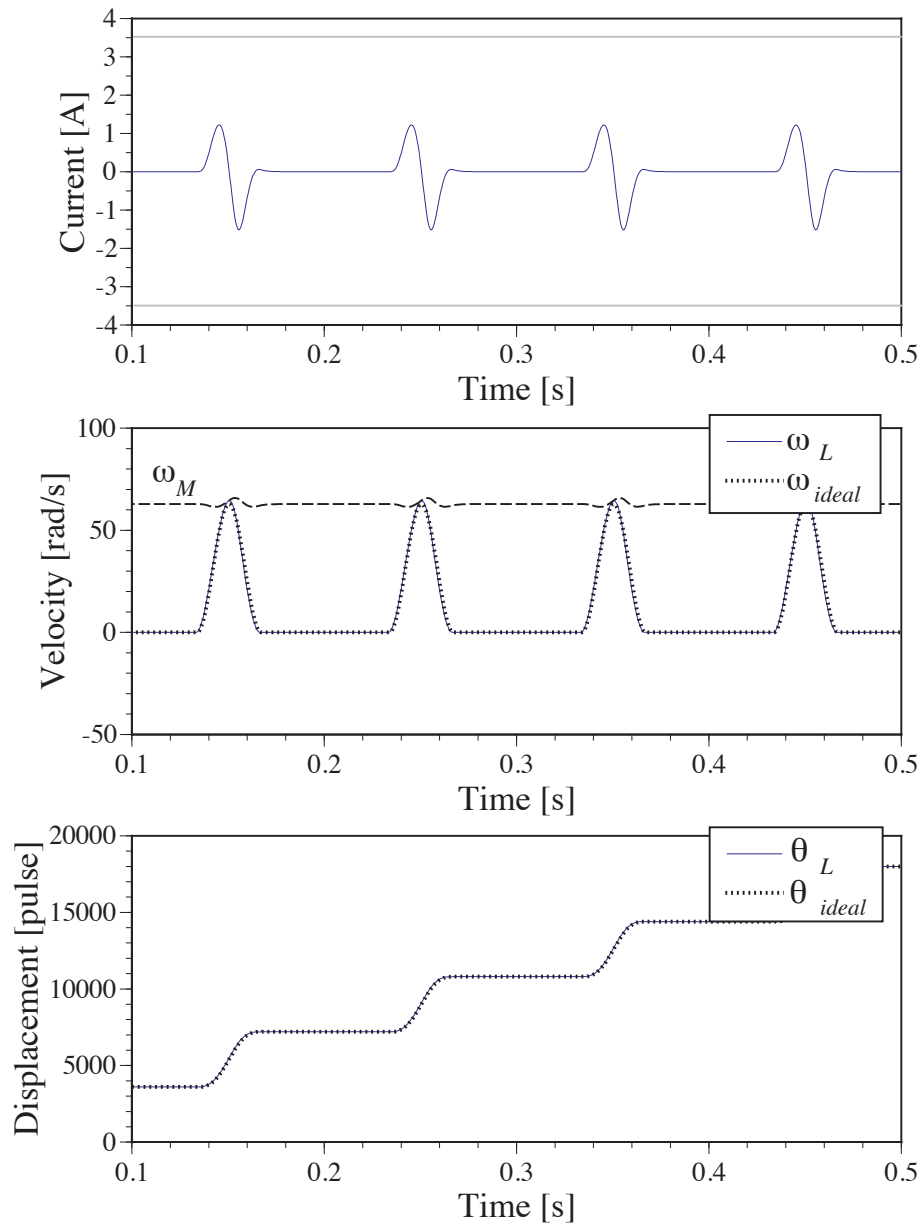


図 2.11 カム機構による間欠運動 (10 [index/s])

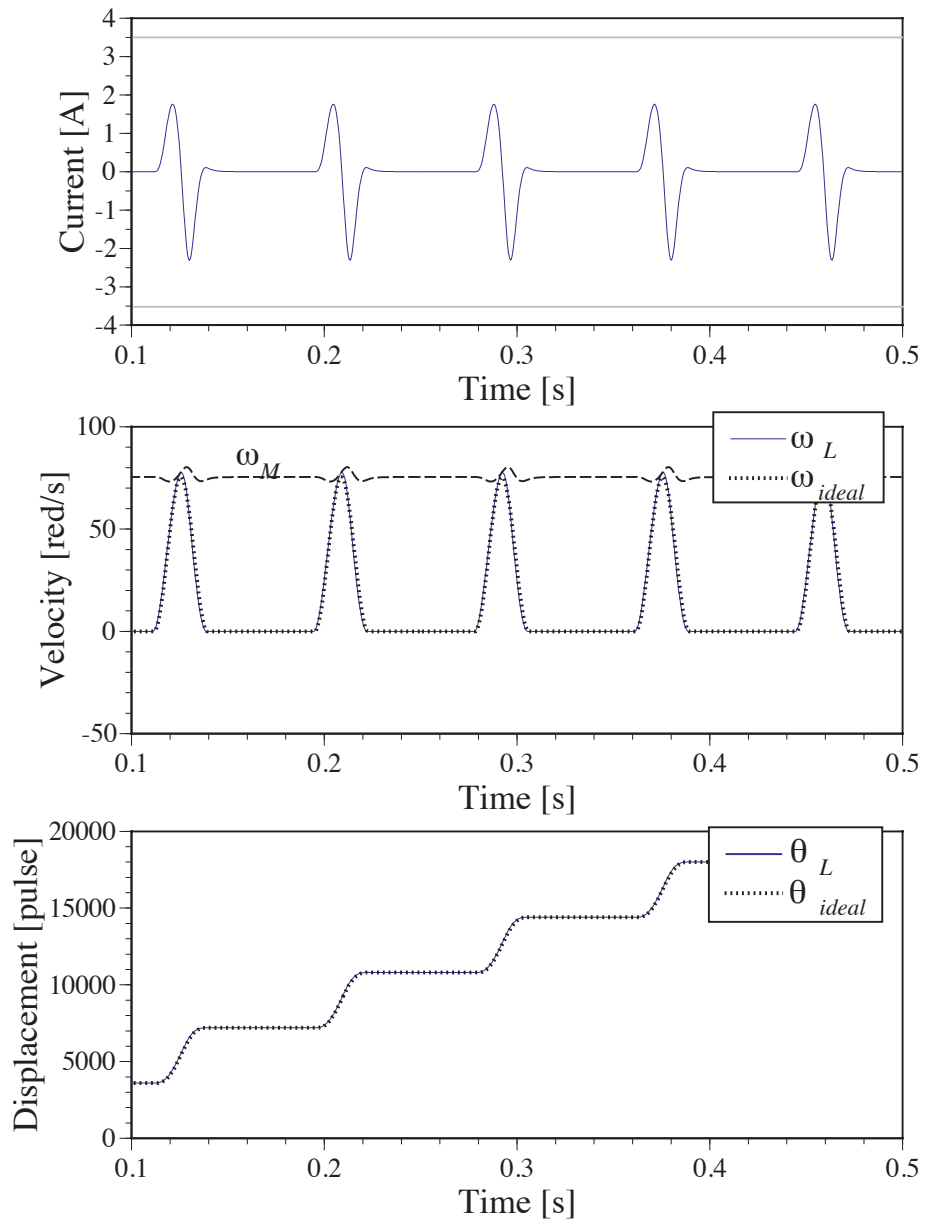


図 2.12 カム機構による間欠運動 (12 [index/s])

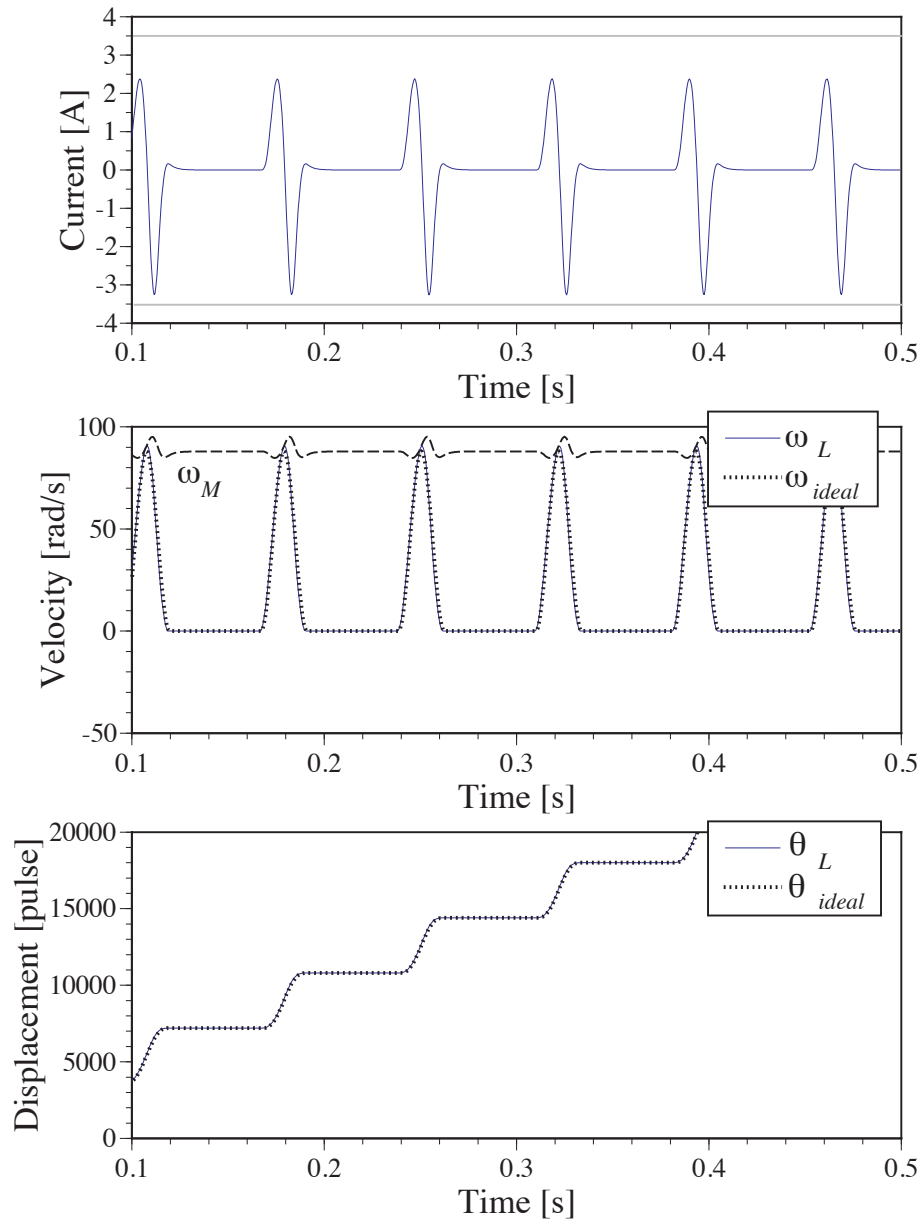


図 2.13 カム機構による間欠運動 (14 [index/s])

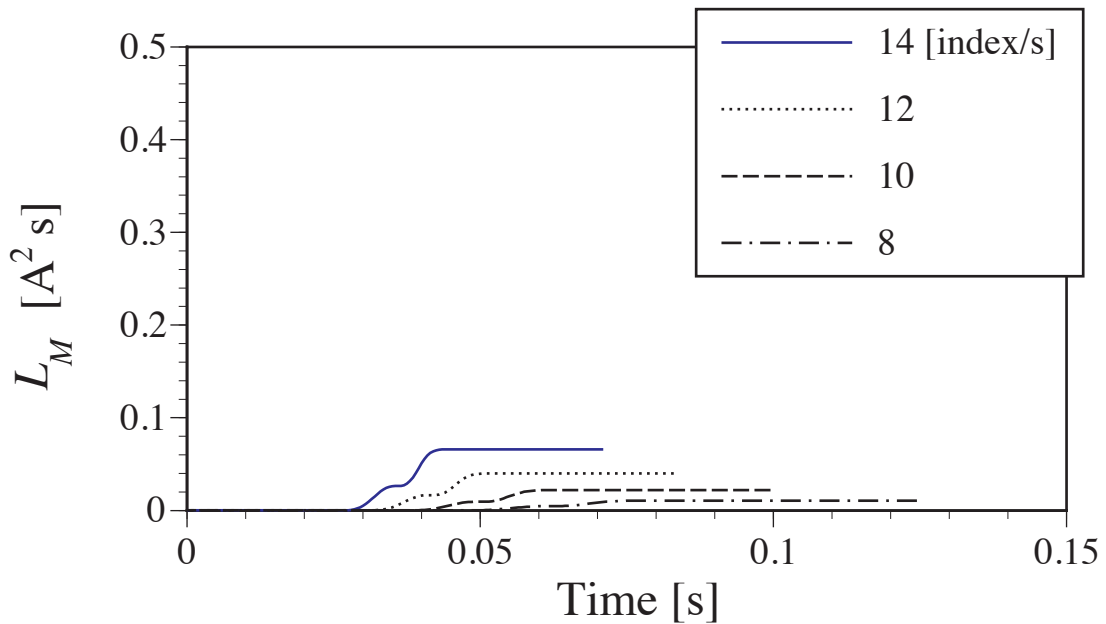


図 2.13 カム機構によるモータの消費エネルギー

2.4 考察

2.4.1 モータに流れる電流値の飽和の影響

サーボ系を用いて得る間欠運動においては図 2.4 に見られるようにその運動の高速化の限界は駆動用モータに流れる電流の大きさであり電流がその限界値に達する速度が高速化の限界であった。これに対してカム機構においてはモータに流れる電流値がその限界を超えるようなインデックス速度を得ることが可能である。その一例を図 2.14 に示す。図 2.14 はインデックス速度 25 [index/s] の場合であり、モータに流れる電流値はその限界に達している。それでもカム出力軸にはほぼ確実に間欠運動が得られており、これよりカム機構により間欠運動を得る方がモータ駆動系の能力に依存せず高速でかつ確実な間欠運動が得られるといえる。

また図 2.14 より入力軸であるモータ軸の回転変動 ω_M に伴い出力軸側のカム加速度曲線 θ_L が歪み、加速側が小さく減速側が大きくなるといった非対称な加速度特性を示し、出力軸側の加速度 α_L は理想とするカム曲線 α_{ideal} からはかなり歪曲された加減速を行ってしまっていることがわかる。

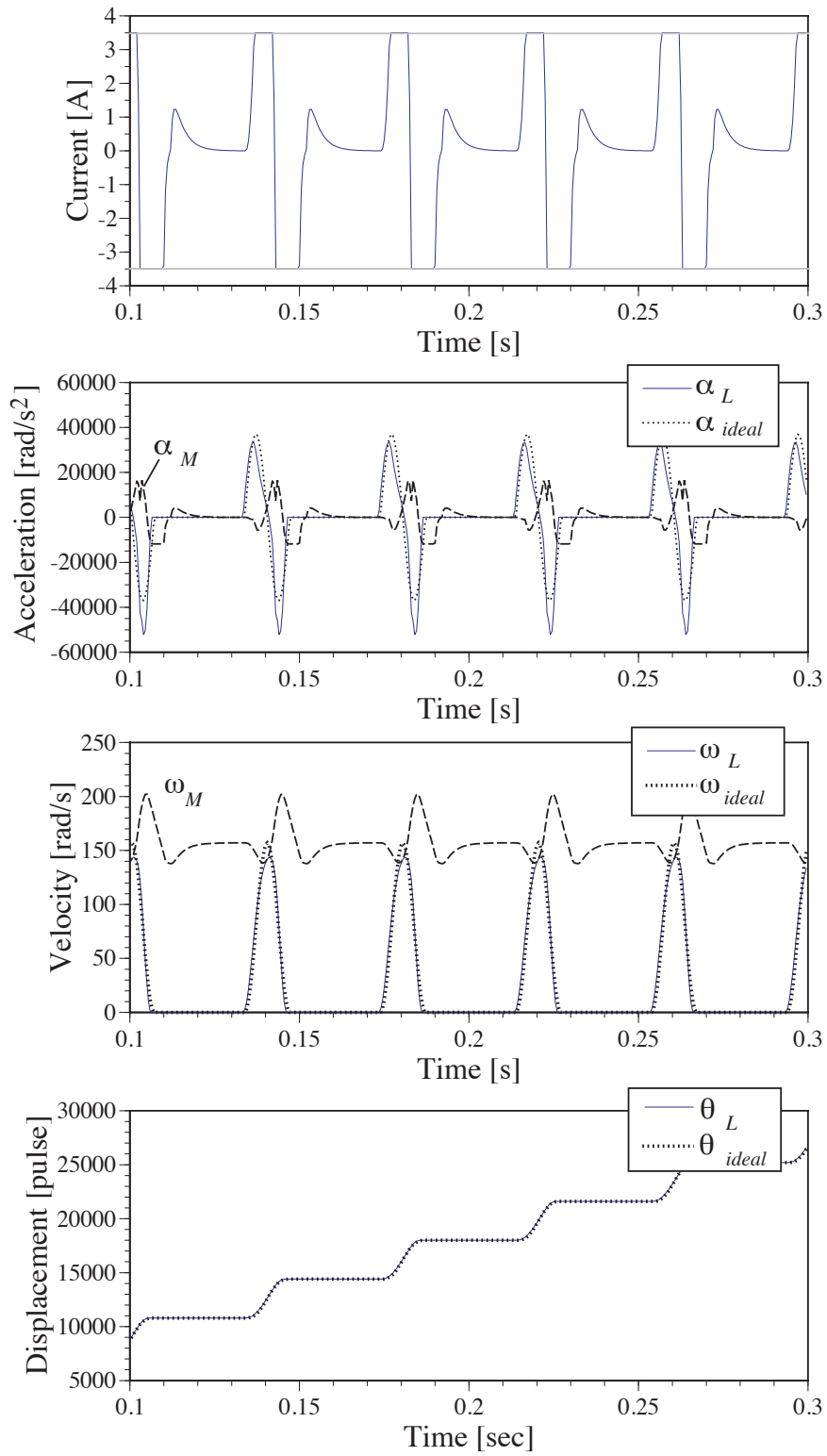


図 2.14 カム機構による間欠運動 (25 [index/s])

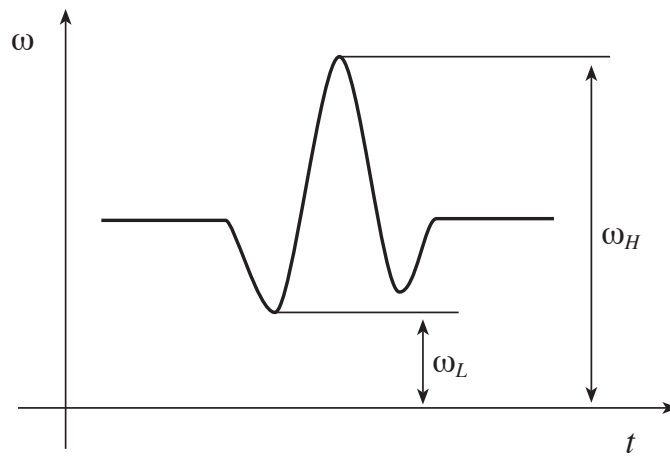


図 2.15 モータの速度の最大値と最小値

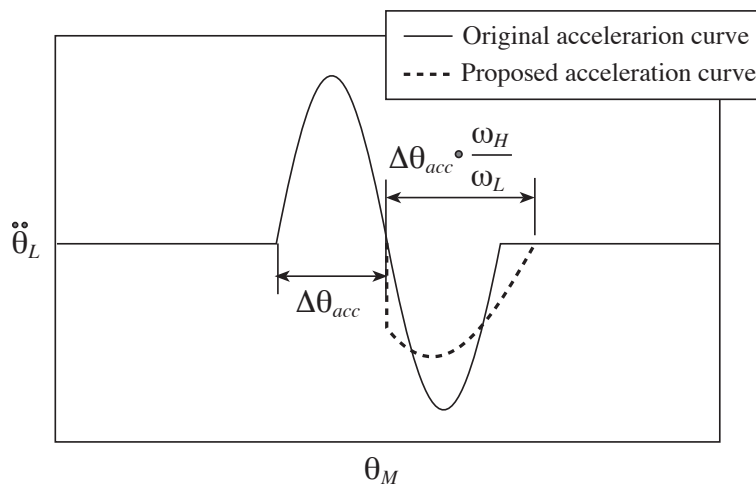


図 2.16 提案する加速度曲線

2.4.2 非対称なカム曲線の提案

カム機構を利用した場合、これまでに示してきたようにインデックス速度を上げるほど、駆動反力により入力軸側モータの回転変動が大きくなり、このため運動時に得られる実際のカム曲線は歪曲してしまい、加速側が小さく減速側が大きくなるといった非対称な加速度特性を示すようになる。残留振動特性の

観点からポリダイナカム等を用いた研究[14, 15]もあるが、本研究では運動時に得られるカム曲線の歪曲を小さくする方法としてカム機構に与えるカム曲線の減速時間を伸ばし加速側と減速側とで非対称にすることで実際に出力されるカム曲線の歪曲を抑えることを試みる。図 2.15 に示すように、モータの回転速度変動時の最小速度を ω_L 、最大速度を ω_H とし、加速時間を $\Delta\theta_{acc}$ としたとき、減速時間 $\Delta\theta_{dec}$ を以下のように設定する。

$$\Delta\theta_{dec} = \Delta\theta_{acc} \frac{\omega_H}{\omega_L} \quad (2.12)$$

修正した加速度曲線は図 2.16 に示すように加速側が大きく減速側が小さくなる。減速時間を伸ばすことによりインデックス減速時に入力軸側に加わる駆動反力を低減すれば、出力軸に出力されるカム曲線の非対称性を解消できることになる。この非対称なカム曲線を用いた間欠運動のシミュレーション結果を図 2.17 に示す。比較のためにインデックス速度は図 2.14 と同じ 25 [index/s] に設定した。図 2.14 と図 2.17 を比較すると加速度特性を加速側と減速側とで非対称にすることで駆動反力による入力軸側の速度変動が小さく抑えられ、出力軸側で出力されるカム曲線の歪曲も小さく抑えられることがわかる。

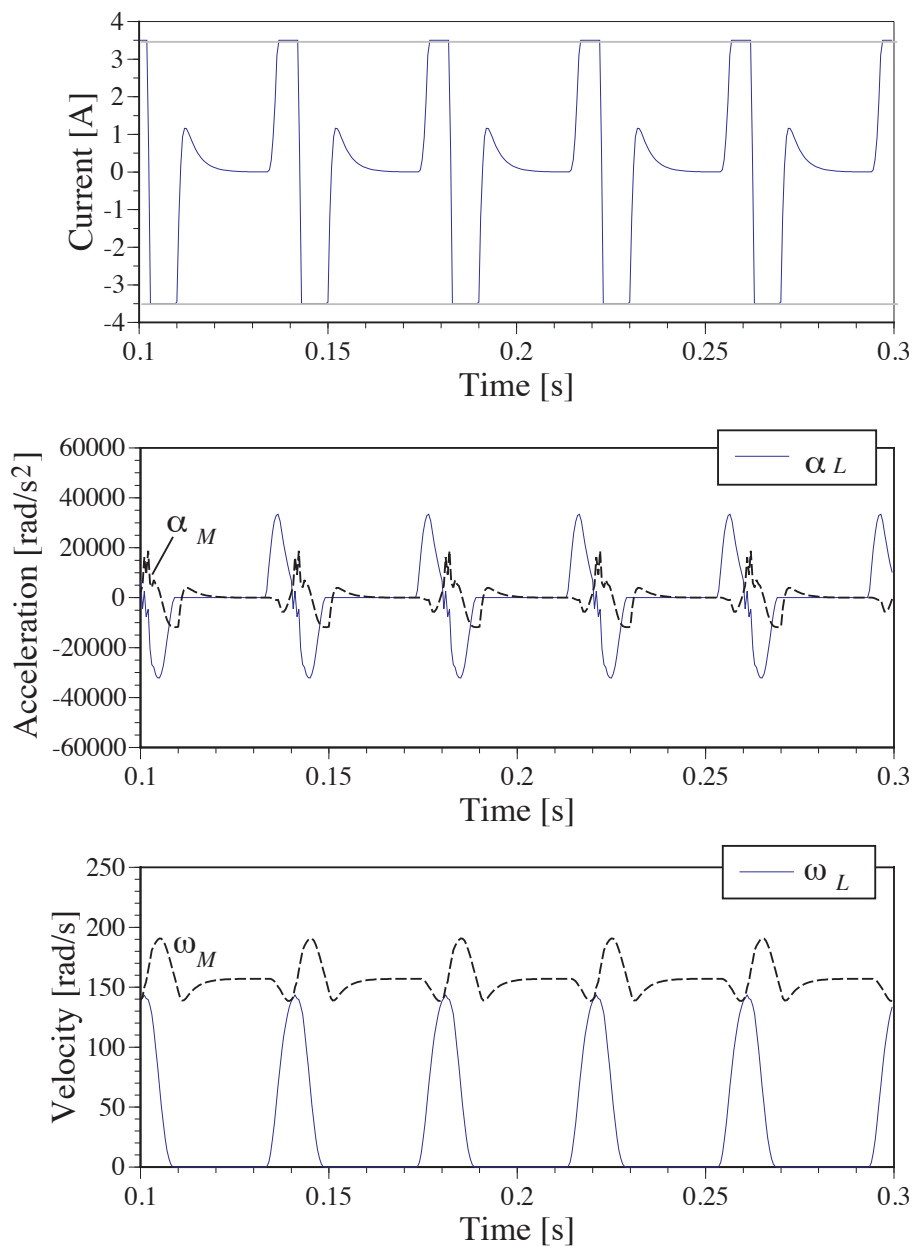


図 2.17 提案する加速度曲線を用いた間欠運動 (25 [index/s])

2.5 まとめ

本研究では間欠運動機構の設計にあたり、比較のために同じ容量をもつモータ系を用いて同じ大きさの慣性モーメントの負荷を駆動する場合を扱ってきた。そしてサーボ系を用いた場合とカム機構を用いた場合とを比較し、高速化にあたっての問題点とその解決方法を考察した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) メカトロニクスを応用したサーボ系により機械系には様々な運動が出力できるようになっているが、カム機構のように一定の加減速を繰り返す運動では、サーボ系に比べカム機構の方がモータの消費エネルギーが小さくかつ高速化が可能である。
- (2) サーボ系による間欠運動の生成においてはモータに流れる最大電流がその限界値を超えると間欠運動の生成が困難になるが、カム機構の場合にはモータ電流がその限界値を超えてカム加減速特性の歪曲が大きくなっても確実に間欠運動が得られる。
- (3) サーボ系を用いた間欠運動においては負荷の保持剛性はサーボモータ自身のもつ保持剛性に依存するため、カム機構に比べその保持剛性は極めて低い。
- (4) これよりサーボ系にはブレーキを採用する必要性が生じる。カム曲線のもつ加速度特性において減速時間を伸ばして加速側と減速側とを非対称にすることにより、入力軸であるモータ軸の回転むらがあっても出力軸における加減速の歪曲を解消することができる。

モータ系の容量および駆動負荷がそれぞれ異なる場合のサーボ系とカム機構においては上述の結論をそのままあてはめることはできないが、間欠運動機構に対する設計の基本的な考え方は同じである。また本研究ではカム曲線の一例としてサイクロイド曲線についてのみ扱ってきたが、他のカム曲線についてもおおむね同様の傾向の結果が得られるであろうことは本研究における議論の中から容易に類推できるものである。

第3章 サーボモータ系に含まれる電流制限と 電流フィードバックとの関連に関する考察

3.1 はじめに

サーボモータを利用して負荷を駆動するとき、通常そのモータに見合ったサーボドライバを選定して用いることが多い。市販されているこうした一般的なサーボドライバには過電流に対してモータやドライバを保護する目的から、ドライバ回路内に飽和要素を設けて、モータに流れる電流値に制限を与えている[10, 11]。他方、実際のサーボモータの利用状況においては、モータに流れる電流値が飽和してしまうような使い方まで、その使用範囲を拡大して使われていることも多い。これらのことより、モータに流れる電流値が飽和してしまうような非線形な状況を想定し、そのときにモータの運動がどのような状況を示すかを明らかにしておくことが求められている[16 - 22]。特にドライバ回路内に積分機能を持つ場合、飽和要素によりワインドアップ現象を起こすことから、その対策として操作量の飽和が生じている間、積分演算を停止させる方法[23, 24]や高次の制御器に対して制御入力を操作する方法[25]、飽和のあるシステムと飽和の無い理想的なシステムの応答の偏差を用いる方法[26]、飽和要素の入出力の偏差を用いる方法[27 - 29]などの研究が多くなされてきている。

一方、サーボモータを駆動するサーボドライバには変位や速度のフィードバックループ以外にモータに流れる電流をフィードバックする電流ループも付加されている。電流をフィードバックすることはこれまでモータの電氣的な時定数を見かけ上小さくできることのみとその効果があるように捉えられてきたが、モータの電流を制限するための飽和要素を付加したシミュレーション結果を詳細に検討してみると、電流フィードバックを与えることの効果はそれだけではないことがわかってくる。また、サーボモータの速度制御系における伝達関数だけからでは電流をフィードバックすることの意味は十分に把握することができない。

これより本研究では計算機シミュレーションによりサーボドライバ内の各所における内部電圧値の変化を、電流をフィードバックしないサーボモータの速度制御系と比較することにより、電流フィードバックのもつ意味をより明確にしたいと考える。とりわけ、モータに流すことのできる最大電流に制限を与える目的として付与するサーボドライバ内の飽和要素に対して電流フィードバ

クがどのように寄与できるかについて明らかにしたい。そして、その結果としてモータに流れる電流値に制限を与えるためにはモータの電流フィードバックが必須のものであることを示したい。

3.2 電流フィードバックを持たないサーボモータの速度制御系とその応答

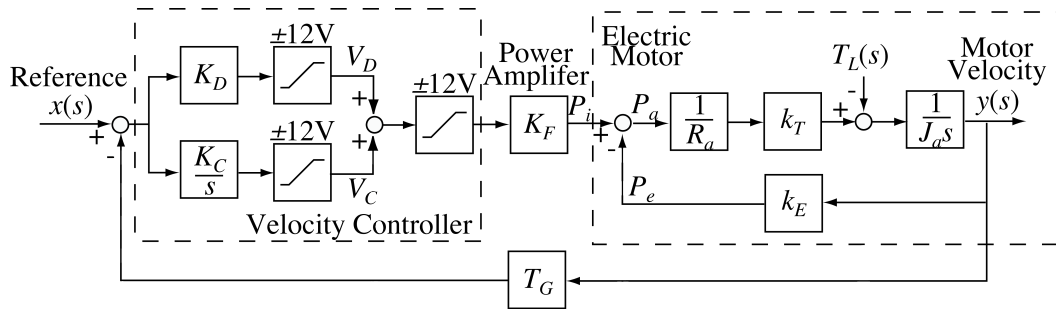
電流フィードバックを持たないサーボモータの速度制御系におけるブロック線図とその線形域における周波数特性の一例を図 3.1 に示す。図 3.1 に示される速度制御系における線形域での伝達関数は式(3.1)で与えられる。

$$y(s) = \frac{k_T K_F (K_D s + K_C)}{J_a R_a s^2 + k_T (K_F K_D T_G + k_E) s + k_T K_F K_C T_G} x(s) - \frac{R_a s}{J_a R_a s^2 + k_T (K_F K_D T_G + k_E) s + k_T K_F K_C T_G} T_L(s) \quad (3.1)$$

ここで実用に供されているサーボモータ系を考慮し、図 3.1 に示されるサーボドライバ内に含まれている代表的な非線形要素を整理しておく。まずサーボドライバ内の演算電圧値の上限($\pm 12V$)、すなわち操作量飽和の存在を考慮することができる。他方、モータはその駆動中はおおむね動力を発生させる動作が多いが、とりわけ負荷を減速する場合には、その駆動状況によってはモータが発電機として動作する場合($0 < P_i < P_e$ or $P_e < P_i < 0$)も考えられる。モータを駆動する供給電圧(P_i)よりもモータが発生する誘導電圧(P_e)の方が高くなり、発電機として動作する場合には、実際のサーボドライバの回路においてはその上昇電圧を電源側で吸収することができない。従って発電機として動作している間はモータの減速は速やかに実行されないことになる。実際にはこれらの二つの非線形特性がサーボモータを駆動している間にその動特性に影響を及ぼしてくると考えられる。

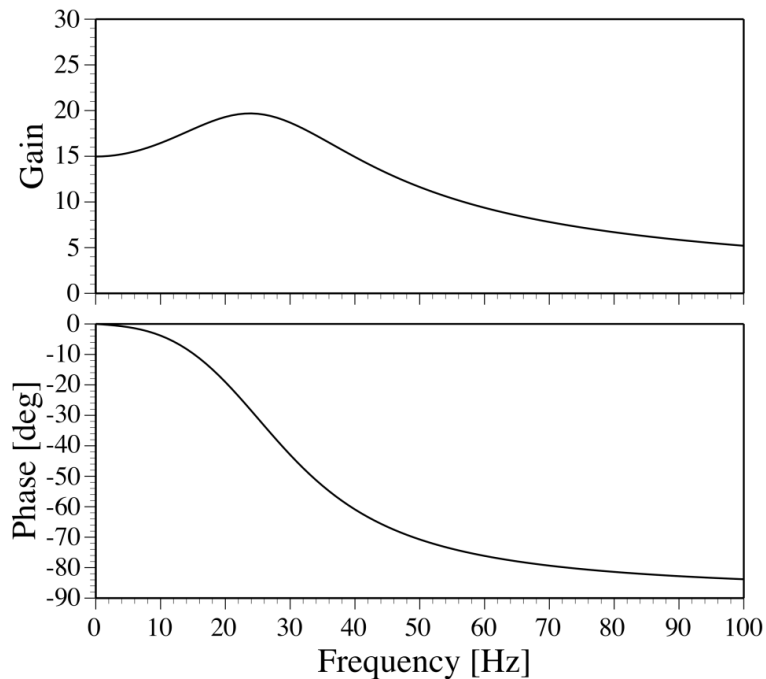
上述した二つの非線形特性を考慮に入れたときの電流フィードバックを持たないサーボモータの速度制御系 (図 3.1) におけるシミュレーション事例を図 3.2 に示す。制御入力として台形速度パターンを与えたときのシミュレーション結果である。サーボドライバ内における操作量飽和の影響により加速時と減速時における応答が非対称になっている。モータの回転速度が大きくなり、その時のモータの誘起電圧が大きくなると速度アンプにはそれ以上の目標電圧を要求

することになる。このため速度アンプ内の電圧値が飽和しやすくなってくることがわかる。操作量が飽和すると制御性能は極端に悪化することになる。このことより加速時よりも減速時の方が操作量飽和の影響を受けにくく、減速時の方が良好な制御性能を示してくれることがわかる。



$$\begin{aligned}
 J_a &= 0.0002795 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2 & T_G &= 0.0668 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s}) \\
 R_a &= 8.7 \ \Omega & K_C &= 1336 \\
 k_T &= 0.188 \text{ Nm}/\text{A} & K_D &= 8 \\
 k_E &= 0.187 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s}) & K_F &= 5
 \end{aligned}
 \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < P_i < P_e \text{ or } P_e < P_i < 0 \rightarrow P_a = 0 \\ \text{otherwise} \rightarrow P_a = P_i - P_e \end{array} \right.$$

(a) コントローラ内に飽和要素をもつ一般的な速度制御系



(b) 線形領域における速度制御系の周波数応答特性

図 3.1 電流フィードバックを含まない速度制御系のブロック線図と周波数応答特性

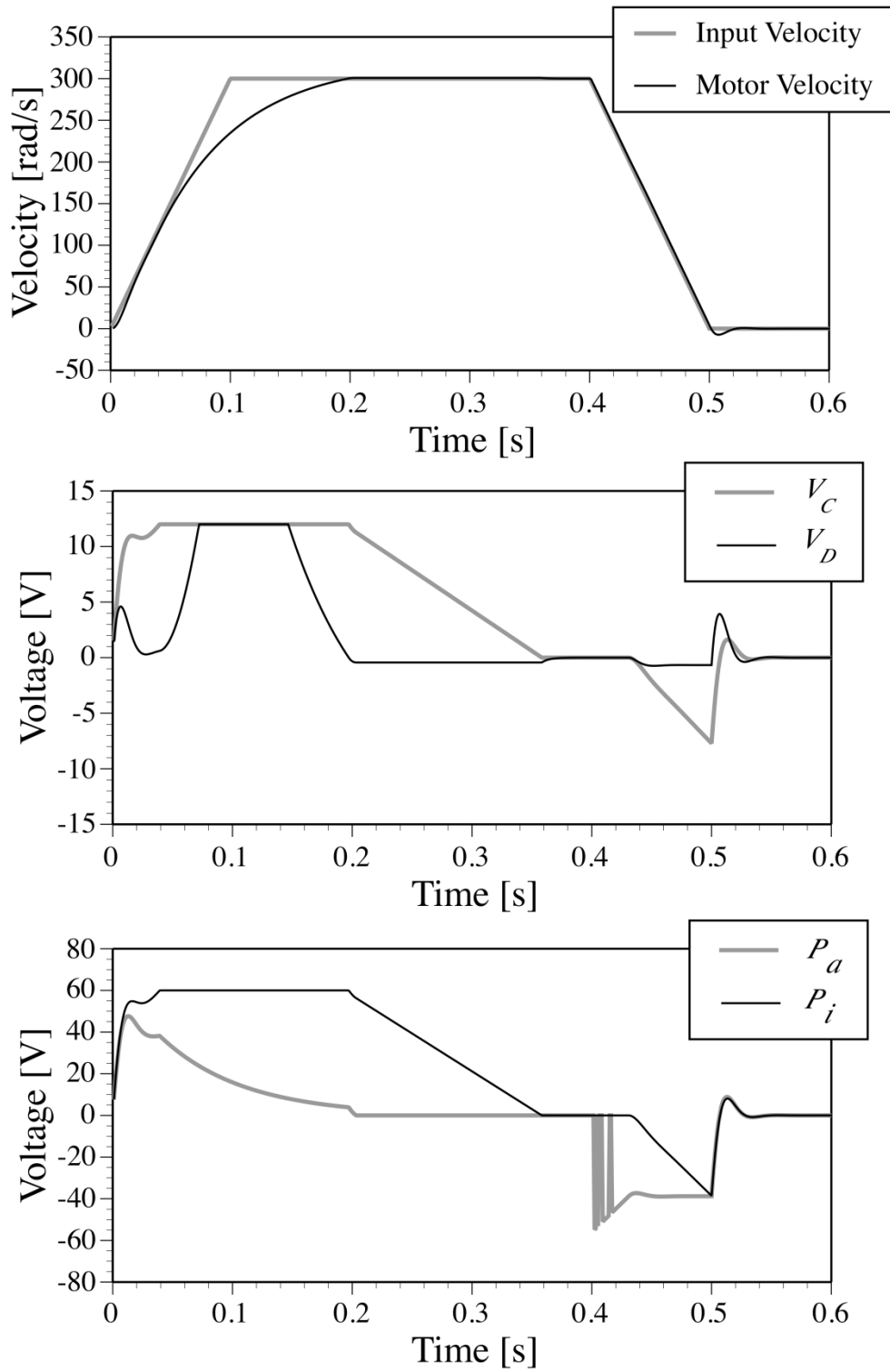


図 3.2 モータが発電機として機能しない場合（電流フィードバックなし）

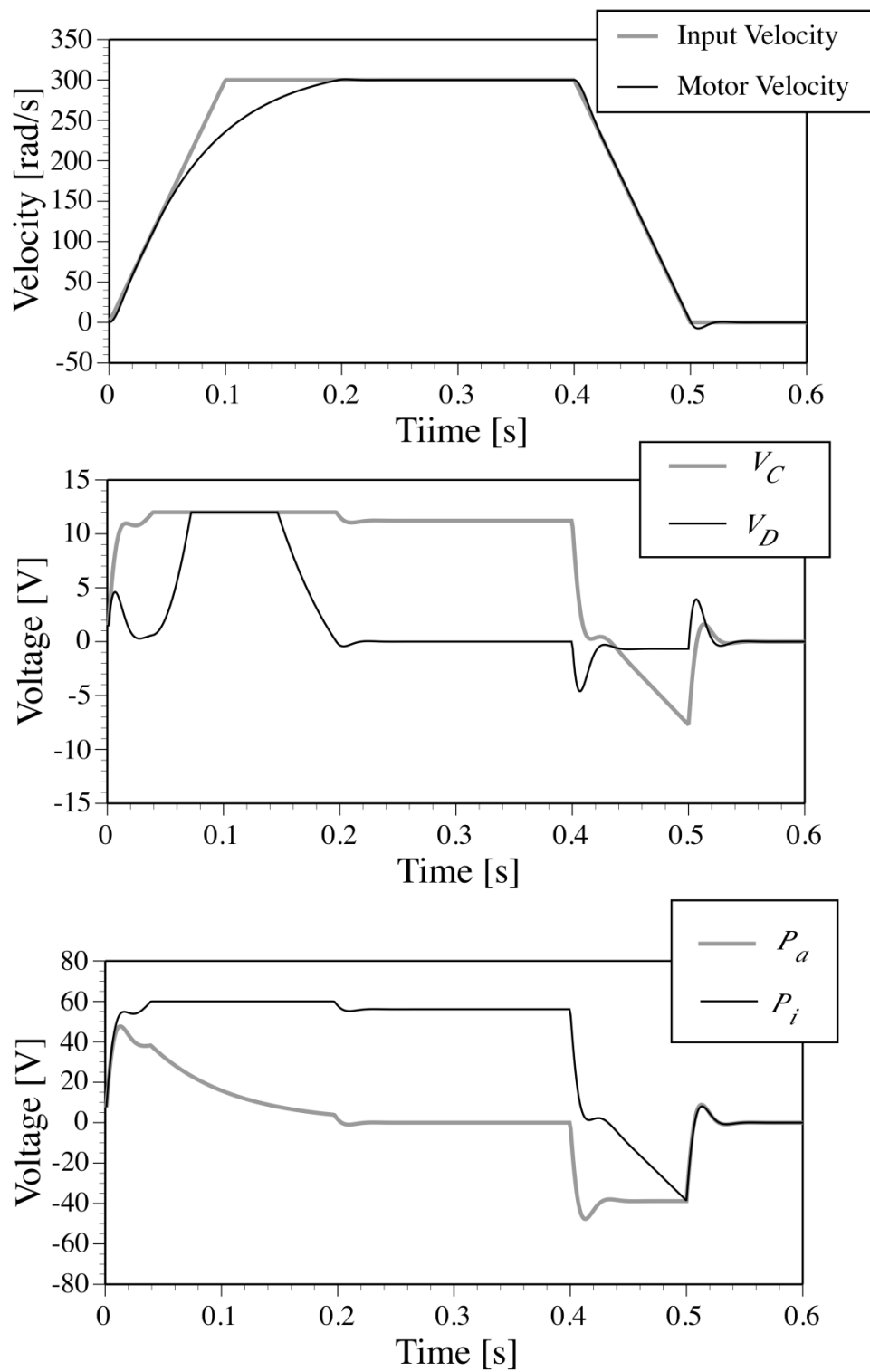


図 3.3 モータが発電機として機能している場合（電流フィードバックなし）

また、電流フィードバックを持たないサーボモータにおいては速度アンプの飽和値がモータの最高回転速度を決めてしまうこともわかる。他方、操作量の飽和がなければ、当然のことであるが、加速時と減速時の応答は対称になる。

モータが発電機として機能しているときの回生電流が電源側で吸収できると仮定した場合のシミュレーション結果を図 3.3 に示す。モータの運動そのものに大差はないが、図 3.2 と比較してモータが発電機として機能し始めた直後、すなわち $P_a=0$ となった以降のサーボドライバ内の内部電圧値、とりわけ V_c と P_i の電圧値に大きな差が見られる。フィードバック系を構成しているため、図 3.2 と 3.3 の両者の出力であるモータの速度はほぼ同じであってもその出力を得るための内部電圧の状態は大きく異なっていることを示している。

制御入力として正弦波を目標速度入力として与えたときの応答とその内部電圧の状態を図 3.4 に示す。図 3.3 は制御入力レベルが小さくてサーボアンプ内の操作量飽和の影響を受けないとき、図 3.5 は制御入力レベルが大きいため操作量飽和の影響を受けているときのシミュレーション結果である。操作量飽和の影響を受ける場合の応答とその内部電圧の変化は複雑であり、シミュレーションを通すことにより初めてそれらの結果を評価できることになる。図 3.4 中に含まれる波形歪はモータが発電機として機能したときに生ずる歪である。ドライバ回路中にはこうした波形歪が生じてモータの回転速度にはその影響はほとんど現れてないことがわかる。また、図 3.5 中の P_e の電圧値に見られるように P_i を越えた大きな電圧値 (P_e) がモータに印加されることがわかる。このことは飽和要素の設定によりモータに流れる電流値を制限しようとしても実際にはそれよりはるかに大きな電流がモータに流れてしまうことを示すものであり、図 3.1 に示すような制御系ではモータに流れる最大電流値を飽和限界値以下に抑えておくことができないことを示している。

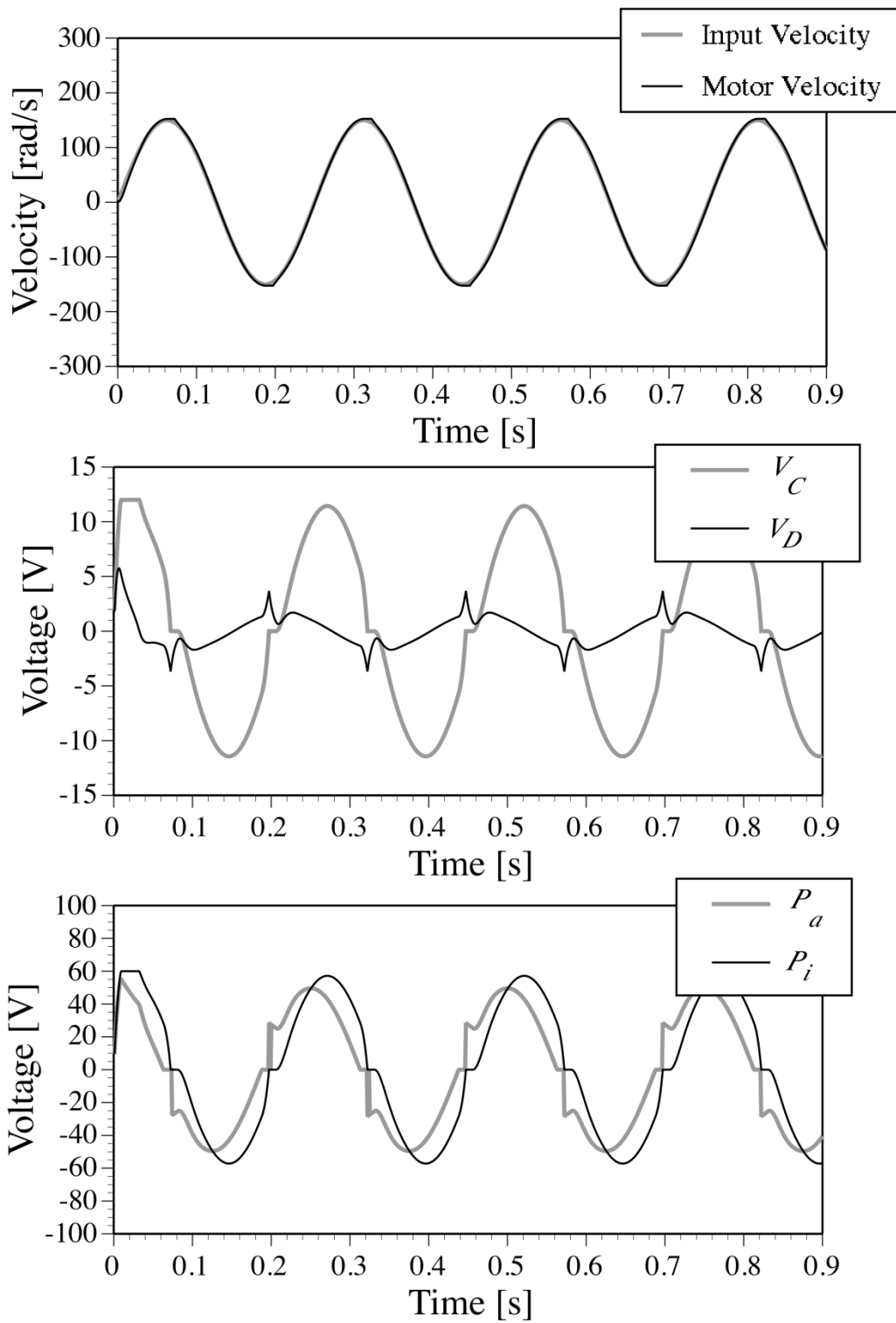


図 3.4 正弦波入力に対する応答（電流フィードバックなし・飽和要素なし）

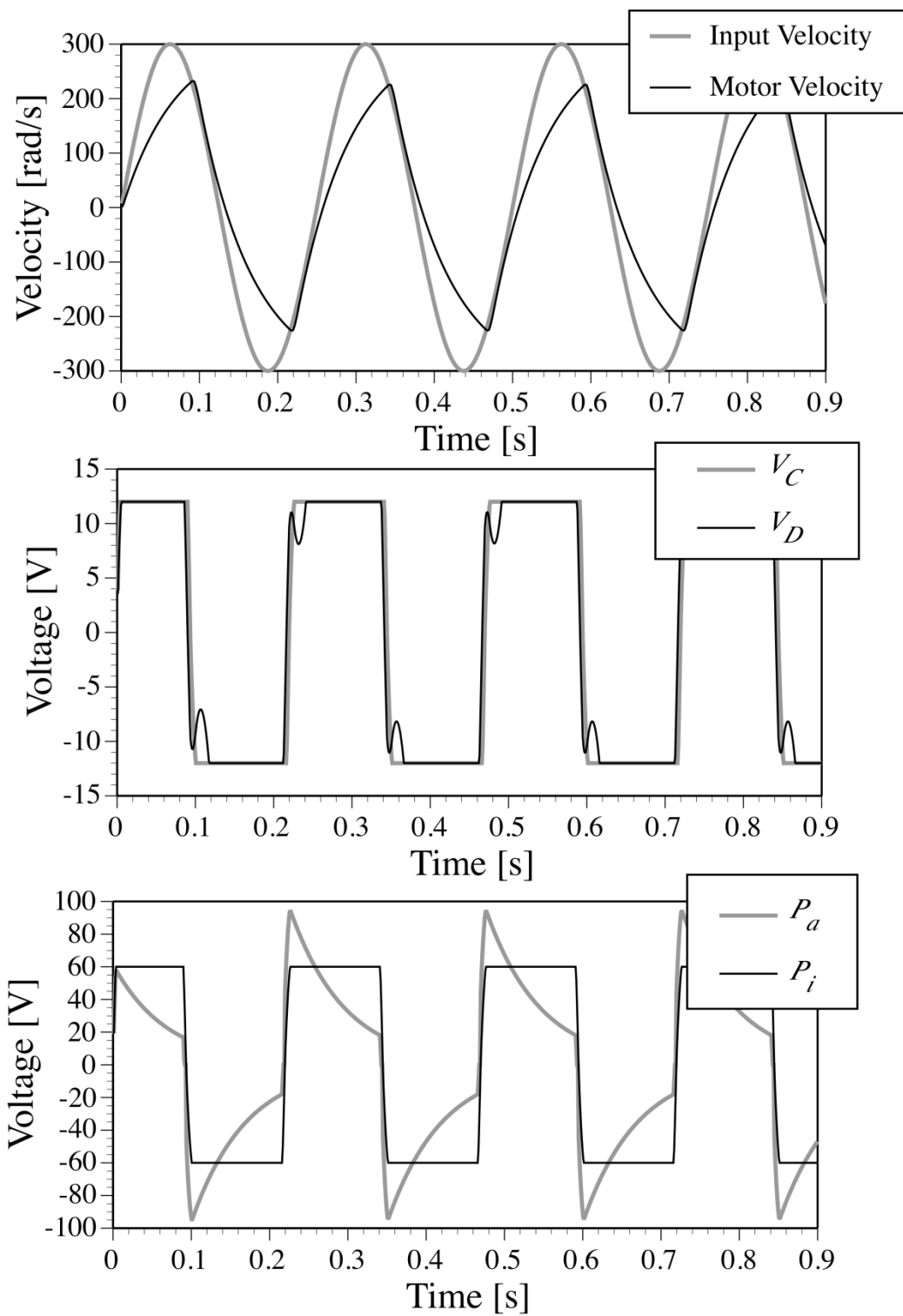
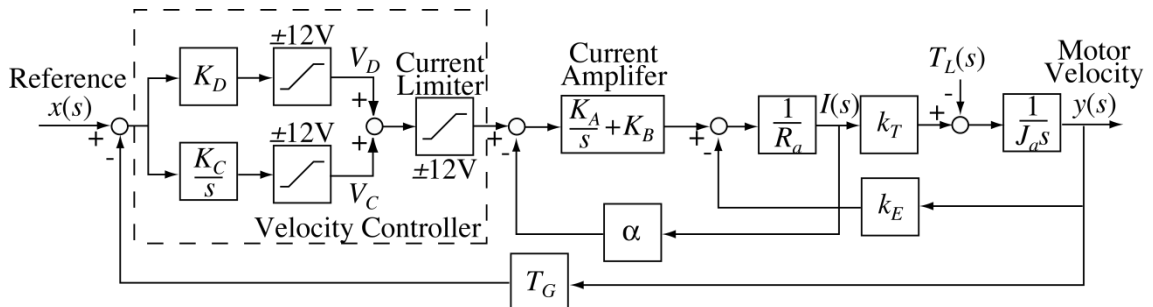
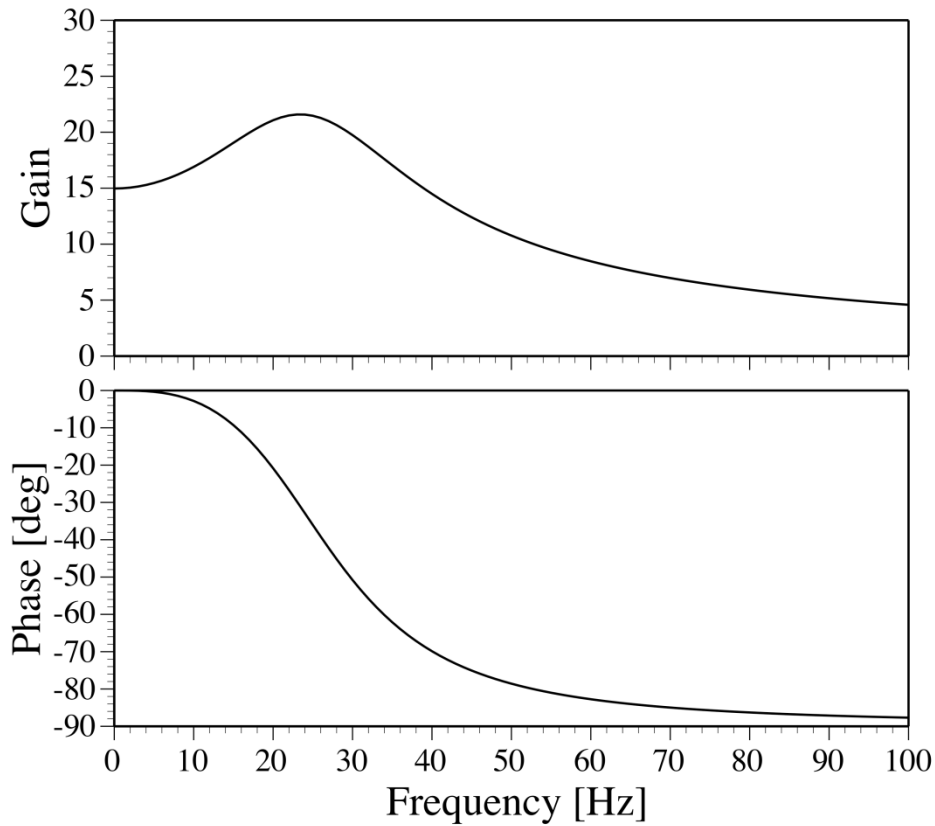


図 3.5 正弦波入力に対する応答（電流フィードバックなし・飽和要素あり）



$$\begin{aligned}
 J_a &= 0.0002795 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2 & K_A &= 4023.8 \\
 R_a &= 8.7 \ \Omega & K_B &= 2.6 \\
 k_T &= 0.188 \text{ Nm/A} & K_C &= 1336 \\
 k_E &= 0.187 \text{ V/(rad/s)} & K_D &= 8 \\
 T_G &= 0.0668 \text{ V/(rad/s)} & \alpha &= 2
 \end{aligned}$$

(a) 飽和要素を含む速度制御系



(b) 線形領域における速度制御系の周波数応答特性

図 3.6 電流フィードバックを含む速度制御系のブロック線図と周波数応答特性

3.3 電流フィードバックを持たせたサーボモータの速度制御系とその応答

電流フィードバックを持たせたサーボモータの速度制御系におけるブロック線図とその線形域での周波数特性の一例を図 3.6 に示す。周波数特性においては、電流フィードバックを持たないサーボモータの速度制御系における周波数特性（図 3.1）とほぼ同等な特性である。電流アンプのゲイン(KA, KB)が十分に大きい場合には、図 3.6 に示す制御系の線形域での伝達関数は近似的に式(3.2)で表される。

$$y(s) = \frac{k_T(K_D s + K_C)}{J_a \alpha s^2 + k_T K_D T_G s + k_T K_C T_G} x(s) - \frac{\alpha s}{J_a \alpha s^2 + k_T K_D T_G s + k_T K_C T_G} T_L(s) \quad (3.2)$$

式(3.2)から明らかなようにモータ制御系に電流フィードバックを含ませると制御特性（伝達関数）においてモータが発生する誘起電圧 (k_E) の影響を無視できることになる。従って、動作時にモータがみかけ上発電機として機能することはなくなる。

図 3.2 の応答と比較するために、電流フィードバックを持たせたサーボモータの速度制御系において、制御入力として同等な台形速度パターンを与えたときのシミュレーション結果を図 3.7 に示す。この場合にはサーボアンプ内の操作量飽和が起らないため、制御性能の劣化は見られず、加速時と減速時における応答が対称的になっている。

図 3.2 との比較から、電流フィードバックを持たせることにより、可能なモータの回転速度が大きくなり、その時の誘起電圧が大きくなっても速度アンプ内の電圧値を低く抑える効果を与えられることがわかる。他方、電流フィードバックを持たせた場合、速度アンプの出力はモータに流れる電流目標値を与えることになるため、意図的にリミッターとして飽和要素を設け、モータに流れる電流値に制限を与えることが可能となる。このことは電流フィードバックを持たせることにより可能になる。図 3.8 には操作量飽和を伴うような大きな制御入力に対する応答を示す。操作量の飽和により応答に遅れは見られるもののモータに流れる最大電流値は飽和限界を越すことはない。

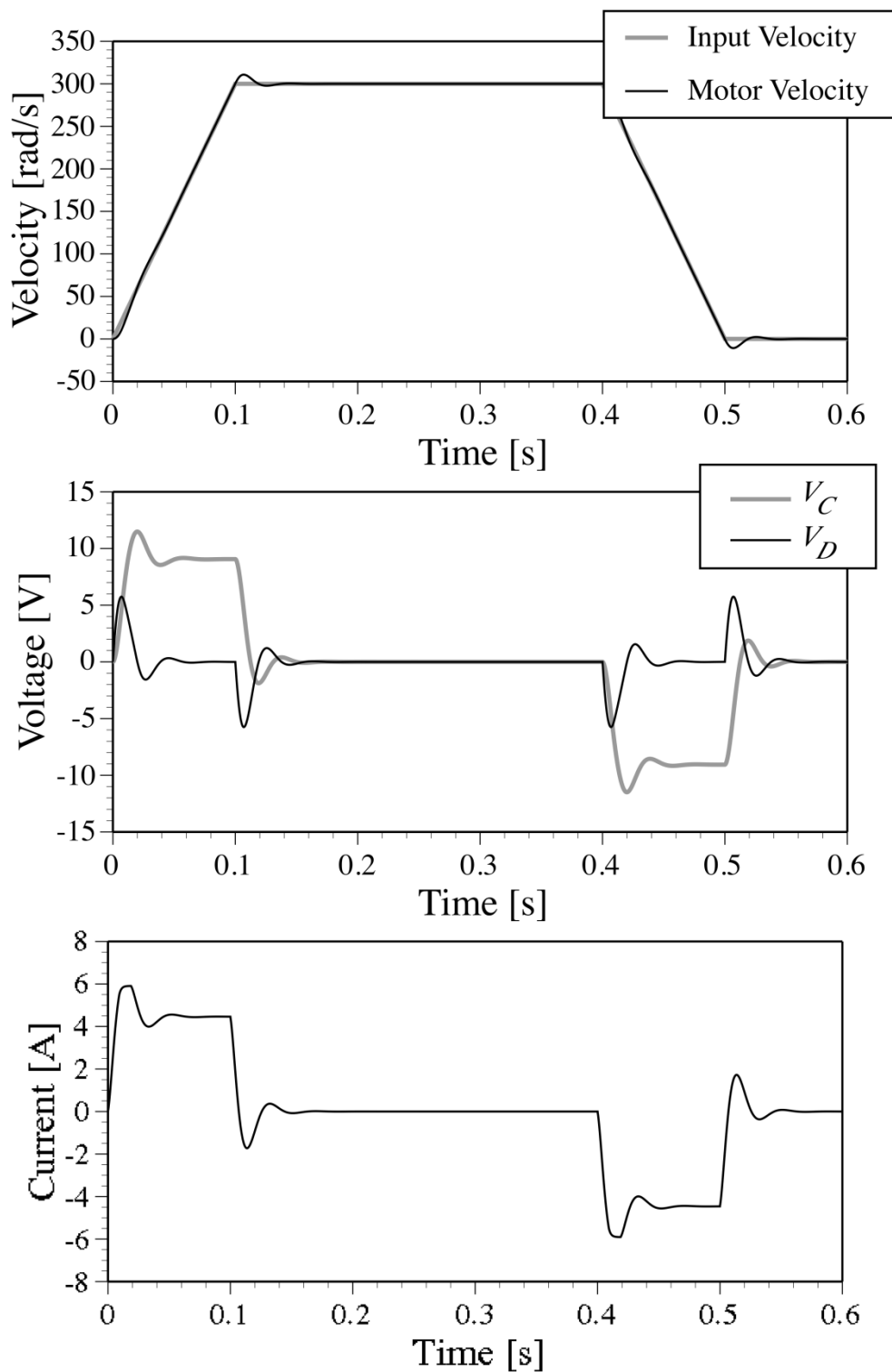


図 3.7 飽和要素の影響のない場合の応答（電流フィードバックあり）

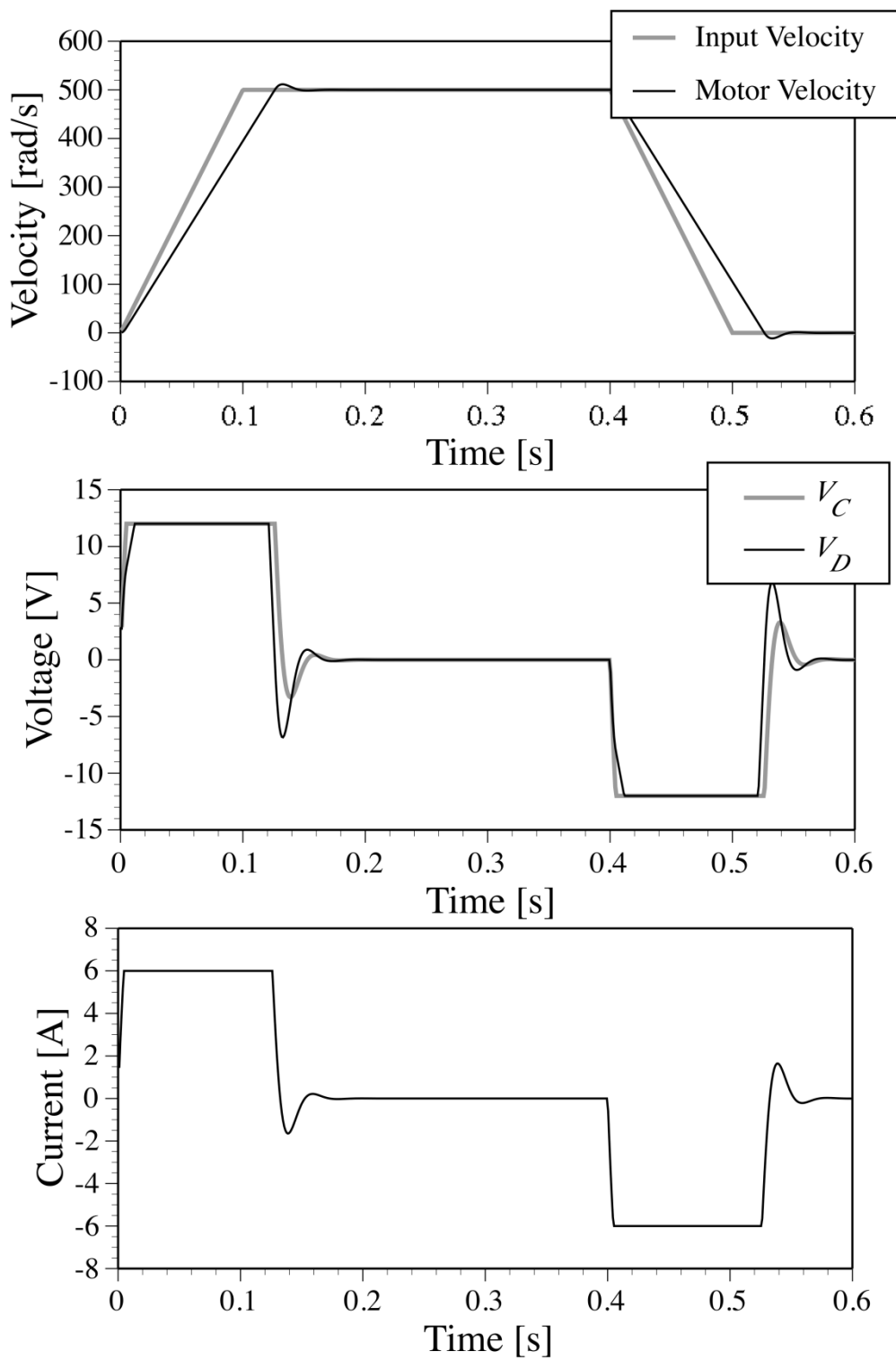


図 3.8 飽和要素の影響のある場合の応答（電流フィードバックあり）

制御入力（目標値）として正弦波を与えたときの速度応答とその内部電圧の状態を図 3.9, 3.10 に示す。図 3.9 は目標速度入力の周波数が小さくてサーボアンプ内の操作量飽和の影響を受けないとき，図 3.10 は目標速度入力の周波数が大きいいため操作量飽和の影響を受けるときのシミュレーション結果である。操作量飽和の影響を受ける場合の応答とそのときの内部電圧の変化は複雑になるが，電流フィードバックを持たせることによりモータに流れる最大電流値は飽和限界を越すことはない。

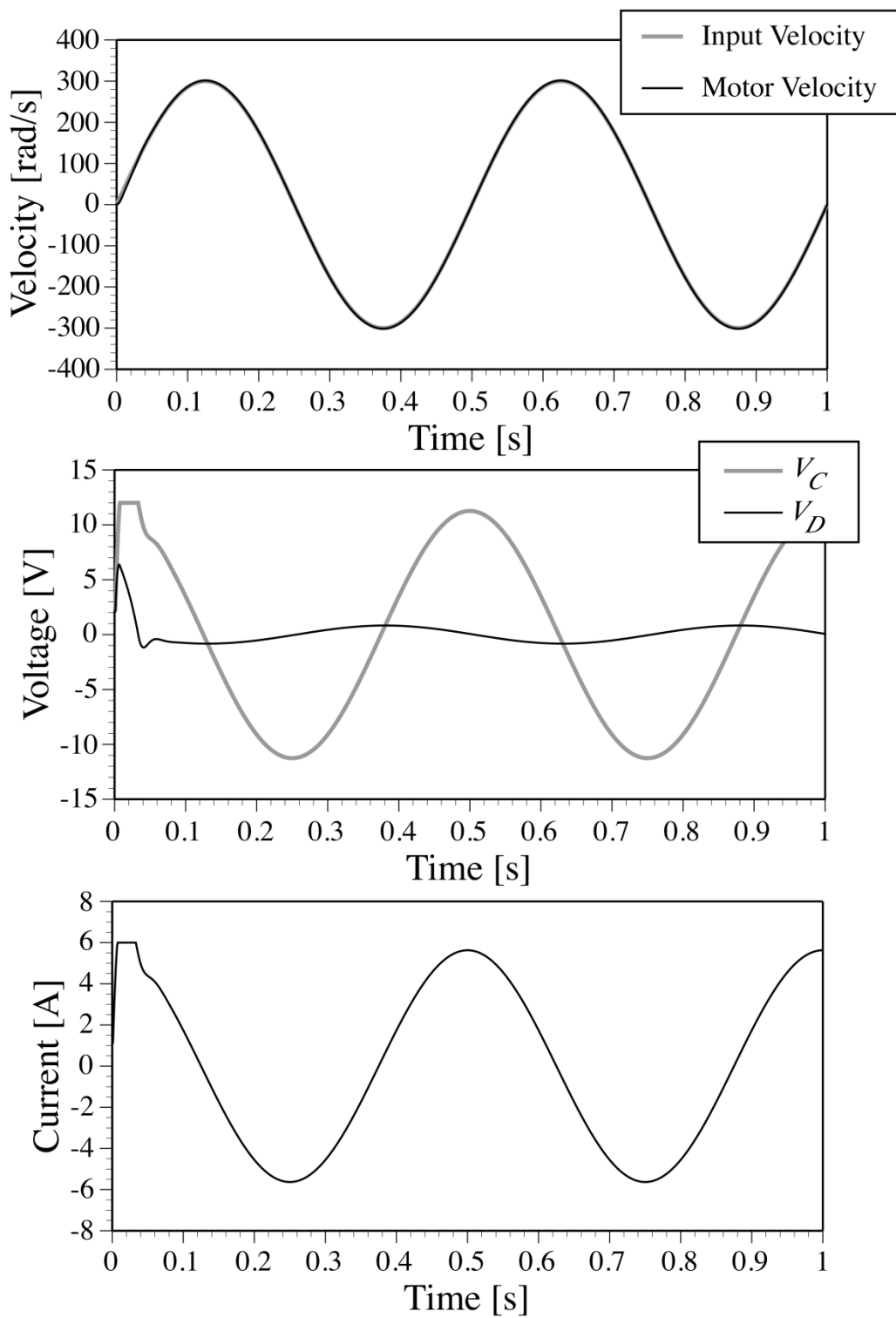


図 3.9 正弦波入力に対する応答（電流フィードバックあり, 2Hz）

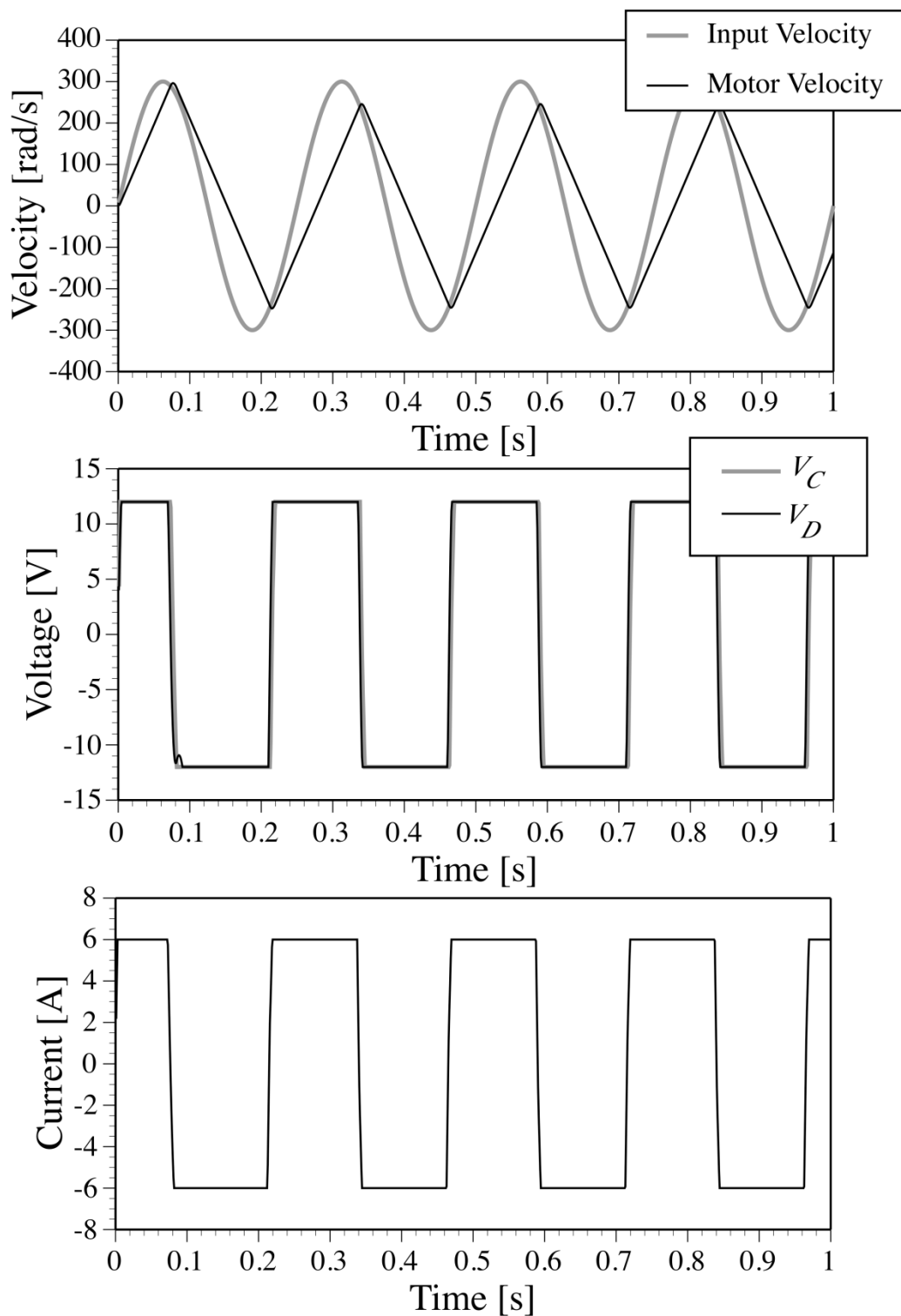


図 3.10 正弦波入力に対する応答（電流フィードバックあり, 4Hz）

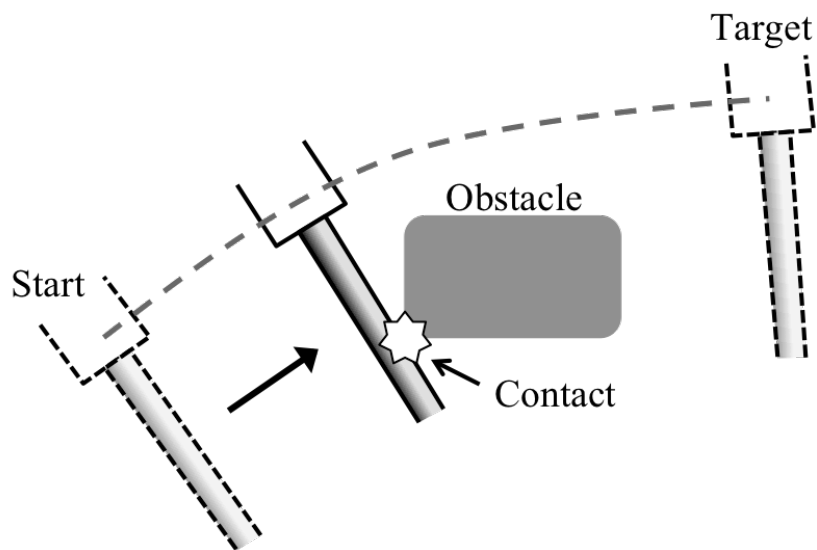


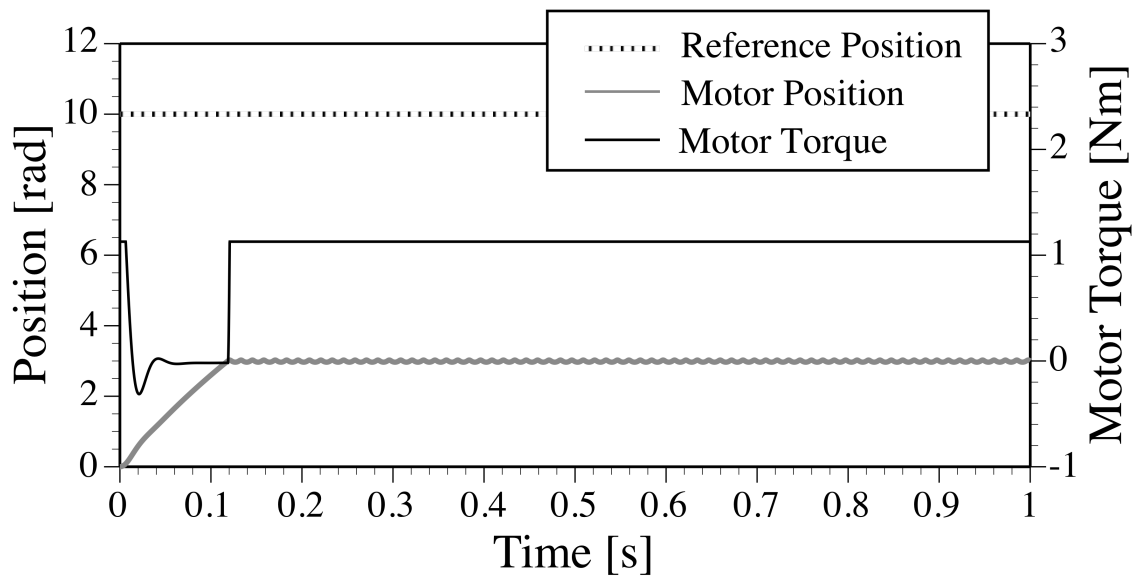
図 3.11 障害物により経路を妨げられる状況

3.4 電流フィードバックを与えることによる力制御の効果

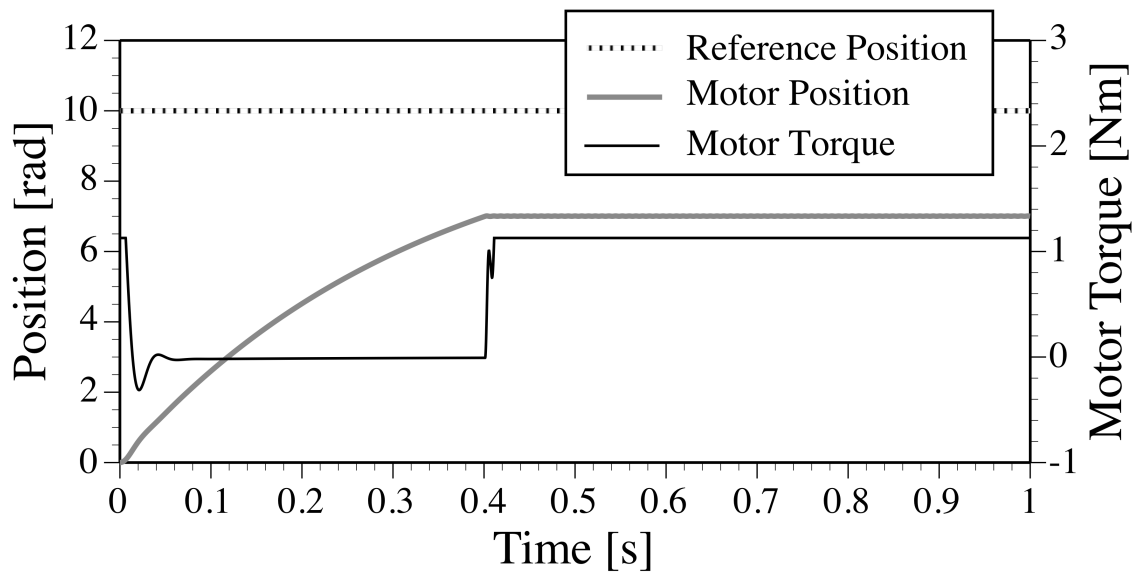
(負荷の移動経路と力制御との両立)

モータの速度あるいは位置制御系に電流フィードバックを持たせ、飽和要素を挿入することによりモータに流す最大電流を制限することができる。このことは単にモータおよびドライバ回路を過電流に対して保護するのみではなく、ロボット等においてアームの移動経路の制御とアームが対象物を押し付ける力制御を両立させる効果を与えることができる。

図 3.11 に示すような位置制御系を構成して目標経路に沿って移動しているアームがその途中である種の障害物により運動が妨げられたときの状況を考えてみる。アームが移動している間は通常的位置制御系が機能しているが、アームが障害物により運動を妨げられて停止したその直後からアームは目標とする移動経路からはずれてくる。そしてアームは障害物を押し付ける動作に入ることになる。このときの押し付け力は飽和要素によって決められたモータへの最大電流値である。このことは逆にモータに流す最大電流値を飽和要素のレベルの高さにより意図的に制限すればモータに流れる最大電流値に見合った押し付け力を障害物に与えられることになる。



(a) 障害物が経路上の近い場所にある場合



(b) 障害物が経路上の遠い場所にある場合

図 3.12 制御系を変更せずに力制御を実現している例

アームが移動しているその移動途中で障害物により運動が妨げられ、その後、制御系を変更せず、障害物を押し付けて力制御を実現している動作シミュレーション事例を図 3.12 に示す。図 3.12(a)では 0.12 秒後、図 3.12(b)では 0.4 秒後にアームが障害物を押し始め、それ以降アームの運動は停止し、障害物に対してそれぞれ 1.1Nm の力で押し付けている様子を示している。通常の力制御においては制御系の構成を位置制御から力制御へ変更する必要があり、それに加えて力を検出するセンサも必要になる。これに対して、本研究の方式は制御系の構成を変更する必要も、また力センサも必要としなく、非常に簡便に負荷の移動経路と力の制御を両立させることができる。また、制御系を変更しないため、障害物ほどの位置にあってもかまわないことになる。

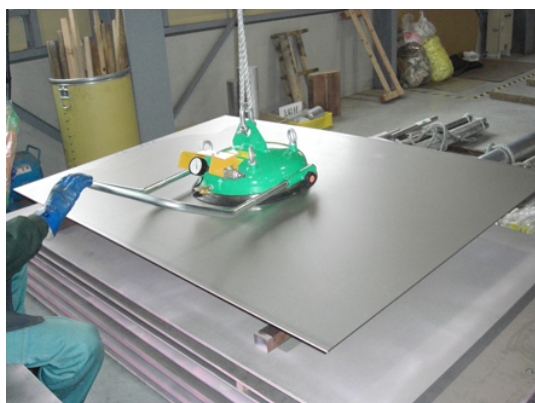
3.5 まとめ

サーボモータを駆動するサーボドライバに電流フィードバックを与えることにより、モータが発生する誘起電圧の影響を無視することができるようになるため、モータが発電機として動作する場合の回生エネルギーについて考慮する必要はなく、かつサーボドライバ内の動作電圧を低下させることができる。このためサーボドライバ中の操作量飽和に対する影響を小さくできることを示した。また電流フィードバックを与えることによりモータに流すことのできる最大電流値を正確に制御することができるため、モータやサーボドライバを過電流に対して保護することが可能になるだけでなく、モータに流すことのできる最大電流値を意図的に制限することにより負荷の移動経路と力制御とを両立させられることを示した。この場合の力制御においては力を検出するセンサを必要とせず、また、制御モードの変更を必要としないため、負荷がどの位置にあっても力制御を可能にすることができる。

第4章 真空吸着式搬送リフトのためのパワーアシスト技術の改善

4.1 はじめに

工場内や倉庫内での重量物の搬送装置の一つとして懸垂機構をもつ搬送リフトがある。中でも図4.1に示すような真空吸着式のパッドを利用した真空吸着式のリフトが普及してきている。真空吸着式搬送リフトは磁石で吸着できないような非鉄金属やガラス、また平面だけでなく柔軟物に対しても吸着・搬送することが可能であるため、様々な現場での搬送に利用されている[30]。搬送リフトにおいては使用者が高重量な物体を持ち上げる装置であるため、まず持ち上げ時において使用者にかかる重量負担をできるだけ小さくすることが求められる[31-33]。こうした要求を満たすためにクレーンのようにモータの駆動力を応用して重量物を持ち上げるパワーアシスト付きの搬送装置の開発[34-39]がこれまでは一般的であった。しかしこの方式には基本的に持ち上げられる対象物が持ち上がる瞬間に受ける衝撃力が考慮されていない。すなわち図4.2に示すように搬送用リフトにおいては持ち上げ以前には吊り上げロープがたるんだ状態であり、このため引き上げ動作時にそのロープのたるみがなくなった瞬間にロープが急に引っ張られ、その時に急激な衝撃力が発生してしまう。持ち上げられる対象物の材質等によってはこうした衝撃力は緩和されることが強く望まれる。早く速やかに引き上げることが可能な搬送リフトであればあるほどこうした衝撃力が大きくなるため、これまでの装置においては引き上げスピードの調整によってこの衝撃力を小さくする必要があった。



(a) フコク株式会社 QS-650 型



(b) UniMove

図 4.1 真空吸着式パッド

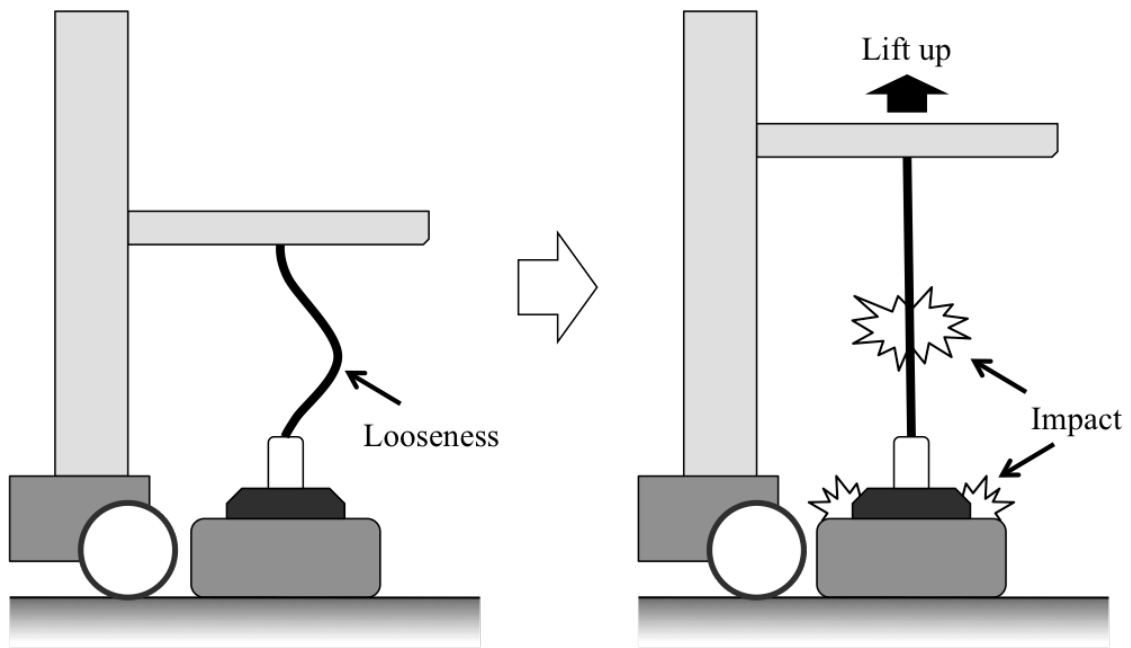


図 4.2 搬送リフトを用いた吊り上げ

本研究ではこうした問題に対してパワーアシスト装置の中にコンプライアンス制御を実装し、引き上げ時の衝撃力を緩和する試みを行った。パワーアシスト装置の中にコンプライアンス制御を実装することによって吊り上げられる対象物が受ける衝撃力は小さくなると同時に柔らかい材質の物体はゆりかごのようにソフトに動くことになり、パワーアシスト装置に保全性を与えることが期待できる。本研究では非常に柔らかいコンプライアンス制御を実現するために、計算機中に構成したコンプライアンスモデルからの出力をモータへの位置指令値とするサーボ系を開発した。

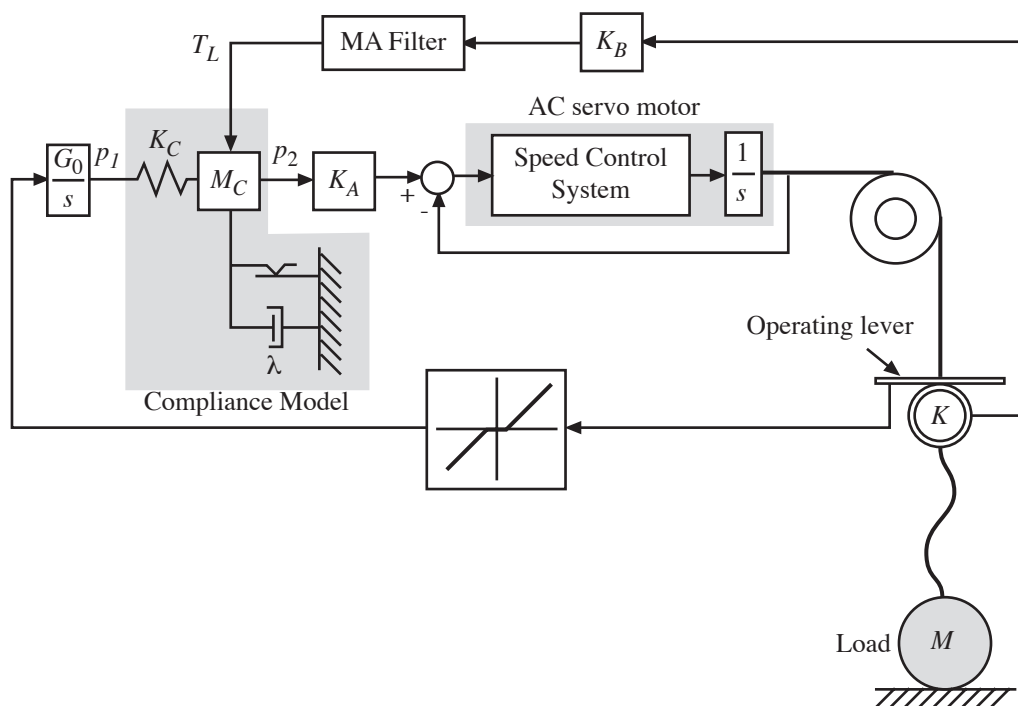


図 4.3 コンプライアンス制御を実装したパワーアシスト装置のブロック線図

4.2 コンプライアンス制御を実装したパワーアシスト装置

4.2.1 制御系の構成方法

コンプライアンス制御を実装した本研究で提案するパワーアシスト装置のブロック線図を図 4.3 に示す. パワーアシスト用の操作レバーに取り付けられた歪ゲージにより介助者の意図である微小な操作力を検出し, 制御装置へ入力する. 制御装置の中では不感帯を通してこの操作力を積分する. 計算機中にコンプライアンスモデルをばね・質量系で構成し, 操作力の積分値をコンプライアンスモデルへの入力とする. 操作レバーにより検出された操作力に対して不感帯を通すことによりゼロ近傍でのノイズによるドリフトを取り除いている. また不感帯を通して操作力を積分することにより操作レバーを操作している間だけ持ち上げ動作が機能し, レバーが操作されていない間は吊り上げた状態を維持させている. コンプライアンスモデルにおける質量 (M_C) の運動を AC サーボモータへの位置制御入力とすることによってモータ軸に取り付けられたロープが巻

き取られ、それに伴い負荷を持ち上げることができる。これだけの制御ではモータの駆動力を応用したクレーンによる持ち上げと大差なく、コンプライアンス制御の効果はなく、ロープのたるみがなくなった瞬間の衝撃を緩和できない。本研究ではコンプライアンス制御の効果をパワーアシストに活かすために吊り上げ時に受けるロープ張力をセンサあるいはモータの電流値などで検出し、この値をコンプライアンスモデル部の質量 (M_C) に外乱力(T_L)としてフィードバックすることによりコンプライアンス制御の効果を引き出すことにした。負荷荷重(M)によりロープ張力(T_L)が発生すればコンプライアンスモデル内の質量(M_C)は動き、結果としてロープにかかる張力を大きくしない方向にモータを動かすことができる。ロープ張力である外乱力(T_L)がコンプライアンスモデル中のばね (K_C) による復元力と釣り合う時点まで質量 (M_C) の移動は止まり、その後には負荷(M)が持ち上げられ始めることになる。こうした運動をモータに発生させることによって吊り上げロープのたるみがなくなってロープが引っ張られた瞬間に発生する負荷(M)への急激な衝撃力を緩和することができる。計算機中に仮想的に設定したばね・質量系で構成するコンプライアンスモデルのばね定数を小さくすればそれだけコンプライアンスの効果は大きく、従って持ち上げられる人が受ける衝撃力は緩和され、また重力方向にソフトに動くことにもなる。本研究ではコンプライアンスモデルの固有周期を約 1Hz に、そして系の減衰比を 1.0 に設定した。この値はほぼ乗用車のサスペンションに設定されている値に近いものである。他方、図 4.3 中のコンプライアンスモデル中には固体摩擦も含ませている。この固体摩擦を付加した意味とその効果は後述する。

本研究のパワーアシストにおいては持ち上げ動作とコンプライアンス制御とは別々に機能する。操作レバーを操作している間だけ持ち上げあるいは下降の動作が機能し、レバーを操作していない間は吊り上がった状態を保つことになる。他方コンプライアンス制御の効果によりロープ張力がコンプライアンスモデル部のばねの伸びを与えている。本研究では負荷(M)を吊り上げたとき、その自重によりばねの自然長が約 25cm 伸びるような張力フィードバック係数 (K_B) を与えている。

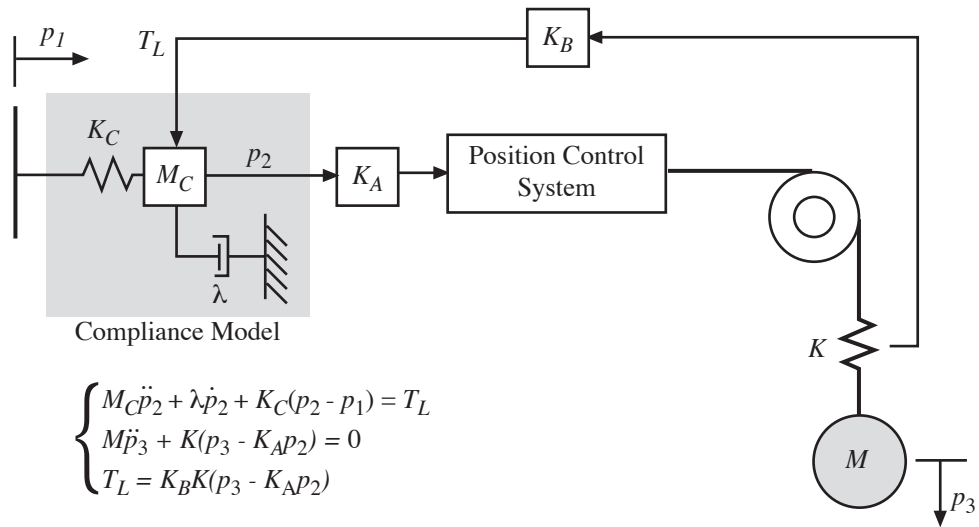


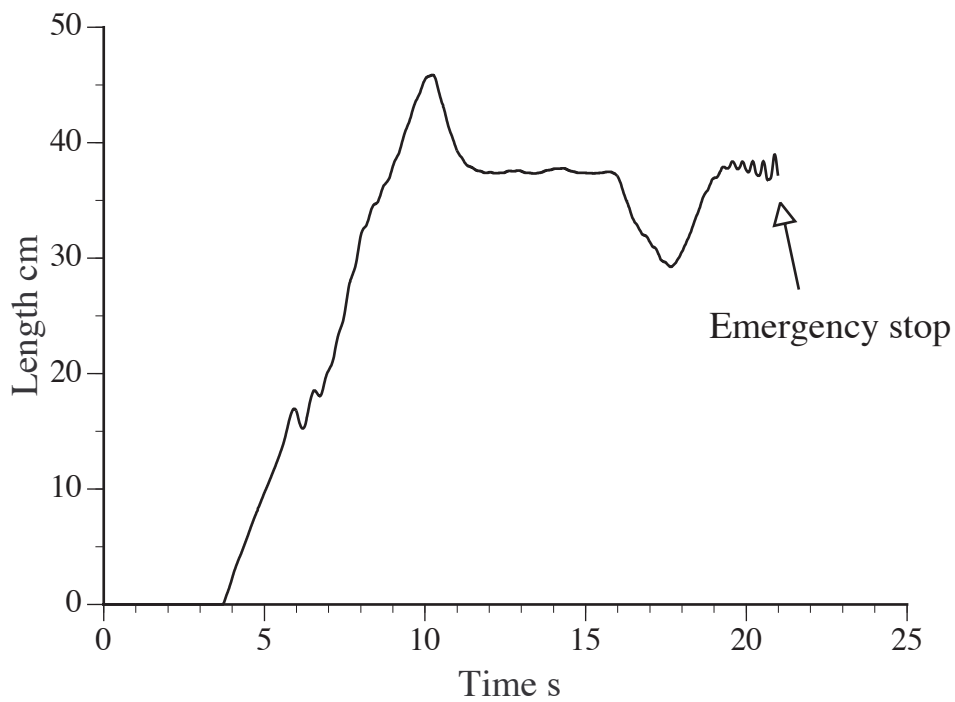
図 4.4 安定性の評価モデル

4.2.2 本制御系の安定性

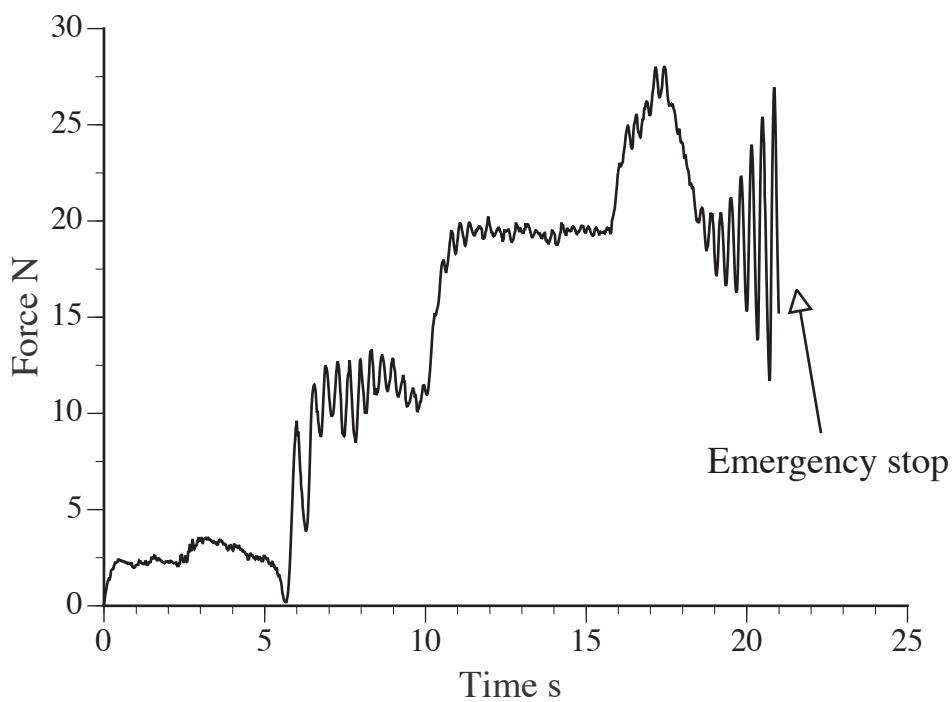
位置制御系を構成する AC サーボモータ制御系のゲインが十分大きい場合には本研究のパワーアシスト制御系は近似的に図 4.4 のように表される. コンプライアンスモデルへの入力を p_1 とし, 負荷の位置 p_3 を出力とすると本研究で提案するパワーアシスト系の伝達関数は式(4.1)のように与えられる.

$$p_3 = \frac{KK_C K_A}{MM_C \left[s^4 + \frac{\lambda}{M_C} s^3 + \left(\frac{K_C}{M_C} + \frac{K}{M} + \frac{K_A K_B K}{M_C} \right) s^2 + \frac{\lambda}{M_C} \cdot \frac{K}{M} s + \frac{K_C}{M_C} \cdot \frac{K}{M} \right]} p_1 \quad (4.1)$$

コンプライアンスモデルにおけるパラメータ (固有周期 1Hz, 減衰比 1) と吊り上げロープの剛性 (M と K で構成される固有周期約 5Hz) を考慮した場合, 任意の張力フィードバック係数 (K_B) において式(4.2)で表される本研究の制御系はおおむね安定であることを確認できるが, 実際の系にはモデル化されない伝達要素が内在することにより場所によりわずかに不安定な制御系を構成してしまっている. 図 4.5 にロープ張力をコンプライアンスモデルに外乱力として直接フィードバックしたときの実応答波形の一例を示す.



(a) 持ち上げ量



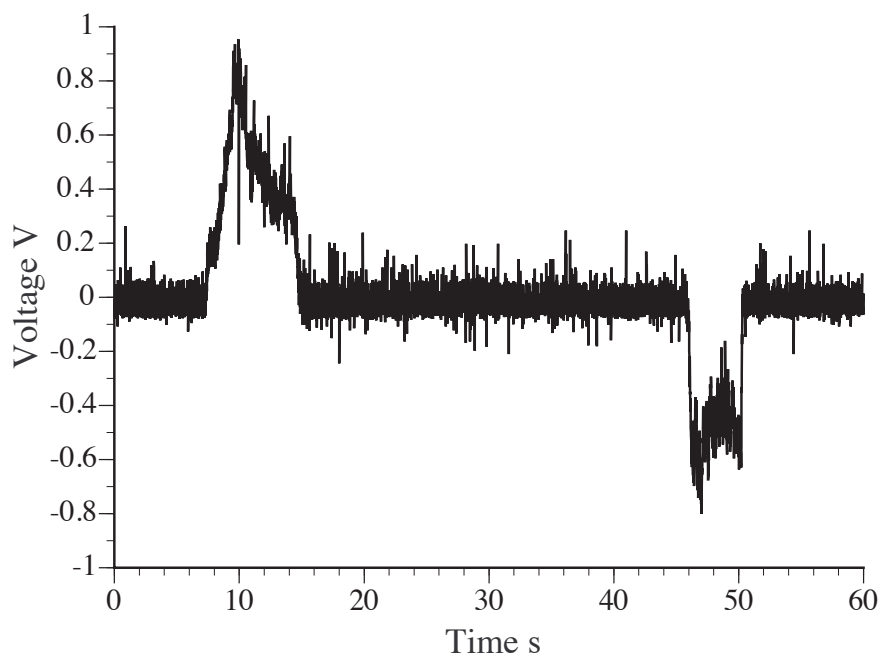
(b) ロープ張力

図 4.5 コンプライアンス制御を用いたリフトの不安定な状態

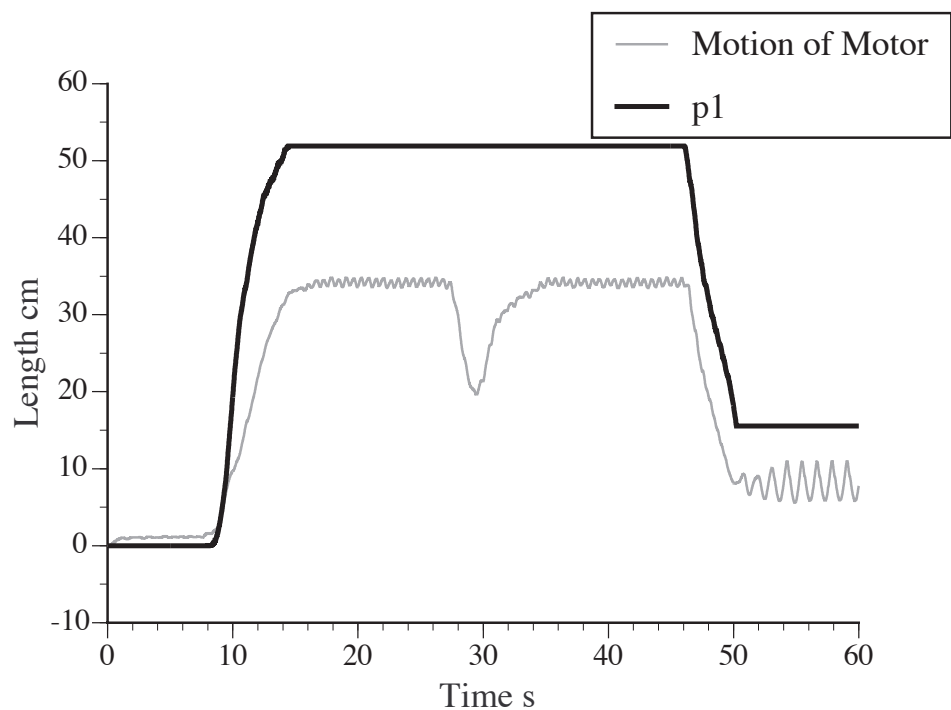
図 4.5(a)はモータが吊り上げた負荷の位置であり，図 4.5(b)はそのときのロープ張力の様子である．全体的にはほぼ安定であるが，吊り上げて約 20 秒後にロープ張力が発散的な振動状態を示し，吊り上げた負荷も不安定な上下運動を始めてしまっている様子がわかる．他方，ロープ張力をフィードバックしない場合にはどんな場所でも安定であり，不安定性の要因はロープ張力のフィードバックにあることを確認している．これよりロープ張力に 1 秒間の移動平均を施すことにより系の安定性を高めることにした．コンプライアンスモデルの固有周期は 1Hz であり，1 秒間の移動平均の遅れを外乱力として加えても系全体の応答に与える遅れの影響はそれほど大きくはなく，不安定要因である外乱力を遅らせて系の安定性を高めることの方が重要であると判断した．

4.3 ロープ張力をフィードバックしたときのパワーアシスト性能の評価

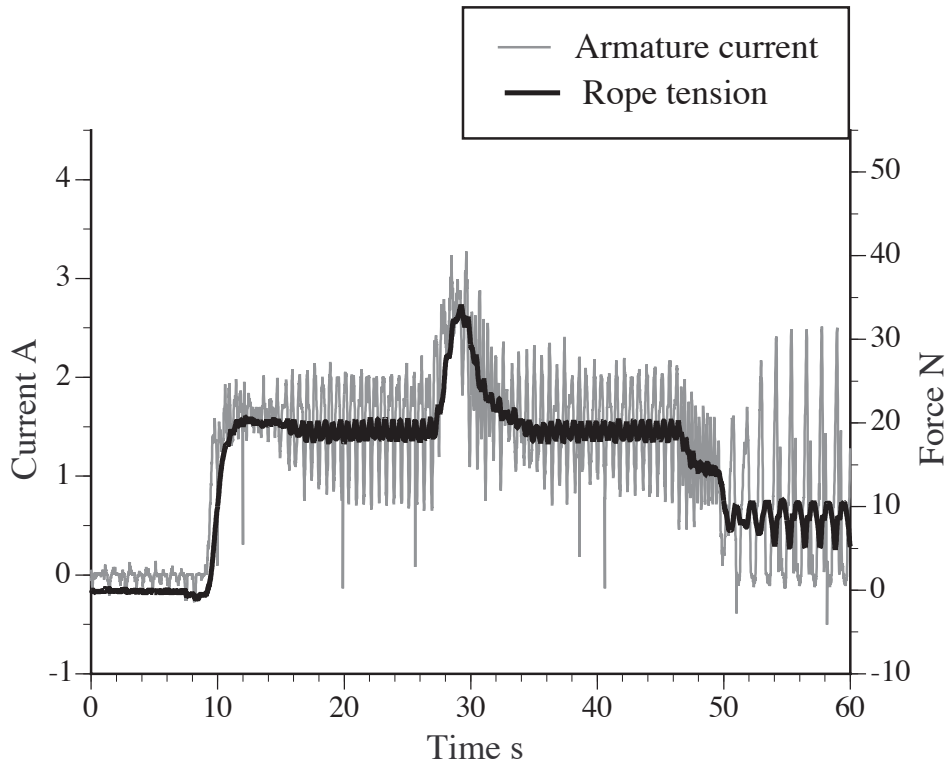
ロープ張力に 1 秒間の移動平均を施し，その出力をコンプライアンスモデルの質量 (M_C) に外乱力(T^L)としてフィードバックする図 4.3 に示す系を用いてパワーアシストを機能させた負荷(M)の持ち上げ制御実験を行った．図 4.6(a)は人が操作レバーを操作しているその様子を歪ゲージにより検出したデータである．制御をスタートさせて約 6 秒後に負荷の持ち上げ動作を約 10 秒間行い，その後負荷を吊り上げた状態を約 30 秒間維持している．次の約 5 秒間で負荷を下降させ元の床の位置に着地させている．負荷の持ち上げ動作時間の方が下降に要する時間より長いのは最初にロープがたるんでおり，その分のロープをモータが巻き取らなければならないためである．図 4.6(b)は操作レバーで検出された操作力の積分値であるコンプライアンスモデルへの入力値 (p_1) と実際にモータが巻き取ったロープ長の様子を示す．持ち上げ動作をスタートさせてから負荷を吊り上げるまでにモータが巻き取ったロープ長と負荷を下降させて元の床上に着地させたときのロープ長には差が見られる．この差がロープの初期たるみ量である．制御スタート時点ではコンプライアンスモデルへの入力値 (p_1) とモータが巻き取ったロープ長には大きな差が見られないが，約 10 秒後からその差が次第に大きくなる．これはロープの初期たるみ量がなくなった後にコンプライアンスモデルの質量 (M_C) に働く外乱力としてのロープ張力の増大に伴ってコンプライアンスモデル中のばね (K_C) が次第に引き伸ばされていることを示している．この間のロープを巻き取るモータの運動は p_1 である操作力の積分値の運動に比べ比較的ゆっくりとした運動になっている．



(a) 歪ゲージにより検出された力



(b) コンプライアンスモデルへの入力と持ち上げ量

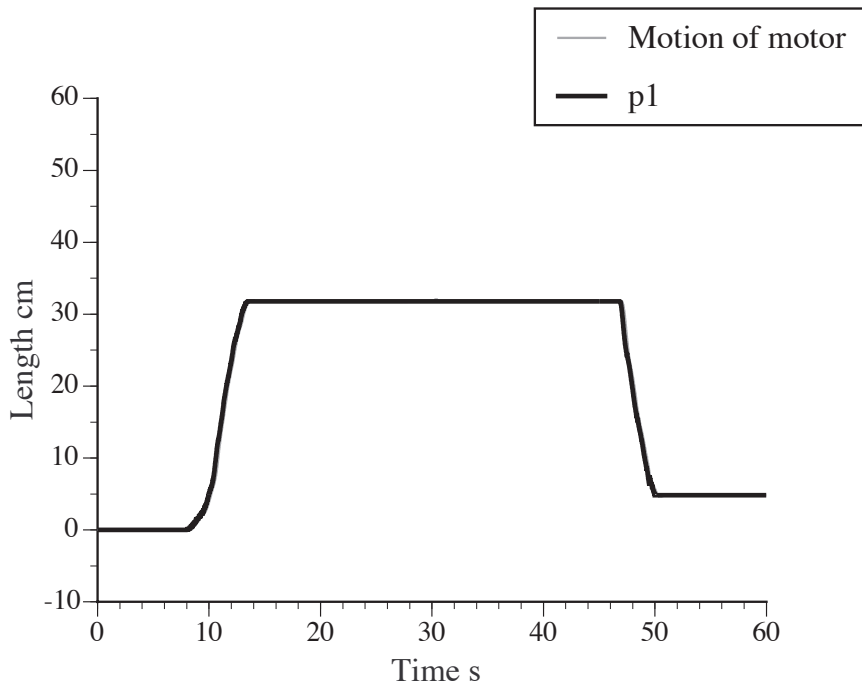


(c) モータの電機子電流値とロープ張力

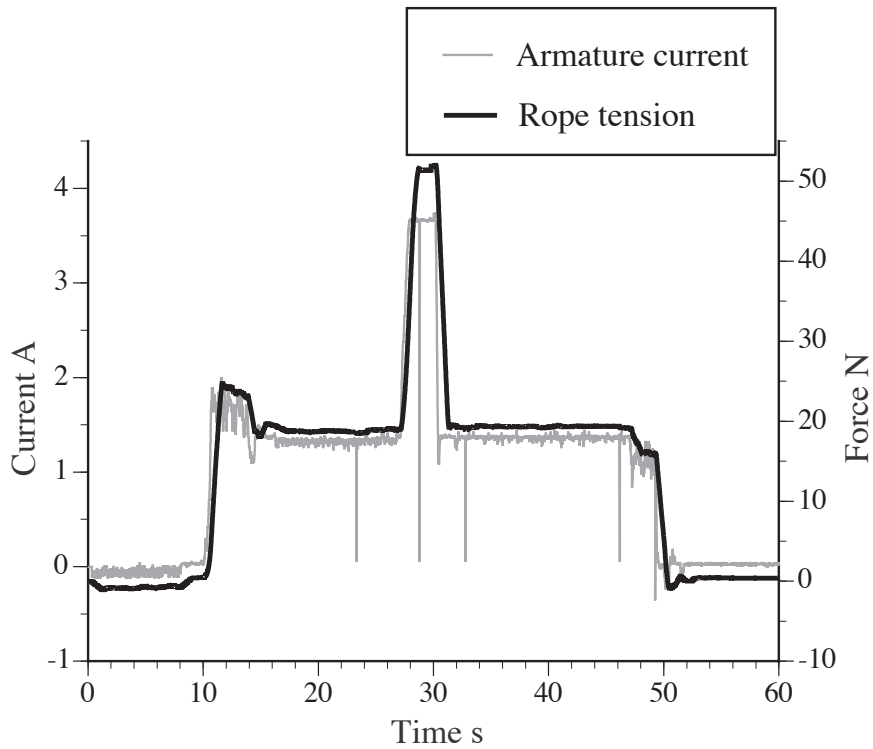
図 4.6 ロープ張力をフィードバックしたパワーアシスト

こうした運動が制御系中のコンプライアンスの効果であり、ロープが急に引っ張られることによって生ずる衝撃力を緩和してくれることになる。図 5 に示す負荷の持ち上げ実験においては、実験のスタート後約 30 秒後に負荷 (M) を故意に 5 秒間ほど重力方向に引っ張っている。そのときのロープ長の変化の様子も図 4.6(b)には含まれている。操作力の積分値 (p_1) の方には変化はないが、引っ張られたことで重力方向に負荷が動いていることがわかる。負荷を引く力を除けば再び元の位置まで戻っている。図 4.6(b)中のデータに含まれているように約 45 秒後に負荷を下降させ床上に着地させている。その動作において約 50 秒後以降に望ましくない振動現象の発生が見られている。こうした望ましくない振動の原因とその対策については次節で述べる。図 4.6(c)にはロープ張力とモータの電機子電流の様子を示す。ロープ張力とモータの電機子電流はよく対応している。ロープの初期たるみがなくなったときのロープ張力の増大の様子、負荷を重力方向に引っ張ったときのロープ張力の様子、負荷の下降及び床上に着地

したときの振動の様子がそのまま現れている。比較のためにロープ張力をフィードバックしない場合について図 4.6 と同様な負荷の持ち上げ制御実験を行った。その結果を図 4.7 に示す。図 4.7(a)は操作力の積分値 (p_I) とモータによるロープの巻き取り長さを示す。操作力の積分値とロープ長の変化にその差はほとんどない。負荷を重力方向に引っ張ってもロープ張はまったく変化しない。負荷を吊り上げるまでにモータが巻き取ったロープ長と負荷を下降させて元の床上に着地させたときのロープ長の差であるロープの初期たるみ量はこのデータからも読み取ることができる。図 4.7(b)はロープ張力とモータの電機子電流の様子を示す。ロープ張力が急激に増加していることと、負荷の慣性力によって自重以上のロープ張力が発生している様子が伺える。図 4.7(b)には吊り上げてある負荷を重力方向に故意に引っ張ったときのロープ張力の増大の様子が含まれている。



(a) コンプライアンスモデルへの入力と持ち上げ量

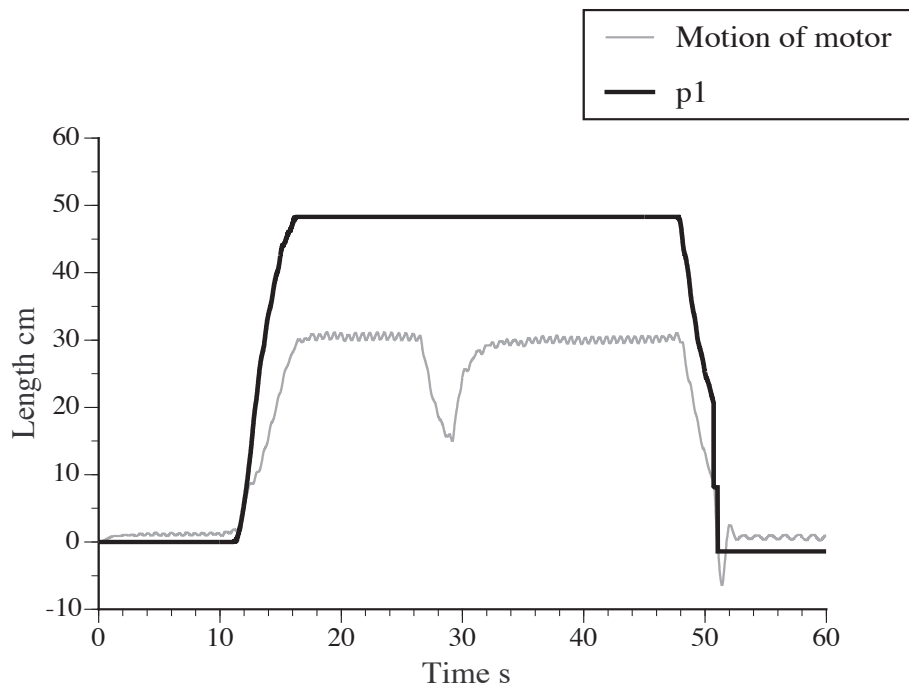


(b) モーターの電機子電流値とロープ張力

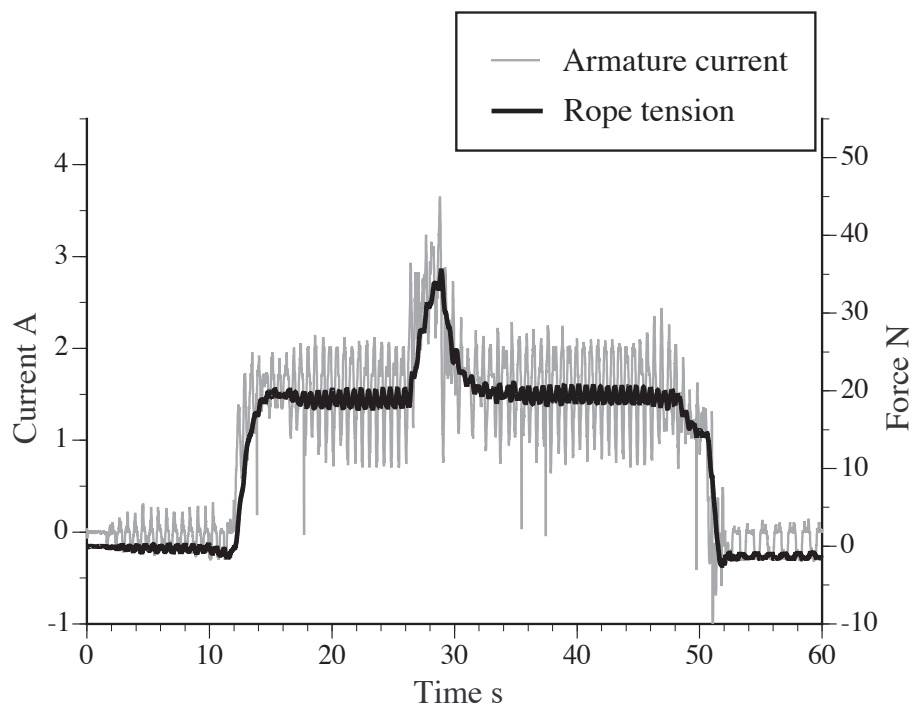
図 4.7 ロープ張力をフィードバックしないパワーアシスト

4.4 吊り上げた負荷の安定性の向上

ロープ張力をコンプライアンス部にフィードバックする制御系において、負荷を下降させ床上に着地させたときに発生してしまう異常振動についてその原因と対策を考察する。ロープ張力の測定は負荷と吊り上げロープの間で行っている。負荷が床上よりわずかでも浮いていればロープ張力は負荷の全荷重に等しい。負荷(M)が床上に着地すればロープ張力はその瞬間にほぼゼロになってしまう。すなわち負荷の着地においてロープ張力は負荷の全荷重かほぼゼロかのどちらかを与えるものとみなせる。ロープ張力をモータの電流値で推定することとしても結果は同じである。一方、負荷が床上より浮いている間はコンプライアンス部のばねはロープ張力により荷重分だけ伸びており、このとき負荷の着地が起こりロープ張力がゼロになればコンプライアンス部のばねは自然長まで縮もうとしてしまい、そのとき負荷は床上より浮き上がることになる。この現象が負荷の着地時に繰り返して起こり[40, 41]、これが異常振動になっていることが実験を通して明らかになった。他方、負荷の持ち上げ時にはばねは自然長であるためこの異常振動は起こらないことがわかる。従って本研究ではこうした異常振動を防止するために負荷が着地したその瞬間、すなわちロープ張力がゼロになった瞬間にコンプライアンス部のばねを自然長に戻すことにより着地時の望まない異常振動を防止することとした。負荷が着地し、ロープ張力がほぼゼロになった瞬間にコンプライアンス部のばね (K_C) を自然長に戻した場合の実験結果を図 4.8 に示す。図 4.8 に示されるように負荷の着地時の異常な振動は抑えられていることがわかる。そのときのロープ張力も振動的ではなくなっており、負荷は安定して床上に着地できている。

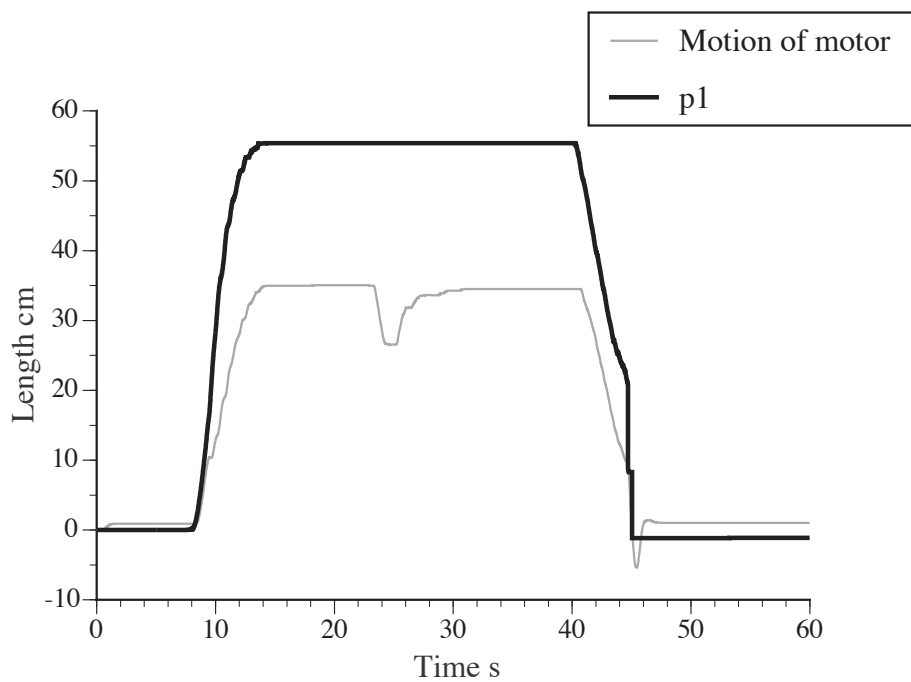


(a) コンプライアンスモデルへの入力と持ち上げ量

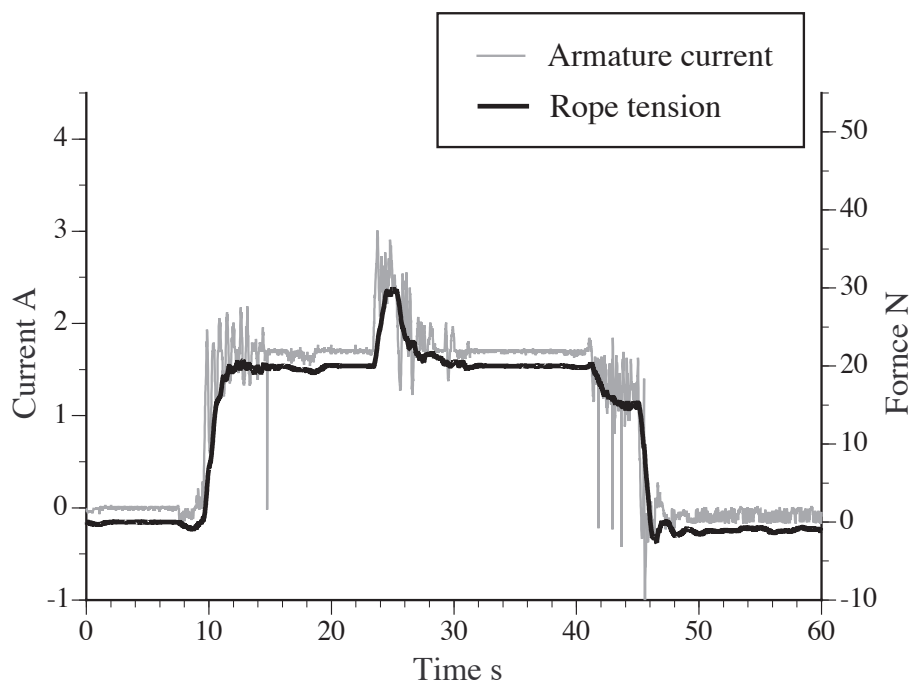


(b) モータの電機子電流値とロープ張力

図 4.8 負荷が着地した瞬間にはばねを自然長に戻した場合



(a) コンプライアンスモデルへの入力と持ち上げ量



(b) モータの電機子電流値とロープ張力

図 4.9 コンプライアンスモデルに個体摩擦を付加したパワーアシスト

他方，図 4.6 と図 4.8 に示す実験結果に現れているように，吊り上げられた負荷にはロープ張力をフィードバックすることによる微振動が観察される．これはロープ張力の微小なノイズまでフィードバックされてしまうことによるものである．こうした負荷の微振動も吊り上げられる人には不安感を与えるものであり，できるだけ小さくすることが望ましい．本研究ではばね・ダンパで構成されるコンプライアンスモデルに非線形要素としての固体摩擦をあえて追加する試みを行った．固体摩擦は小さい力には動きにくい性質があるためより高い安定性が期待できる．固体摩擦のような非線形要素をコンプライアンスモデルの中に含ませることは本来考えにくいだが，時にはそうした効果も期待できる．図 4.9 は，図 4.8 で行った制御系のコンプライアンス部に固体摩擦を付加した場合の実験結果である．予想通りに吊り上げ物体の微振動を取り除くことができている．

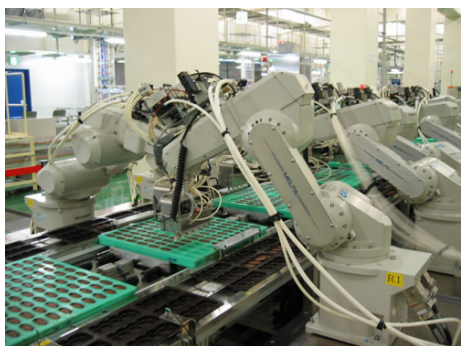
4.5 まとめ

本研究ではパワーアシスト装置にコンプライアンス制御を実装する提案を行った。コンプライアンス制御を実現する方法として、モータ軸の変位と速度のフィードバックゲインを調整することにより実現する方法も考えられるが、実際には減速機等に含まれる固体/粘性摩擦等の外乱力の影響を強く受け、1Hz以下の非常に柔らかいコンプライアンスを実現することは現実的には困難である。このため本研究では、サーボゲインを大きくした位置制御系を用いて外乱に対して強いモータ軸の回転を得るその一方でコンプライアンスモデルを計算機中に構成し、ロープ張力以外の不必要な外乱のないコンプライアンスモデルからの出力を AC サーボモータへの位置指令値として与えることによりパワーアシストのためのコンプライアンス制御を実現した。この結果非常に柔らかいコンプライアンス制御が実現できることを示した。そして、こうしたコンプライアンス制御の効果として、ロープの初期たるみがなくなったときに生じる衝撃力を緩和できることを示すとともに、それがパワーアシスト装置に求められる付加価値をより高められるものであることを明らかにした。

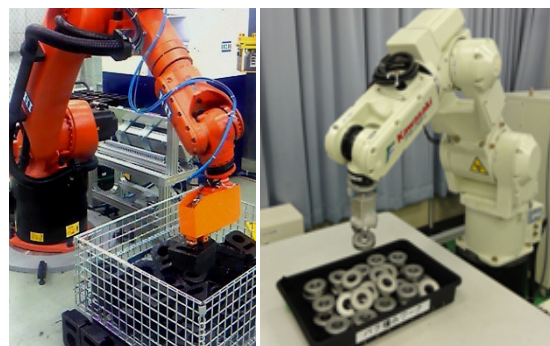
第5章 ロボットハンドリング技術の高機能化

5.1 はじめに

産業ロボットを用いたライン作業や、将来的な家庭用ロボットに想定される物を扱う動作においては、ロボットアーム(マニピュレータ)により物体のハンドリングを自動的に行わせることが不可欠となる。図 5.1.1 に産業用ロボットの利用例を示す。ハンドリングの自動化には対象物の位置姿勢の高度な認識処理が必要となるが、工場の生産ラインでは大規模な配列装置を利用するケースが多く、作為的な環境整備を介すことで認識を簡素化、またはその認識を省いて実現されるのが現状である。(図 5.1.1(a)) しかし、配列機械には多大なコストが伴うため、適用範囲が大量生産型の製造過程に限定され、プロセスが刻々と変化する変種変量型の生産には適用できない問題がある。そこで、視覚センサによる 3次元距離計測と各種形状マッチング手法を応用することにより、対象物の形状表現と位置姿勢の認識を知的に行い、バラ積みピッキング作業を人間の作業者に代わって柔軟に実行できる自動化技術の開発が求められている。(図 5.1.1(b))



(a) 大量生産型の画一化された作業



(b) バラ積みピッキング

図 5.1.1 産業用ロボットの利用例

3次元計測には、ステレオ画像処理[42 - 47](図 5.1.2)やパターン光投影法[48](図 5.1.3)、TOF(Time Of Flight)方式[49]、DFD(Depth From Defocus)方式[50]を使ったものなどがある。ステレオビジョンはカメラによって広範囲の距離画像を短時間で取得できるが、照明の影響を受け易く、光量が不十分な場所、画像上の濃淡が不明瞭な対象の測距が難しい。また、2台のカメラ画像間の対応付けの難し

さもあり，計測精度が高くはない．後者の投影法では，パターン光の特徴的な模様をカメラ認識することで，安定した測距が可能な一方，投影光を用いる観点から明るい空間は適さず，環境を選ぶ問題が往々にして残っている．3次元計測は，ステレオ画像処理のような光や音波を用いない受動的計測手法と，パターン光投影法のように計測の補助となる光を照射する能動的計測手法とに大別される．本研究では，能動的形状計測手法に分類される測域センサ(LRF : Laser Range Finder)[51, 52]を利用する．測域センサは赤外線レーザ光を用いた光波測距法により，対象物までの距離を直接計測でき，スキャン面上でレーザを走査することにより空間の距離点群を取得できる[53 - 55]．また，計測環境の影響を比較的受けにくく，安定した検出を行えるという面で信頼性に富む．



図 5.1.2 ステレオ画像処理（参考文献[42]）

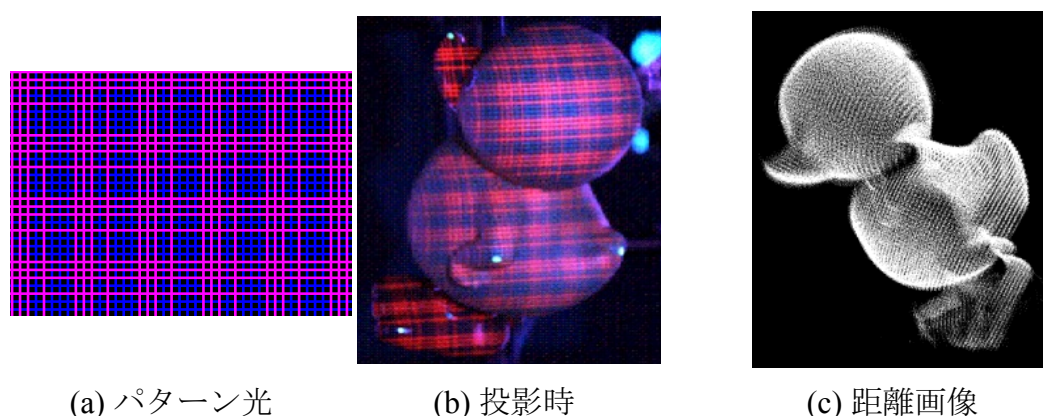
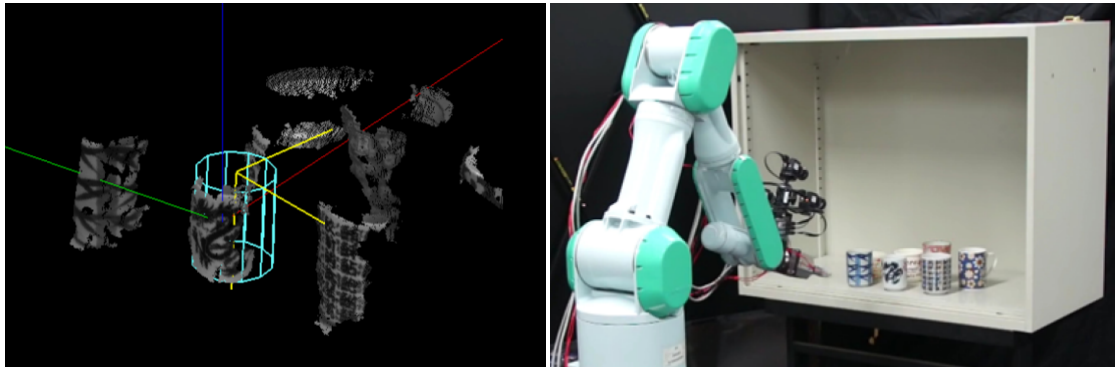


図 5.1.3 パターン光投影法（参考文献[48]）



(a) 物体認識

(b) ハンドリング

図 5.1.4 物体認識とハンドリング（参考文献[44]）

物体の認識に関しては、同形状のモデルを用いた形状マッチング手法が一般的である[56 - 59]。(図 5.1.4) モデルは物体の測定データから生成する[68, 78, 79, 84, 85]か、もしくは既知として予め用意する[56, 75, 76]ものだが、何れの場合においても原型的な形状要素に関する事前知識は不可欠である。ただし、物体認識の研究においては図 5.1.4 の様に物体同士が互いに離れていることを前提としている場合が多い。そのため、環境データと物体情報が 1 対 1 対応しやすく、測定器による計測誤差以外のノイズ情報が入り難い。しかしながら、図 5.1.1 に示す様なバラ積み環境や、家庭内での作業を考えた場合、物体同士が接していたり、積み重なっていたりすることが多く、物体認識において誤認識の確率が格段に増えてしまうことになる。このため、本研究では物体が積み重なった状態に対して、誤認識の確率を減らす手法の提案を行う。

また、ハンドリング計画においても物体の認識と同様に、測定データから生成する手法[68, 78, 79, 84, 85]や既知の形状情報に基づいた把持位置の決定手法の提案[56, 75, 76]が為されてきているが、本研究はロボットハンドとして最も一般的に用いられている 2 指グリップハンドを対象として、よりシンプルな把持位置の探索手法の提案も行う。干渉問題を考慮に入れた探索を行うことで、複数の物体が極めて近い位置にある場合や、積み重ねられている場合においても、確実に把持可能な位置を探索する。これらをシステムとして統合することにより、バラ積みピッキング作業の自動化を多様な形状の品目に対して実現可能なシステムを目指す。

5.2 システム概要

システム全体の流れは以下の3つの段階で構成されている。

- 3次元環境の計測
- 物体の3次元位置・姿勢の認識
- 物体のハンドリング計画

これらの一連の処理を経て、対象物のピッキングを行うことができる。一度の環境計測で全ての物体を認識することは必ずしもできないため、一連の処理を繰り返すことで、ピッキング作業を継続させることができる。

5.2.1 3次元環境の計測

測域センサによる3次元計測を行い、対象物の存在する3次元環境の距離点群を取得する。LRFは使用するロボットアームに搭載されており、アームによりスキャン平面を操りながら計測を繰り返す。対象物は工場のラインで想定される供給部品や、人の手でしっかりと把持できる程度の中型の剛体物とし、平坦なテーブル上の指定範囲内に無造作に置かれた状況を想定する。



図 5.2.1 3次元環境の計測

5.2.2 物体の3次元位置・姿勢の認識

得られた環境の計測結果から物体の位置姿勢を認識するため、物体の寸法を正確に模したモデルを用いたマッチングを行い、形状が一致する位置姿勢の探索を行う。計測データが点群で構成されているので、モデルについても点群で構成したものを準備し、点群マッチングを基本原理として行う。

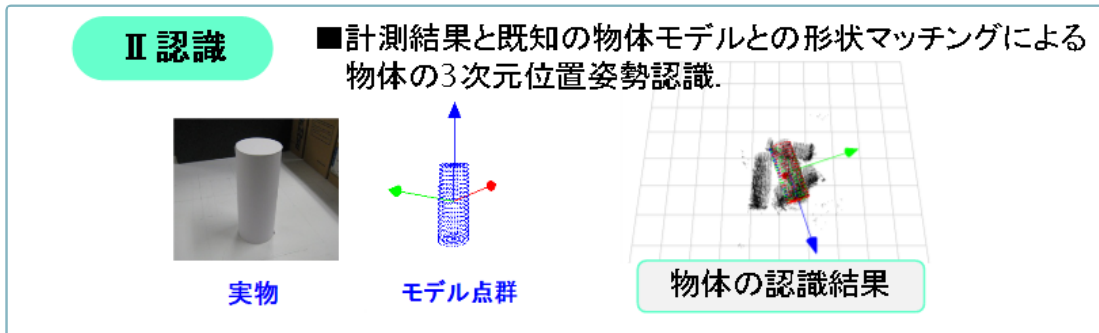


図 5.2.2 物体の 3 次元位置・姿勢の認識

5.2.3 物体のハンドリング計画

物体の認識位置姿勢に基づき、ロボットアームのハンドリング計画を導出する。物体の事前知識を利用し、物体の形状に適した手先の把持位置姿勢を探索する。探索を行うことでロボットアームの動作範囲、環境との干渉などを考慮した実現可能な手先位置姿勢を導出できる。

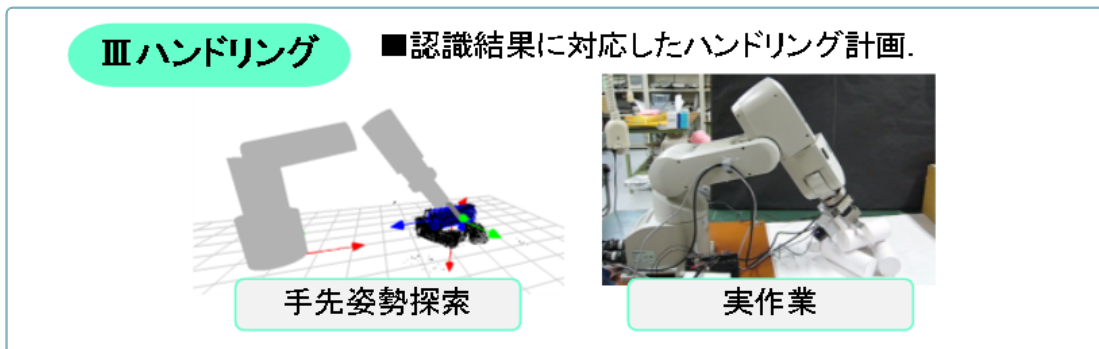


図 5.2.3 物体のハンドリング計画

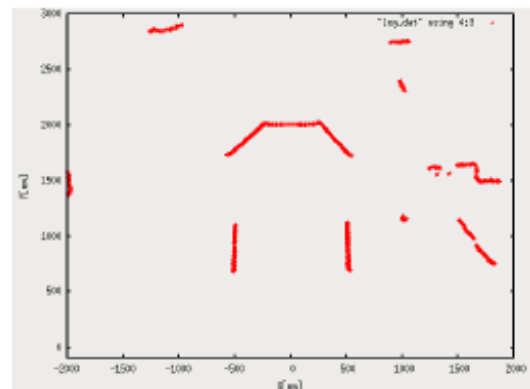
5.3 センサ(LRF : Laser Range Finder)による 3 次元環境計測

5.3.1 LRF の 3 次元測距原理

LRF は、赤外線レーザを周囲に照射し、検出物までの距離とセンサの原点座標系を基準とした 2 次元測距領域上におけるレーザの照射角度の値を出力する光走査型距離計である。走査平面上で輪切りにした空間の形状データを取得でき、異なる視点からのデータを積層することで、複数の 2 次元データを統合した 3 次元形状点群も取得できる。



(a) 計測環境



(b) 計測結果

図 5.3.1 計測の様子（参考文献[51]）

本研究で使用する LRF は位相差方式を測距原理とし、投光波と受光波の位相差から対象物までの距離を求める。投光波と受光波の位相差を ϕ [rad]、波長を λ [mm] とすると、距離 L [mm] は以下の式(5.3.1)で算出される。 n は周期の数を示す。

$$2L = \left(\frac{\phi}{2\pi} + n \right) \lambda \quad (5.3.1)$$

尚、実際に周期の数 n の値はわからないので、測定距離が収まるような波長の十分長いものと、短いものの 2 種類の周波数を併用することで長距離を精度良く算出している。

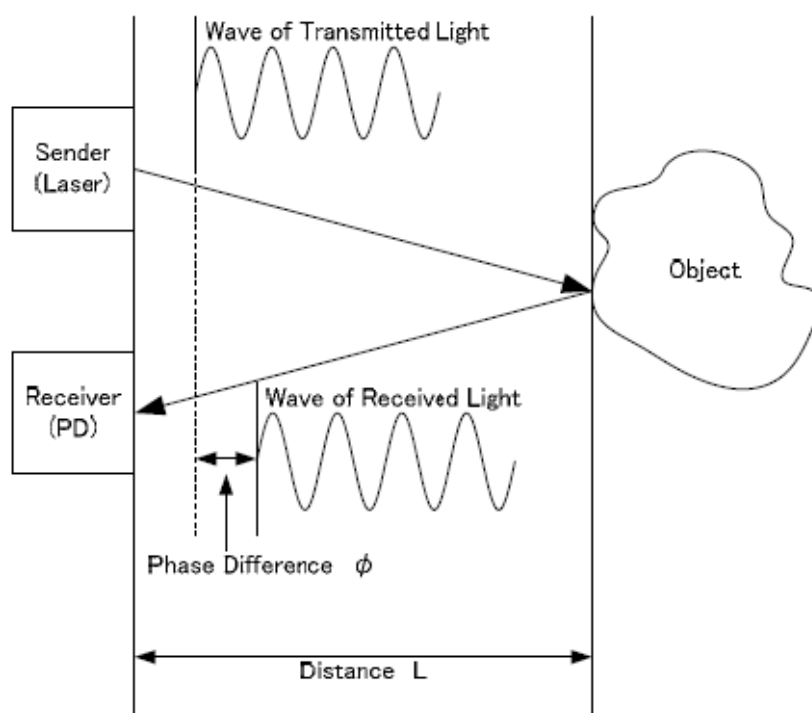


図 5.3.2 位相差方式の概略図 (参考文献[51])

5.3.2 ロボットアームの自由度を利用した距離点群の取得

本研究では，LRF をロボットアームの先端に装着し，その視点を積極的に操作することで十分な距離点群を獲得したいと考える．図 5.3.3 にロボットアームを利用した距離点群の計測方法の概略図を示す．図 5.3.3 においてロボットアームの原点座標系を ΣA ，アームの先端座標系を ΣB ，LRF 座標系を ΣC として定義する．ただし，計測時には座標系 ΣA 及び ΣC を用いて座標変換の議論を行う．センサが取得した全ての計測点 p に対して同次変換を施すことで， ΣC から見た点 p までの位置ベクトル ${}^C\mathbf{p}$ を ΣA から見た点 p までの位置ベクトル ${}^A\mathbf{p}$ として獲得する．

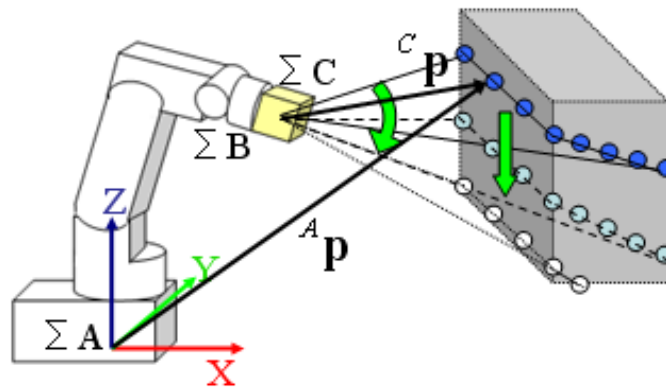


図 5.3.3 距離点群計測の概略図

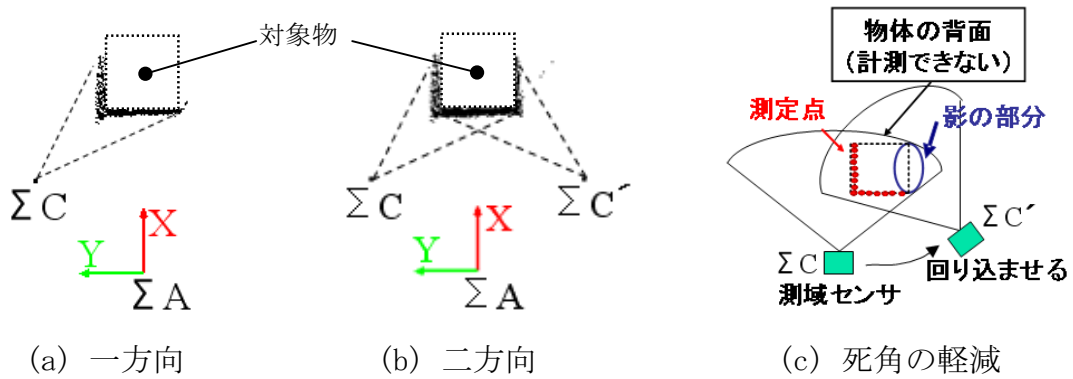


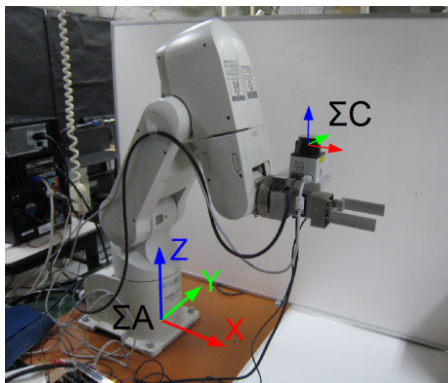
図 5.3.4 センサ位置・姿勢を変更することによる有用性

図 5.3.4 に示すようにロボットアームを用いたセンシングの有用性としては、LRF の位置・姿勢を柔軟に選択できる操作性にある。LRF はカメラに比べ計測視野が狭いため、環境上の形状的な死角や隠れ[60]などの要因で、十分な環境データが得られない場合が考えられる。ロボットアームを使用して視野領域を移動させることで、死角の削減が期待できる。

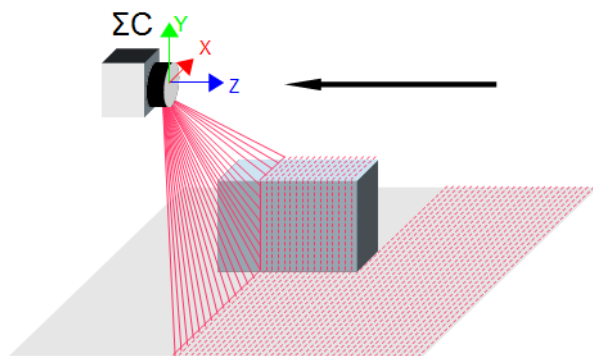
LRF 座標系 ΣC で取得した計測点群をロボットアームの原点座標系 ΣA から見た計測点群に変換するための同時変換行列は式(5.3.2)に示す。

$$\begin{aligned}
{}^A\mathbf{P} &= {}^A\mathbf{T}_B {}^B\mathbf{T}_C {}^C\mathbf{P} \\
&= \begin{pmatrix} {}^A\mathbf{R}_B & {}^A\mathbf{q}_B \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^B\mathbf{R}_C & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^C\mathbf{P} \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} {}^C p_x (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) + {}^C p_y (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) + {}^A q_{Bx} \\ {}^C p_x (\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) + {}^C p_y (\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) + {}^A q_{By} \\ {}^C p_x \cos \theta \cos \psi + {}^C p_y \cos \theta \sin \psi + {}^A q_{Bz} \\ 1 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{5.3.2}$$

ここで、LRF 座標系 ΣC から見た計測点 p の位置ベクトルを ${}^C\mathbf{P} = ({}^C p_x, {}^C p_y, 0)$ とする。 ${}^A\mathbf{T}_B$ は ΣA から ΣB への同時変換行列、 ${}^B\mathbf{T}_C$ は ΣB から ΣC への同時変換行列であり、 ${}^A\mathbf{R}_B$ は ΣA から ΣB への回転行列、 ${}^B\mathbf{R}_C$ は ΣB から ΣC への回転行列である。 ${}^A\mathbf{q}_B = ({}^A q_{Bx}, {}^A q_{By}, {}^A q_{Bz})$ はロボットアームの原点座標系 ΣA からみたアームの先端座標系 ΣB の原点までの位置ベクトルである。 $(\phi, \theta, \psi) = ({}^A\phi_B, {}^A\theta_B, {}^A\psi_B)$ はロボットアームの原点座標系 ΣA からみたアームの先端座標系 ΣB の姿勢ベクトルであり、それぞれロール・ピッチ・ヨー角を表す。



(a) ロボットアームと LRF

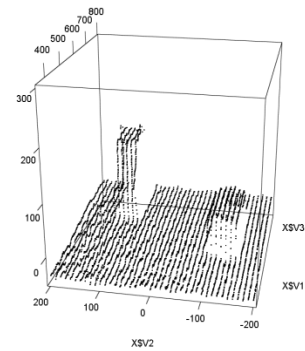


(b) スキャンの経路

図 5.3.5 座標系の設定とセンサの動き



(a) 測定対象物



(b) 測定結果

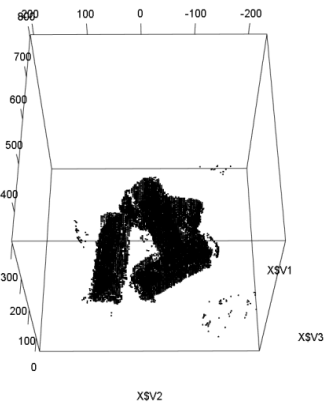
図 5.3.6 計測の一例

5.3.3 多方面から測定した点群の統合

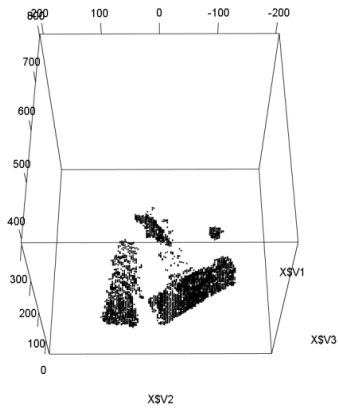
図 5.3.5 に実際の実験環境とスキャンするときの経路を，図 5.3.6 に実際に測定対象物が 3 次元の点群情報として得られた結果の例を示す．図 5.3.6(b)よりロボットアームを用いて LRF のスキャン面を移動させることにより，本来 2 次元の位置情報しか得られない LRF センサの測定点が 3 次元の位置情報として得られていることがわかる．ただし，3.3.2 で述べた通り，一方面のみからの計測では側面などの形状の欠損が生じ易く，対象物の形状を十分に獲得できない．そこで，本研究の 3 次元環境計測においては，アーム先端に搭載した LRF の利点を活かし，複数の方面から取得した形状データを足し合わせることで，欠損の軽減を図ることを原則とする．この計測方法の一例を図 5.3.7 に示す．図 5.3.7(b) はそれぞれ四方面から測定対象物をスキャンした結果を示し，図 5.3.7(c)はそれらの測定結果を統合した結果を示す．この結果より，多方面からの測定結果を統合することでより多くの物体の形状情報が得られていることがわかる．ここで，床面以下の高さの点群は，これ以後の認識では必要ないため，閾値を定めて削除している．



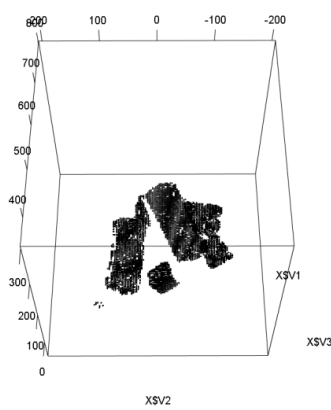
(a) 測定対象物



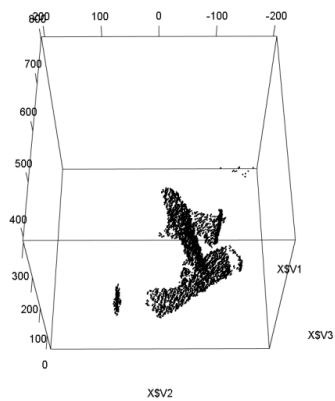
(c) 情報の統合結果



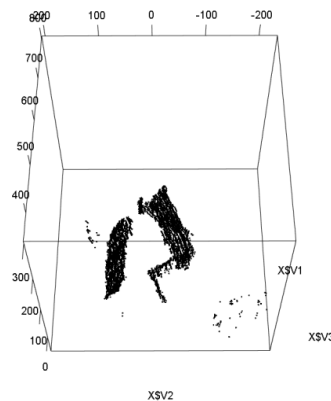
(前面)



(上面)



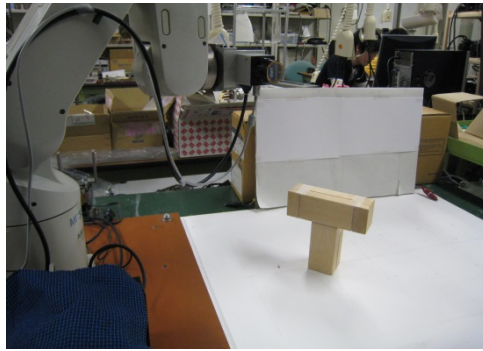
(右側面)



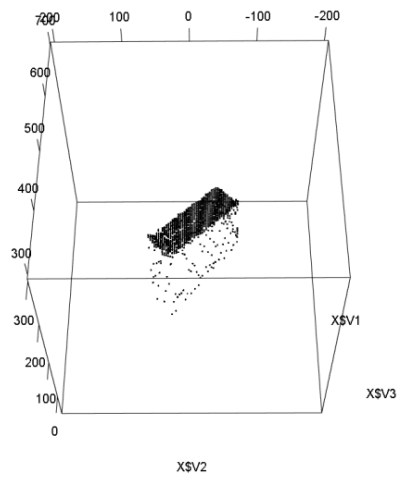
(左側面)

(b) 各方面からの計測結果

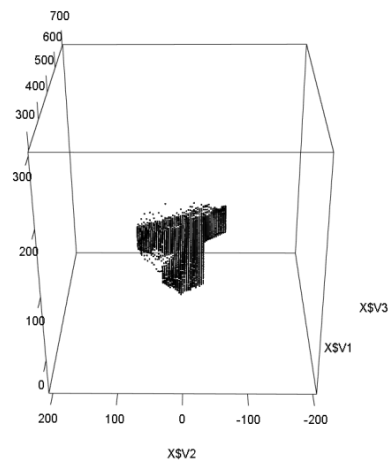
図 5.3.7 計測の一例



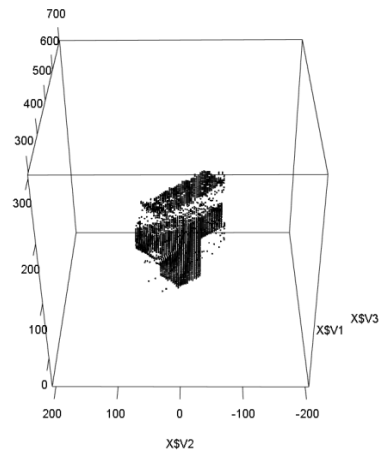
(測定対象物)



(上面)



(前面)



(統合結果)

図 5.3.8 計測の一例

5.3.4 測定結果の統合時の位置ずれの補正

LRF から出力される測距値には、大小異なる誤差が含まれている。計測結果の統合時において図 5.3.8 に示すような位置ずれ問題が発生する。図 5.3.8 の結果から明らかなように、上面と正面のような異なる視点で得た点群を統合した結果に位置の開きが確認できる。このように形状が噛み合わない点群を使用すれば、物体の位置姿勢を認識する際のマッチングの誤差にも大きく影響するため、使用する LRF の測距誤差の傾向を調べることで補正を行う。

(1)板面に垂直に入射するレーザの測距値の分析

平坦な紙面から成る板を、図 5.3.9 のように LRF の X 軸に対して垂直に配置し、LRF 原点からの距離を変化させて計測を行った。計測結果から、 X 方向の測距誤差を検討する。距離 L は 50~400[mm]までを 50mm 間隔で検証する。また、各距離において測距は 10 回ずつ行い、それを $-50\sim 50[^\circ]$ の範囲において 10° 間隔で選び出したレーザを対象として行い、各レーザの測距値 10 回分の平均を用いる。(各レーザ A~K は板面に正対するように照射する。) 図 5.3.10 には各レーザの測定結果を示す。

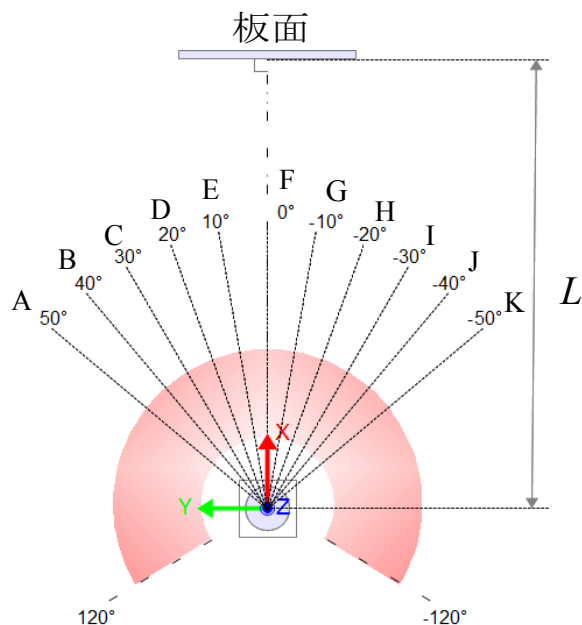


図 5.3.9 測距実験（垂直入射）

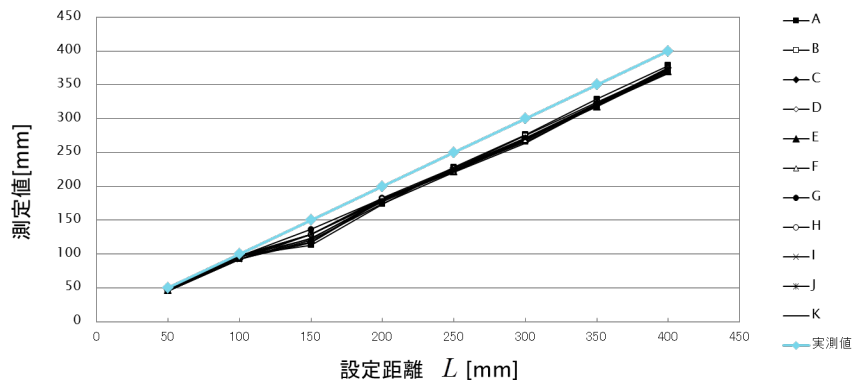


図 5.3.10 実測値と測定結果の比較（垂直入射）

図 5.3.10 から、設定距離 100mm までの範囲は誤差が小さいことが分かる。しかし、各レーザのばらつきは小さいものの、150mm 以上の範囲においては全体的に一定のマイナス誤差が見られ、20~30[mm]の偏り誤差が発生していることが確認できた。このような距離に比例しない一定の測距誤差は、センサの機構やレーザの波長などの機器定数に左右される独自の誤差と考えられる。

(2) レーザの入射角による測距値の分析

ここでは、図 5.3.11 のように板面の角度を段階的に変えることで、レーザの入射角度を変化させ、角度による測距誤差への影響を調べた。距離 L は 300mm で固定し、先程と同様にレーザ A~K を対象として行い、各レーザの測距値 10 回分の平均を用いる。

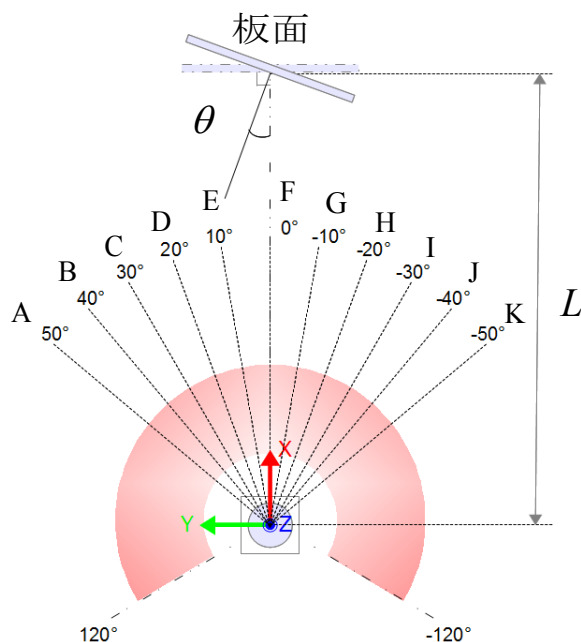


図 5.3.11 測距実験（入射角変動）

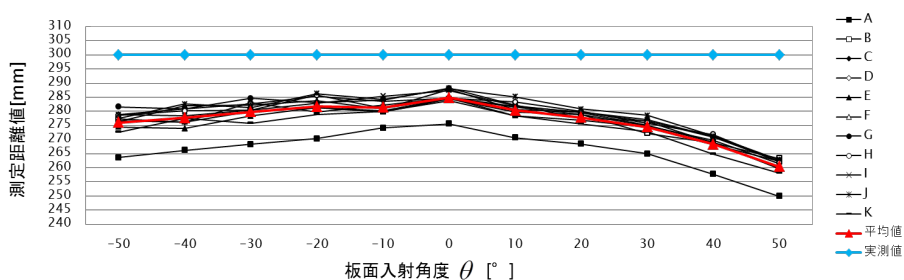


図 5.3.12 実測値と測定結果の比較（入射角変動）

図 5.3.12 に各レーザの測定結果を示す。図 5.3.12 から、LRF のスキャン領域上のプラスの領域とマイナスの領域で傾向の差が見られるが、入射角の大きさに比例した誤差の増加が見られる。しかし、 $\pm 40^\circ$ の範囲の平均値のばらつきは

10mm 程度に収まっているので、(1)の距離誤差の影響の方が全体としては大きいと思われる。

上記 2 つの分析結果から影響の大きい正対の距離誤差に関する補正を行う。図 5.3.13 に示す近似直線は、測距実験(1)で検証した誤差の近似直線である。LRF から対象物までの距離は 100mm 以上離れていると考え、150mm 以降の測定値を用いて近似した。取得した生の距離データに近似式から逆算できる誤差量を上乗せした値を、3次元表現を行う際の距離データとして使用する。実際の補正例を図 5.3.14 に示す。

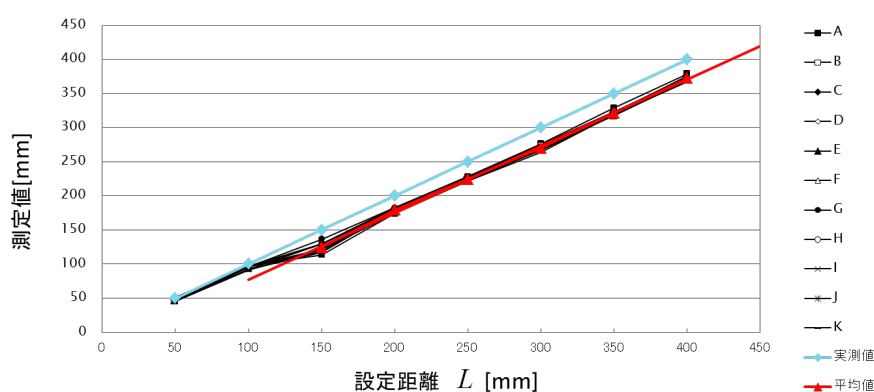


図 5.3.13 補正用近似直線

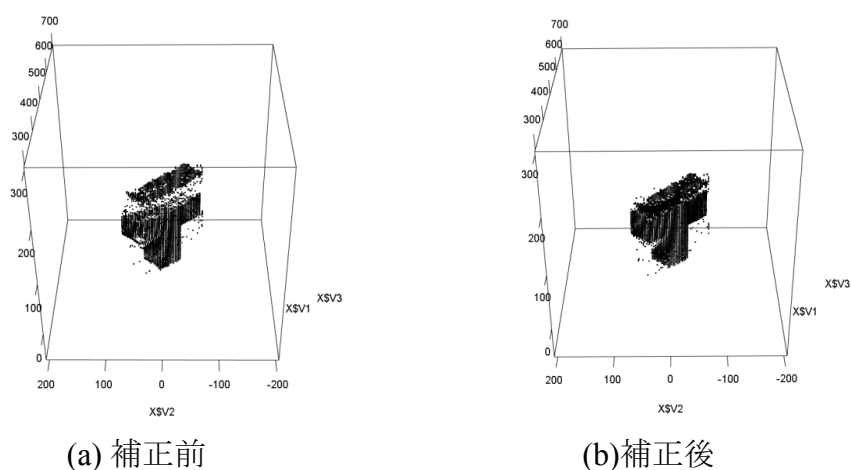


図 5.3.13 距離誤差の補正結果

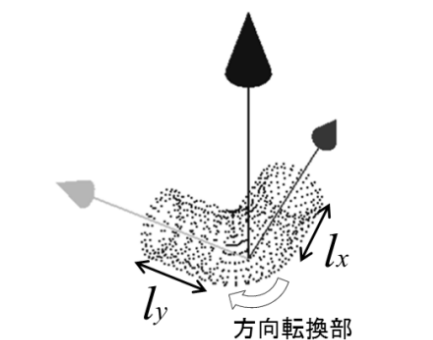
5.4 物体の3次元位置・姿勢の認識

5.4.1 モデルの点群化

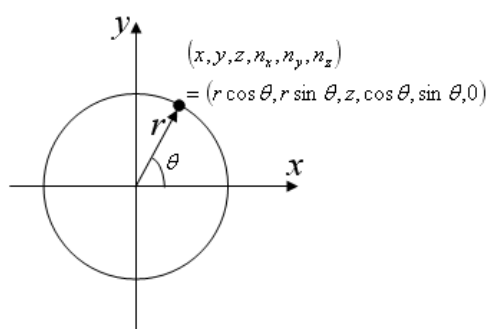
本研究における物体の認識はモデルベースでの認識を行うことからマッチングに用いる物体のモデル点群については、既知の寸法形状を基に作成する。図5.4.1に示すように3次元座標系を基準に点群で形状を表現する。



(a) 対象物



(b) モデル点群



(c) 2次元円の式

L字パイプ	寸法	間隔
外径 r_1	75mm	10° (周上360°分)
内径 r_2	60mm	10° (周上360°分)
X軸方向長さ l_x	65mm	15mm
Y軸方向長さ l_y	65mm	15mm
方向転換部	同一径	10° (90° 転換分)

(d) L字型パイプの点群情報

図 5.4.1 モデル点群の作成例

また、モデルの各点には物体表面の法線ベクトルの情報も同時に与える。点群及び法線は、幾何学式と座標変換などを使うことで作成できる。点群座標 (x, y, z) の算出式を式(5.4.1)に、面法線ベクトル (n_x, n_y, n_z) の算出式を式(5.4.2)に示す。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & x_s \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & y_s \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.4.1)$$

$$\begin{pmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & 0 \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.4.2)$$

5.4.2 ICP アルゴリズムを用いたマッチング

計測点群から物体の位置姿勢を認識する手法として、本研究では ICP(Iterative Closest Points) アルゴリズム[61 - 64]を用いる。これは 2 つの点群データをマッチングさせる方法で、点群間の位置合わせを繰り返すことで、共通形状を探索することができる。本研究では、計測点群とモデル点群の間でこの処理を行う。図 5.4.2 に LRF による計測点群と事前に用意したモデル点群とのマッチング結果の例を示す。

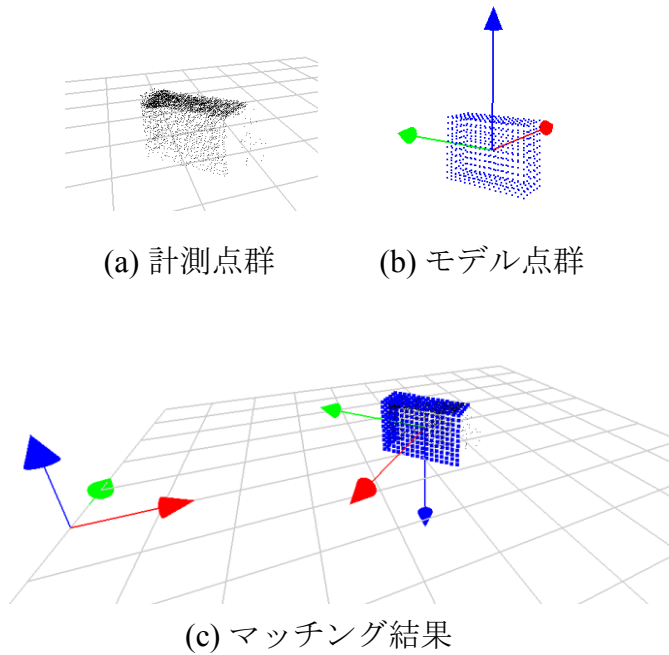


図 5.4.2 形状マッチング例

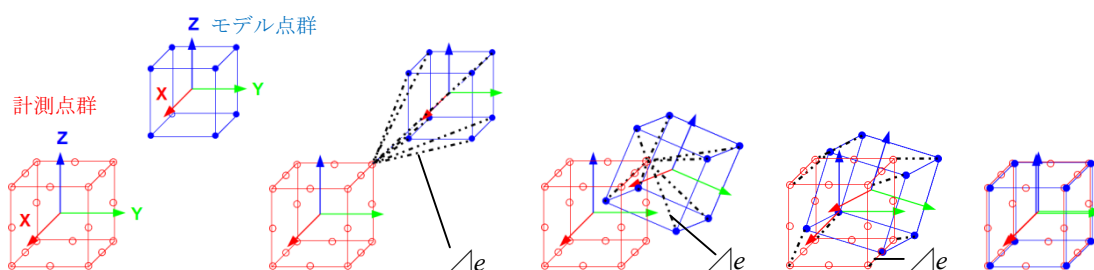
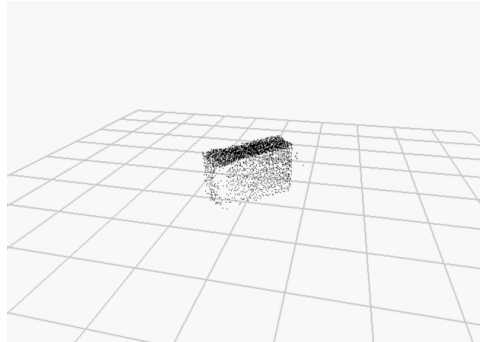


図 5.4.3 ICP アルゴリズムの概念図

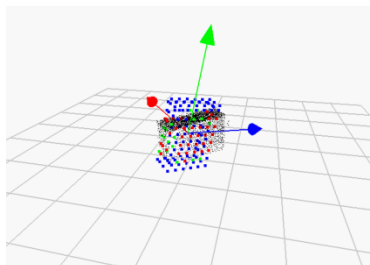
[ICP アルゴリズムの基本原理]

図 5.4.3 に ICP アルゴリズムの概念図を示す. 図 5.4.3 から分かるように ICP アルゴリズムは各点の対応付けと位置合わせの反復により対応点間距離 Δe の合計で表す評価関数を着実に減少させることが可能であるため, 目標点群に単調に収束することが保証されている. しかし, モデルの初期位置によって対応点の組み合わせは様々に変化するため, 真の共通形状ではない極小解(ローカルミニマム)に陥る場合がある. そのような誤ったローカルミニマムを回避するために, 閾値を設定している. 不適切な極小解が示す対応点間距離の値を可能な限りはじくように設定し, 真の解に行き着くように対処している. よって, 正しい解に行き着くためには, 複数回のマッチング処理を行う必要がある. 点群に色情報を付加[65]したり, 輝度情報を付加[66]したりすることで認識率の向上を図った例や, モデルのデータ点数, 法線方向, Shape Index 値[67]等の特徴量を用いた認識方法[57, 59], 特徴点同士の関係を用いて特徴記述することで高速化する方法[68, 69], 局所領域内の点群の法線方向分布を記述した SHOT 特徴量[70]を用いた投票型の認識方法[71]が提案されているが, 対象とする物体が複数存在し, それがバラ積み状態になっている場合に認識率の低下が生じてしまう. そのため, 本質的なローカルミニマム問題の回避には至らないため, 本研究では複数回のマッチング結果から判断することで正答率の向上を図る.

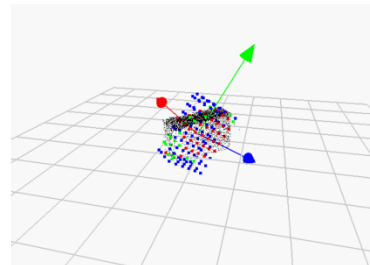
図 5.4.4 に示したのは, 閾値によって適切なマッチング状態に辿り着く過程を表した例である. (図中の評価値 e は後述のマッチング方針の便宜上, すべての対応点間距離 Δe の平均値として表している.) 図 5.4.4(b)~(d)は収束結果の評価値 e が閾値を上回っており, 収束結果の点群を見てもローカルミニマムに陥りマッチングが上手くいっていないことがわかる. 閾値を下回った図 5.4.4(e)の結果を見ると測定点群とモデル点群がほぼ一致しておりマッチングが成功していることがわかる.



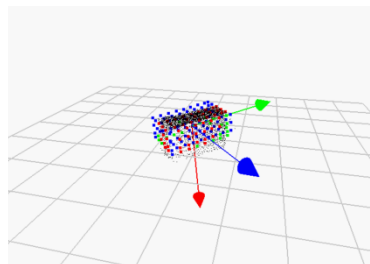
(a) 計測点群



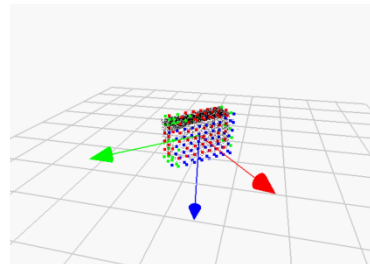
(b) 閾値以上($e = 9.2$)



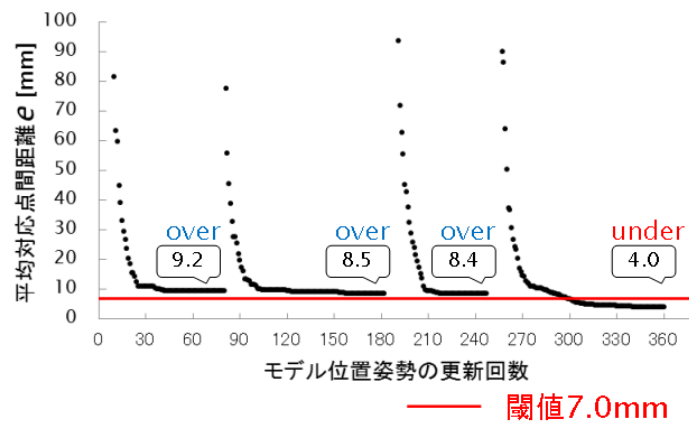
(c) 閾値以上($e = 8.5$)



(d) 閾値以上($e = 8.4$)



(e) 閾値以下($e = 4.0$)



(f) 評価値 e の収束過程

図 5.4.4 マッチングの結果評価

5.4.3 マッチングの工夫

本研究の 3 次元計測では、物体を全方位から計測できないため、得られる形状はレーザー光が直接当たる物体面に限られる。すなわち物体の裏面や底面に相当する領域には形状の欠損が生まれる。ICP アルゴリズムは共通形状を探索するため、対応点探索を行う側のモデル点群の形状は他方の計測点群の形状の一部である必要がある。もしもモデルの全形状データを使用してマッチングを行えば、計測点群の一部とは成り得ない裏面や底面の点列が存在するため、正しい位置合わせができず、評価関数にも大きな残差が残ってしまうという問題がある。そこでマッチングでは、モデルの位置姿勢を変換する毎に、LRF の死角となるモデル点を排除し、評価関数計算に使用しないという処理を加える。LRF の視点となる座標系 ΣC の原点位置 (O_x, O_y, O_z) を定め、各モデル点までのベクトル $\vec{v} = (q_{x,i} - O_x, q_{y,i} - O_y, q_{z,i} - O_z)$ を計算する。そしてモデルの各点に予め与えた面法線ベクトル $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ を利用し、両者のベクトルがなす角度 θ を次式によりもとめる。

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{v}_i \cdot \vec{n}_i}{|\vec{v}_i| |\vec{n}_i|} \right) \quad (5.4.1)$$

$0 \leq \theta_i < \frac{\pi}{2}$: モデル点を使用しない

$\frac{\pi}{2} \leq \theta_i < \pi$: モデル点を使用する

図 5.4.5 に式(5.4.1)を用いたモデル点の使用・不使用の概略図を示す。

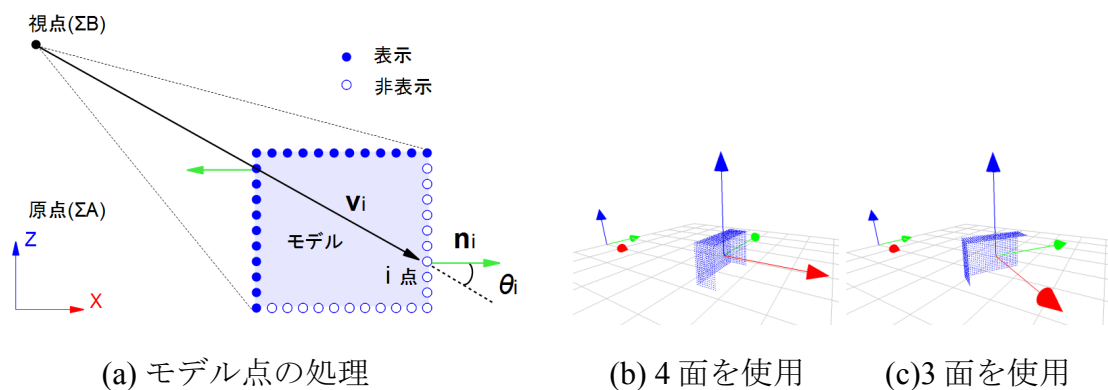


図 5.4.5 モデル点の使用・不使用の処理

図 5.4.5(b)はセンサの視点から 4 面分のモデル点を使用する例であり, 図 5.4.5(c)はモデルの姿勢変更により 3 面分のモデル点を使用する例である. このようにモデル点数を操作することで, 任意の位置姿勢のモデルに対してマッチングに使用すべき点群領域を推定することができる.

上記の処理によりモデル点数が随時変化する都合から, ICP アルゴリズムの評価関数にはその時の全モデル点の対応点間距離 Δe の 1 点間あたりの平均値 e を用いることとしている. 図 5.4.6 に図 5.5.4 の角柱のマッチング過程におけるモデル点数 N の変化のグラフを示す. (角柱モデル全体の点数は 161 点である) 図 5.4.6 からモデルの位置・姿勢を変える毎にマッチングに使用するモデル点数が大きく変化していることがわかる.

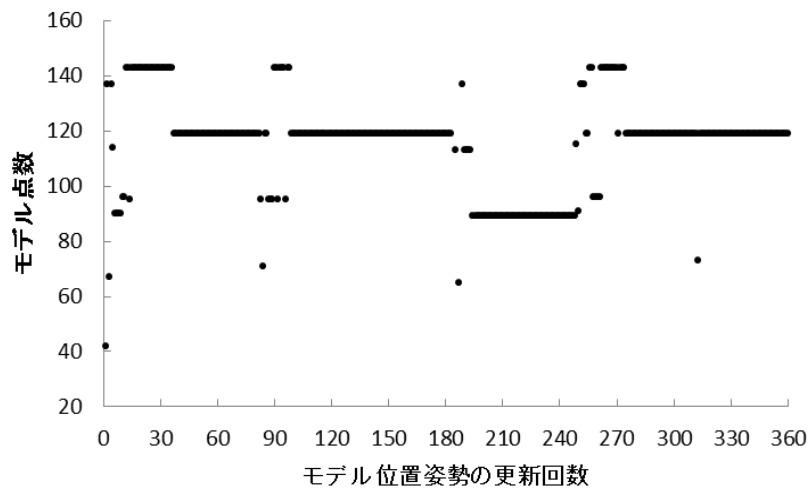


図 5.4.6 マッチング中のモデル点数の変化

[本研究の ICP アルゴリズムの流れ]

1. 初期位置・姿勢をモデルに与える.
2. 各モデル点に対して最近傍計測点を探索し、対応点とする.
3. 各対応点間距離 Δe の平均値 e が最小となるようにモデルの位置姿勢を更新する.
4. モデルの新たな位置姿勢に対して再度対応点探索を行い、平均対応点間距離 $e^{(m)}$ が一定値に収束するまで、モデルの同次変換を繰り返す.
5. e が一定値に収束し、尚且つ設定した閾値を下回ればマッチングしたと判断する.

$$e^{(m)} = \frac{\sum \Delta e}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |\mathbf{p}_{k_i^{(m)}} - \mathbf{q}_i^{(m)}|}{N} \quad (5.4.2)$$

e : モデル 1 点あたりの距離 (評価値)

\mathbf{p} : 計測点群

\mathbf{q} : モデル点群

N : マッチングに使用するモデル点群数

m : 繰り返し計算の試行回数

k_i : モデル点群中の i 番目の点に対応する計測点

表 5.4.1 モデルの剛体変換における位置と姿勢の乱数パラメータ

対応点間距離 e [mm]	振り幅[mm]	刻み幅[mm]	振り幅[°]	刻み幅[°]
$50 < e$	30	3	30	3
$10 < e < 50$	20	2	20	2
$0 < e < 10$	2	1	2	1

[モデルの位置・姿勢変換方法]

モデルの位置姿勢の更新処理は、位置姿勢の各パラメータ($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)に乱数を与えて行う。乱数はその時の対応点間距離の数値の大小に従って以下に示す振り幅と刻み幅により決定する。振り幅は与える乱数の範囲、刻み幅はその範囲の中から決定される乱数の数値間隔を意味する。(振り幅 30, 刻み幅 3 のとき: 0, 3, 6, 9, ..., 27, 30 から乱数を選ぶ) 対応点間距離が大きい場合には、振り幅と刻み幅を大きくすることで少ない位置姿勢の更新処理で目標位置まで収束させることができる。ある程度目標に接近させた後は、段階的に乱数の幅を狭めることで、より精度良く目標点群に収束させることが可能となる。

同次変換行列 T はロール・ピッチ・ヨー角(ϕ, θ, ψ)による回転行列 R 及び並進ベクトル $\mathbf{r} = (x_s, y_s, z_s)$ を用いて表わし、同次変換後のモデル点群の座標値 $\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z)$ は次式のように決定される。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{q}_i^{(m)} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{r} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q}_i^{(0)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.4.3)$$

$$\begin{pmatrix} q_{xj}^{(m)} \\ q_{yj}^{(m)} \\ q_{zj}^{(m)} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & x_s \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & y_s \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{xj}^{(0)} \\ q_{yj}^{(0)} \\ q_{zj}^{(0)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.4.4)$$

5.4.4 マッチング後の流れ

共通形状に適切に収束したマッチング解を得るため、評価値が閾値を下回るまでマッチングを複数回行うと述べたが、閾値を下回れば直ちにマッチングを終了するわけではない。元々、閾値はマッチング度合の目安に過ぎず、必ずしも信頼できる値ではない。バラ積み環境などの場合には、マッチングが覚束無くなり有らぬ位置姿勢で誤認識に陥る危険性があるため、マッチングは予め設定した回数(モデル位置姿勢の更新回数 2000 回分)をこなしてから、各々の結果を比較し、より良い結果を選別することとする。

図 5.4.7 にマッチングを複数回(33 回分)行った一例を示す。閾値を 10mm に設定し、目視したマッチングの結果の中から適切で良好と判断できた結果とミスマッチな結果とを色分けしている。

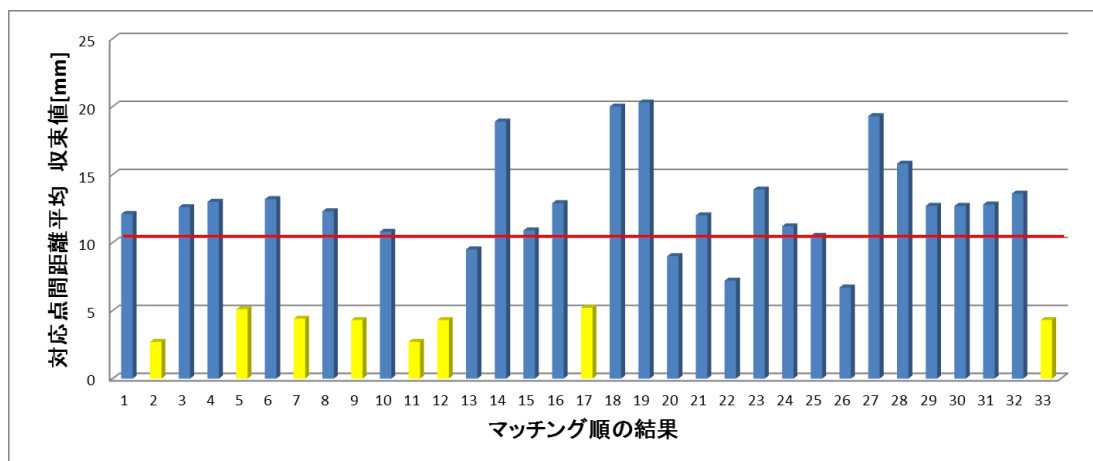


図 5.4.7 収束した評価値の比較

環境に存在する物体が一つならば、図 5.4.7 のような全体の結果の中から、最も収束性の良いもの、すなわち評価値最小のものを選択するのが最適である。しかし、複数の物体を想定する環境においては、マッチング結果もモデルが収束した物体ごとに複数の最適パターンが得られると想定できる。この中の最も収束したものから選択して、ハンドリングを考えて行くのも一つの方法だが、場合によっては隣接する物体同士の干渉の影響から、アームで掴みづらい場合もある。評価値最小のものが必ずしも取りやすい個体であるとは限らないことから、把持の優先順位を考える必要が出て来る。

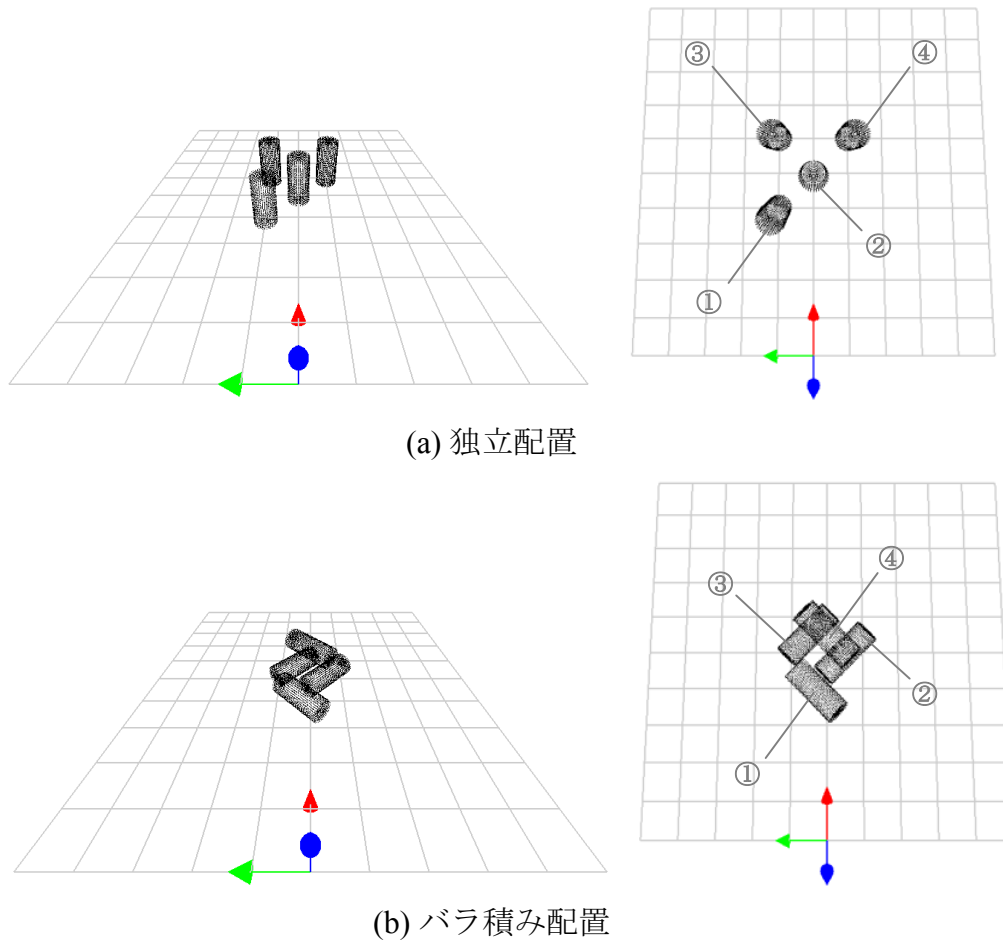


図 5.4.8 物体の配置状況の違い

図 5.4.8 に物体の配置状況の違いを示す。図 5.4.8(a)は物体同士の重なりや接触が無い複数物体の独立環境，(b)が物体同士の重なりや接触の有る複数物体のバラ積み環境をイメージしたものである。各々の環境における把持の優先順位付けの方策について解説する。

始めに、閾値以下の全てのマッチングの結果から、異なるマッチングパターンをより分ける基準を示し、続いて把持の優先順位についても示す。

[マッチングパターンの区別条件]

条件(1) : 評価値 e が閾値を下回っていること.

マッチングの結果として, 仮に 10mm で設定した閾値を下回った収束結果が以下に示すように 10 個得られたとする. (実際には評価値の小さい上位 5 つを対象とすることになっている) パターンの区別で利用するパラメータは物体の位置と評価値 e のみとする.

$$\begin{aligned} & result_1.(x_1, y_1, z_1, e_1) \\ & result_2.(x_2, y_2, z_2, e_2) \\ & result_3.(x_3, y_3, z_3, e_3) \\ & \quad \vdots \\ & result_9.(x_9, y_9, z_9, e_9) \\ & result_{10}.(x_{10}, y_{10}, z_{10}, e_{10}) \end{aligned}$$

条件(2) : 各々のモデルの収束した相対的な位置が 50mm 以内の距離にあるものは同じ個体と判断する. 50mm 以上のものは別個体とする.

全結果に対して, その他の結果との距離間隔 l_{ij} を一組ずつ次式により計算する.

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (5.4.5)$$

ここで l_{ij} は $result_i$ と $result_j$ との距離を表す.

始めに $i=1$ として $j=2\sim 10$ すべての距離を計算し, $l_{ij} < 50\text{mm}$ の結果は全て同じ個体を示すマッチングパターンと判断する. 仮に, $j=3, 5, 7$ の結果が $i=1$ と同じ収束結果だった場合は, その中から評価値 e が最も小さいものを選出する. もし, $e_3 < e_7 < e_1 < e_5$ だったのであれば $result_3$ が一つ目の個体と確定される.

$$object_1 = result_3.(x_3, y_3, z_3, e_3)$$

続いて, 別個体と判断された $j=2, 4, 6, 8, 9, 10$ に対して, $i=2, j=4, 6, 8, 9, 10$ として個体判別の上記処理を繰り返すことで, というように決めていく.

以上の計算により選ばれた複数のマッチングパターンに対して, 次に把持の優先順位付けを考える.

[把持の優先順位]

手順(1): 高さ別の優先付け. (バラ積みの場合には, 上部の個体から取り進めたい)

仮に, $result_1 \sim result_{10}$ の中から 3 つのマッチングパターンが以下のように得られたとする.

$$object_1 = result_3.(x_3, y_3, z_3, e_3)$$

$$object_2 = result_6.(x_6, y_6, z_6, e_6)$$

$$object_4 = result_9.(x_9, y_9, z_9, e_9)$$

認識位置に基づき, 高さ順に $object_1 \sim object_3$ を以下のように計算上で並べる.

$$z_9 > z_3 > z_6$$

$$\therefore object_3 > object_1 > object_2$$

これら並びに対して, 明らかに高さに差異のあるものと, 大体同じ高さにあるものとの区分けするために, 次式により 50mm 刻みの階層分けを行う.

$$H_{ij} = z_i - z_j \quad (z_i > z_j) \quad (5.4.6)$$

一番高い位置にある個体を $i (=9)$ として, 残りの $j (=3, 6)$ に対して順位に高さ間隔 H を求める. $H_{ij} < 50\text{mm}$ にあるものは同じ階層にあるとし, それ以外は下の階層にあると判断する. 仮に, $j=3, 6$ の結果は $i=9$ よりも下の階層にある収束結果だったとすると, 高さの優先としては $object_3 > object_1 > object_2$ であったので, $result_9$ が最優先の個体であると確定される.

$$priority_1 = result_9.(x_9, y_9, z_9, e_9)$$

手順(2)：奥行き別の優先付け。(同じ階層にある場合、手前の個体から取り進めたい)

認識位置に基づき、同じ階層にある個体 $object_1$, $object_2$ を奥行き順に計算上で並べる.

$$x_2 < x_1$$

$$\therefore object_2 < object_1$$

$$\therefore priority_2 = result_6.(x_6, y_6, z_6, e_6)$$

$$priority_3 = result_3.(x_3, y_3, z_3, e_3)$$

以上のマッチングパターン区別と把持優先付けを介すことで、全てのマッチング結果の中から、取り出す個体の選出を行うことができる。ただし、上記の優先順位付けでは、手先と環境との干渉を考えて優先順位付けされていない。

(干渉判定については後述) 優先順に把持計画を行った際に、周囲の物体との干渉が認められた場合には、優先順位の後続の個体に干渉しないものがあれば、そちらから優先するべきと考えているが、現状ではその処理は加えていない。

図 5.4.8 の各状況について、把持の順位付けを行うと、以下のような決定が為される。

(a)の例の場合：4本の円柱が各々均等に計測できたとし、何れの個体のマッチング結果も得られたと仮定する。全て同じ高さ階層に存在するので、奥行き別に①、②、③もしくは④の個体の順で取り進めることになる。

優先順位付けの結果：① → ② → ③ or ④

(b)の例の場合：②と③の個体は他の物体の下部に存在するため、欠損が生じ、十分なマッチングが行えないと想定される。上部の④と手前の①のマッチング結果が得られたと仮定すると、高さの階層分けにより④、①の順となる。その後、再度計測・認識がなされれば、奥行きの判断により②、③の順が得られる。

優先順位付けの結果：④ → ① (→ ② → ③)

5.5 点群によるマッチングの検証

5.5.1 データ誤差と認識精度との関連

本研究だけに限らず、ハンドリングシステムの構築においては、ワークの把持に要求される距離計の測定精度の見積もりが重要と考えている。そこで、測定精度すなわち点群データのばらつき誤差が、マッチングの精度にどのような影響を及ぼし、ハンドリングに必要な精度との兼ね合いをどのように見積もることができるのかについての簡単な検証を行った。

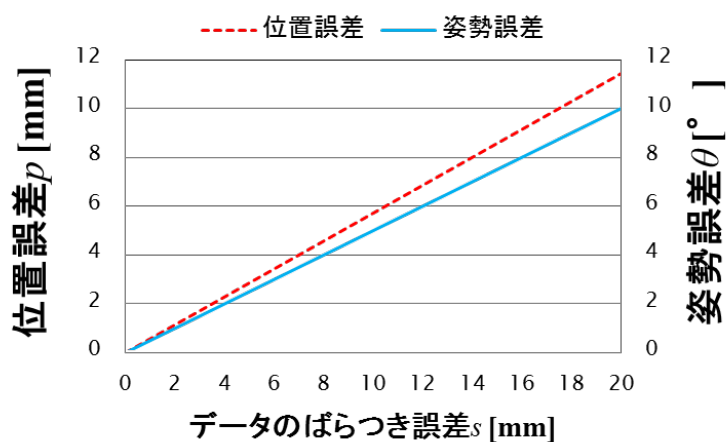


図 5.5.1 データのばらつきとマッチング精度の関係

図 5.5.1 は、種々の形状の仮想計測点群に対してばらつき誤差を 3~19[mm]の範囲において 2mm 間隔で与えてモデルマッチングを行った際に、見かけ上適正なモデルマッチングが為された時の位置姿勢誤差が真の位置姿勢からどの程度生じているかを平均化したグラフである。位置・姿勢共に 3 軸の値の平均値を使用しており、更にマッチング 10 回分の平均としてプロットしている。データのばらつきに伴うマッチング誤差の増加傾向が確認できる。図 5.5.2 に円柱と角柱に対して形状点群のばらつきが大きい場合と小さい場合の例を示す。

また、物体の最大寸法を一辺とする立方体を、その物体のスケールと定義し、3 軸の平均姿勢誤差に伴う立方体の頂点のずれ誤差(距離誤差(図 5.5.3(a)))を、その全頂点の平均値の立方根で表す輪郭位置誤差 g とし、スケールの基準値を N (立方体の一辺の長さ)と定義することで、姿勢誤差から生じる位置誤差の傾向を、検証により図 5.5.3 のように求めた。

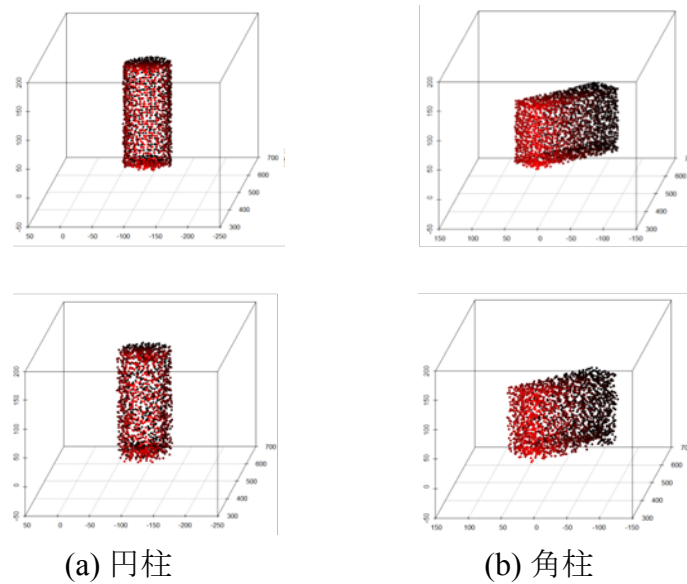


図 5.5.2 形状点群のばらつき例（上：ばらつき小，下：ばらつき大）

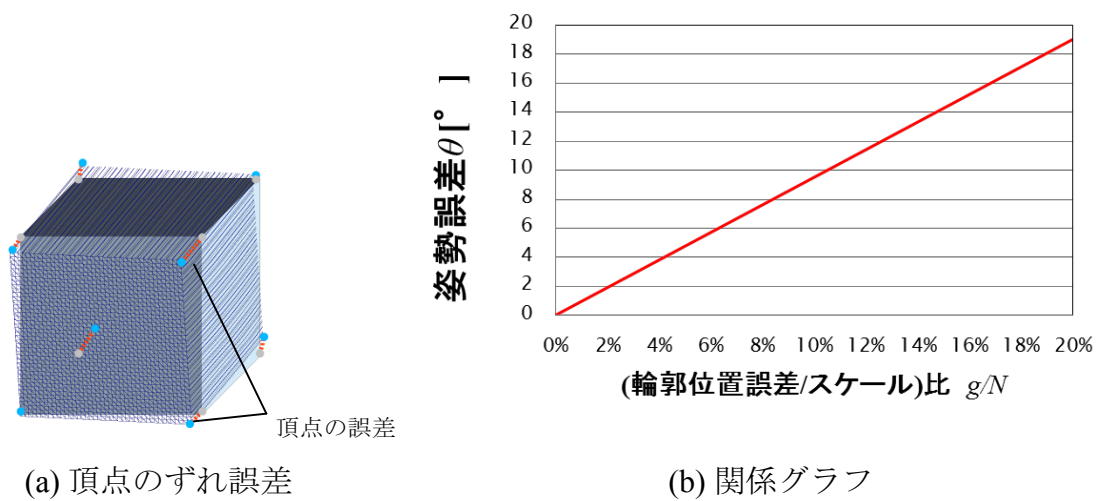


図 5.5.3 姿勢誤差と輪郭誤差との関係

図 5.5.1, 5.5.3 のグラフの関係式を利用することで、使用するセンサのばらつき誤差，対象物のスケール，そしてハンドの開閉幅から予測できるハンドリングに要求される位置精度が決まっているときのハンドリングの可否を次のように見積もることができる。

図 5.5.1 のデータのばらつきと位置誤差の関係グラフの傾きを A ，データのばらつきと姿勢誤差の関係グラフの傾きを B ，図 5.5.3 の関係グラフの傾きを C とする．それぞれの値か仮に以下の様に設定する．

$$(A = 0.5723, B = 0.4998, C = 95.179)$$

データのばらつきを s [mm]，物体のスケールを N [mm]，ハンドリングの要求精度を H [mm] とする．このときの位置誤差 p [mm] と姿勢誤差 θ [deg] は図 5.5.1 の式から以下のようになる．

$$p = As \tag{5.5.1}$$

$$\theta = Bs \tag{5.5.2}$$

更に姿勢誤差 θ [deg] から分かる輪郭位置誤差 g [mm] は図 5.5.3 の式から以下のようになる．

$$g = \theta \frac{N}{C} \tag{5.5.3}$$

以上より求められた位置誤差 p [mm] と輪郭位置誤差 g [mm] が以下の条件を満たしていれば，ハンドリングの要求を満たしていると思積もることができる．

$$p + g \leq H \tag{5.5.4}$$

[例題 1]

データのばらつきを $s = 10\text{mm}$, 物体のスケールを $N = 100\text{mm}$, ハンドリングの要求精度を $H = 10\text{mm}$ とする. このとき把持が可能かどうか計算する.

式(5.5.1)~(5.5.3)より

$$p = As = 0.5723 \times 10 \doteq 5.72\text{mm}$$

$$\theta = Bs = 0.4998 \times 10 = 4.998\text{deg}$$

$$g = \theta \frac{N}{C} = 4.998 \frac{100}{95.179} \doteq 5.25\text{mm}$$

$$p + g = 5.72 + 5.25 = 10.97\text{mm} > H (= 10\text{mm})$$

以上より求められた位置誤差 p [mm]と輪郭位置誤差 g [mm]の合計が, ハンドリングの要求を満たしていなかったため, 例題の条件では把持は実現できない. データのばらつき $s = 10\text{mm}$, スケール $N = 100\text{mm}$ の物体を把持するには, ハンドリングの要求精度を少なくとも $H > 10.97\text{mm}$ としなければならない. より大きなハンドを用いる必要があることが分かる.

[例題 2]

データのばらつきを $s = 5\text{mm}$, 物体のスケールを $N = 150\text{mm}$, ハンドリングの要求精度を $H = 10\text{mm}$ とする. このとき把持が可能かどうか計算する.

式(5.5.1)~(5.5.3)より

$$p = As = 0.5723 \times 5 \doteq 2.86\text{mm}$$

$$\theta = Bs = 0.4998 \times 5 = 2.499\text{deg}$$

$$g = \theta \frac{N}{C} = 2.499 \frac{150}{95.179} \doteq 3.94\text{mm}$$

$$p + g = 2.86 + 3.94 = 6.80\text{mm} < H (= 10\text{mm})$$

以上より求められた位置誤差 p [mm]と輪郭位置誤差 g [mm]の合計が, ハンドリングの要求を満たしていたため, 例題の条件での把持は実現可能である. ハンドリングの要求精度が同じでも, センサの精度が高い程, より大きな物体でも対応できることが分かる.

ここで示した方法は一つの考え方に過ぎず, 概算に基づいた目安に過ぎない. 関係グラフも大まかな近似なので, 今後の再検討が必要である.

5.5.2 マッチング原理の種々の検証比較

複数の物体が密に接触する様な状況においても認識率を上げるために法線方向を持った特徴量である PPF(Point Pair Feature)特徴量を用いた手法[72][73][74]が提案されているが、安定した認識の為には多くの PPF を必要とする。本研究のマッチング原理は対応点間距離に基づいたものだが、成功確率向上のためには評価値のバリエーションを増やすことが有効な方法と言える。そこで、対応点間距離とその他、対応面点距離、面法線などを用いた方法について検証を行った。

図 5.5.4 に示したのは、三種類のマッチング原理の概念図である。(a)は従来の対応点間距離を評価値とした原理で、(b)はモデル面との対応距離に置き換わった原理である。面であることで対応距離を垂直にとれるため収束性が高いが、評価する点数の縛りが無いため、評価距離を制限する必要がある、閾値判断が難しい。(c)は計測点から推計した法線とモデル面とのベクトルマッチングである。面の表裏の判断が可能となるが、法線の推計が難しい。同じ角柱を対象としたマッチング結果を各手法で比較した結果を図 5.5.5 に示す。(図 5.5.5(d)については後述)

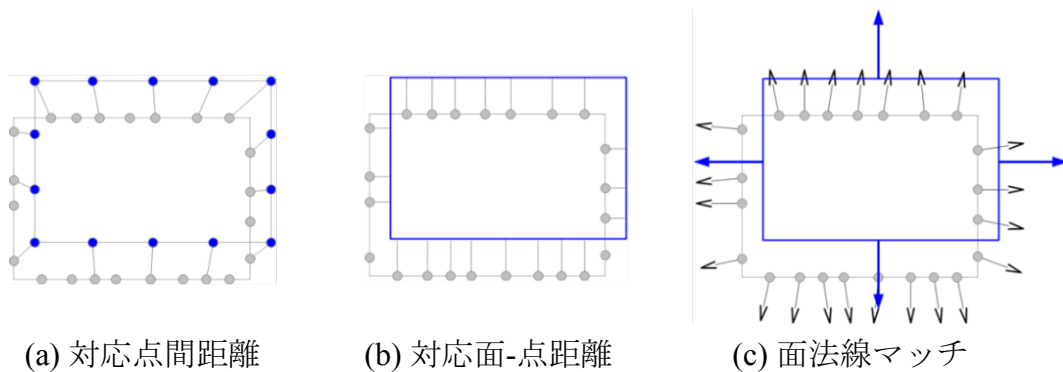


図 5.5.4 各マッチング原理の概念図

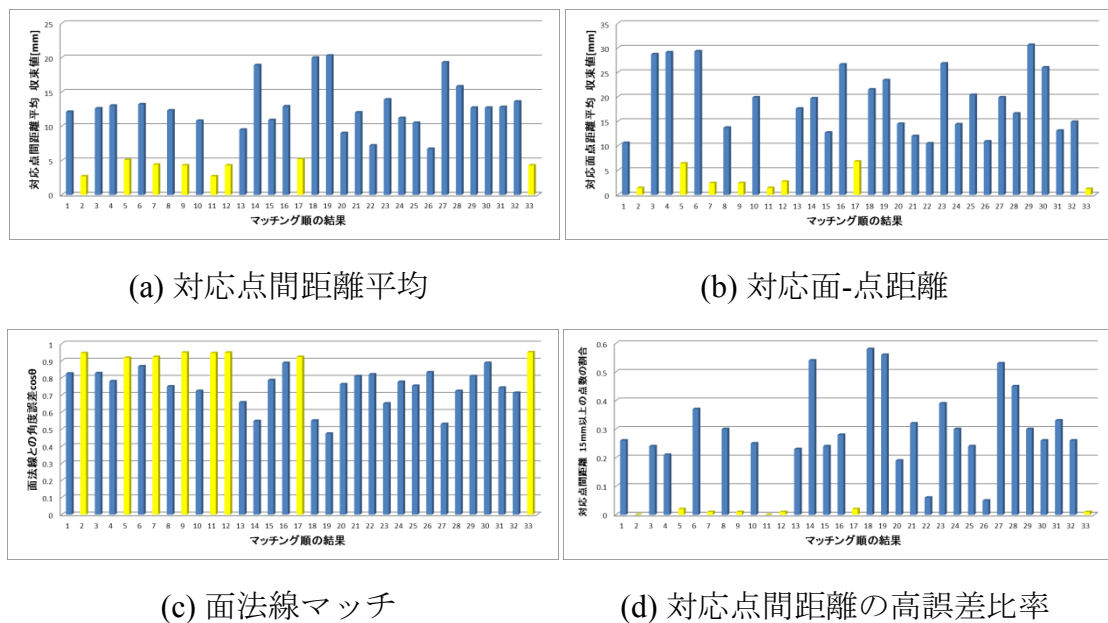


図 5.5.5 各手法によるマッチング結果

図 5.5.5 から、度合いは異なるが各手法とも効果が見て取れる。しかし、一部問題が確認できた箇所について以下に記載する。

図 5.5.6 は面-点距離の算出に関する問題で、単体の物体点群であれば誤差を最大限に加味できるが、複数の物体点群がある場合、全てを評価しないように領域を制限する必要がある。そうすると大きい誤差が評価されなくなり、評価値の能力が落ちるというジレンマを示している。

図 5.5.7 は面法線マッチに関する問題で、法線の傾向が大きく変化するエッジ部の領域では、マッチングがより不正確になるため、エッジ部は考慮しないような領域制限が必要となる。

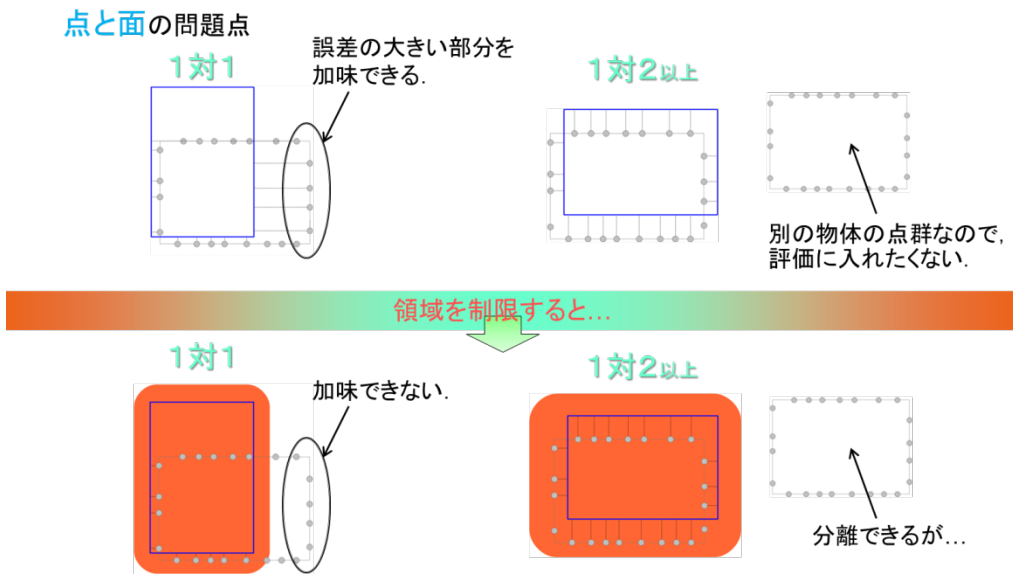


図 5.5.6 対応面-点距離の問題点

面と法線の問題点

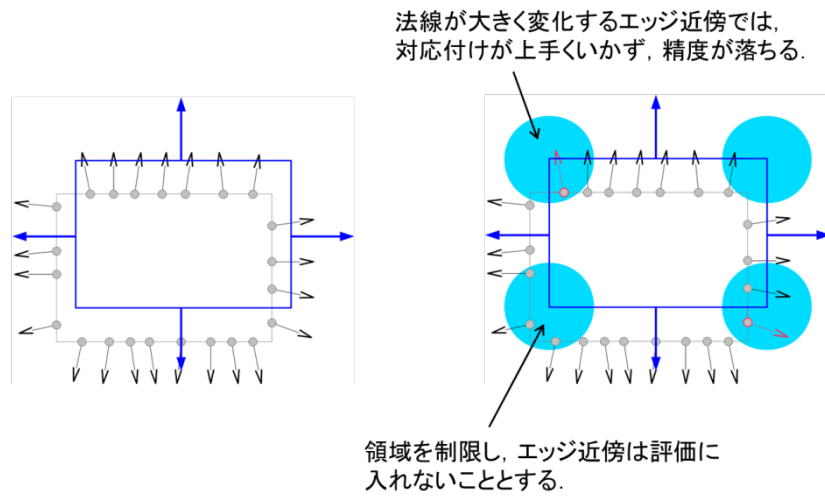


図 5.5.7 面法線マッチの問題点

前述した改善点も踏まえた上で、各手法の検証を現実環境で行った結果を図5.5.8に示す。対象物は4本の円柱のバラ積み環境とする。面マッチング用のモデルと法線の推計を行い準備した。

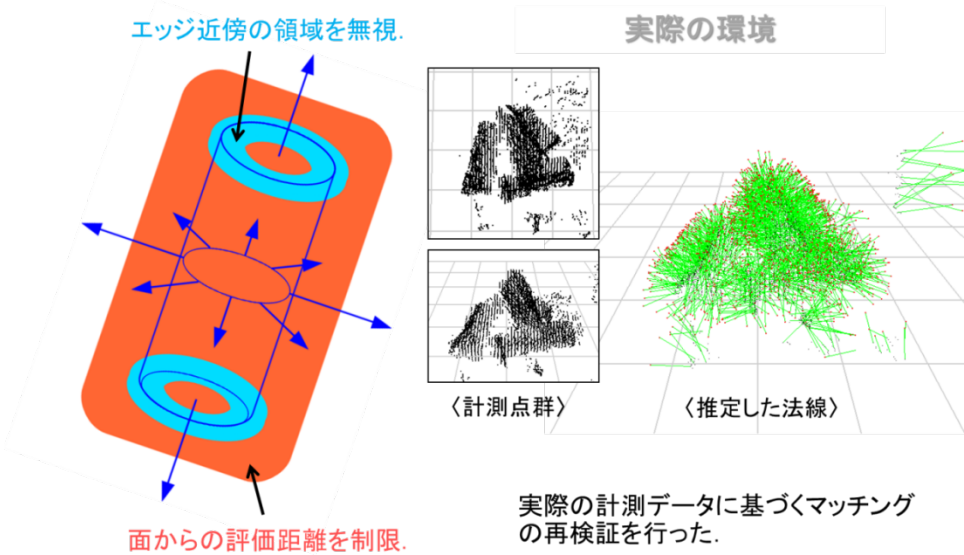


図 5.5.8 各マッチング手法の検証

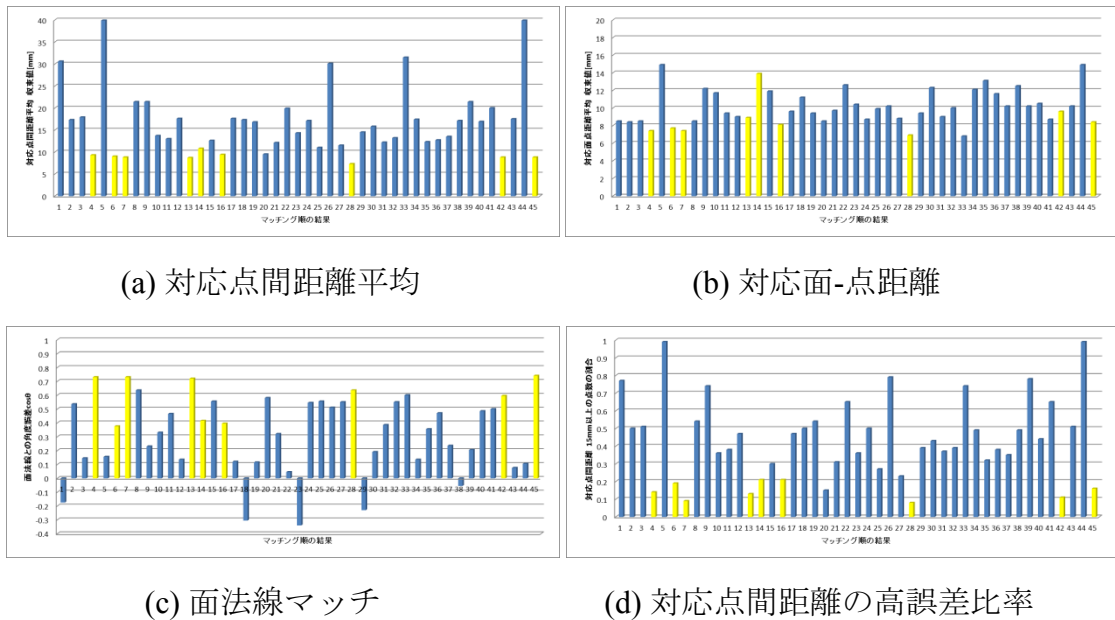


図 5.5.9 各マッチング手法の検証結果

図 5.5.9 に各手法により得られたマッチング過程の評価値グラフを示す。棒の色の違いはマッチングの成否を表す。従来の評価値である(a)の結果を基準として、マッチングの成否における差別化の度合いを観察比較すると、(b)の面点距離を評価値とした手法は、差別化がほとんど為されておらず平坦なグラフとなっている。これは既述したように、距離評価の領域制限をかけたことで、大きな誤差が評価できなくなってしまったことが原因である。(c)の法線ベクトルの角度誤差を評価値とした手法は、角度の \cos 値を評価値としているので、1 に近づく大きい結果ほど良い結果となるが、ある程度の差別化は見られるものの、その度合いは小さい。ばらつきのある計測点群から法線を推計すると法線も不正確になるため、誤差は非常に大きい。最後に、(d)の対応点間距離の高誤差比率という評価値を試みた。これは、従来の対応点間距離の手法に対して、15mm 以上の対応点間距離を持つモデル点の割合を計算して評価値とした方法である。高誤差のみを評価した方が、平均値で比較するよりも評価値に強弱が現れていることが(a)と(d)の比較から確認できる。以上の検証を踏まえると評価値の効果は以下のようにランク付けできる。

評価値の効果 : 高誤差比率 > 点間距離 >> 面法線 (面点距離は困難)

個々の能力には限界があるが、これら複数の評価値を組み合わせることで、その限界を押し上げる効果は見込めるものと思われる。

5.6 物体のハンドリング計画

図 5.6.1 に本研究におけるハンドリング計画の流れを示す．対象物体の認識結果に基づき，モデルに付与した情報を用いて把持位置を決定する．このときアームの動作範囲内での把持位置探索や対象物体以外の物体との干渉問題の回避等も考える．

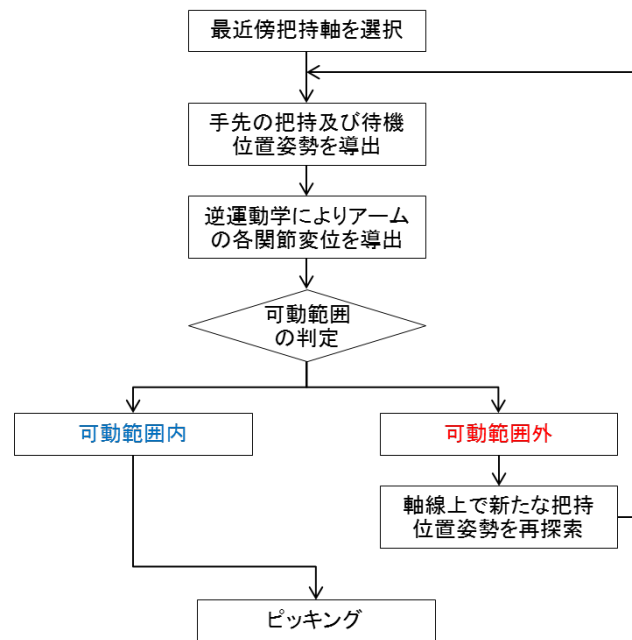


図 5.6.1 ハンドリング計画の流れ

5.6.1 事前知識

物体のハンドリングは，認識した物体の位置情報及びモデルの 3 次元座標系の姿勢情報に基づき計画される．しかし把持を考える場合，物体の寸法形状を加味した上で把持箇所を探索する必要がある．未知の物体の計測データに対して予め用意してある基準形状から把持位置を推定する方法[75, 76]や，2次元情報への投影により把持位置を探索する方法[77]や，3次元の測定データから把持位置を直接探索する方法[78 - 81]が提案されているが，本研究では対象物を既知として扱うことで，寸法形状に基づく把持の事前知識を有効活用する．図 5.6.2 に示したのが，事前知識の原型である．本研究ではロボットのハンドとして最も単純な 2 指グリップハンドによる把持を対象として，物体の寸法形状に配慮した適切な把持箇所を把持軸によって定義し，軸の位置と長さによって探索範囲を教示する．

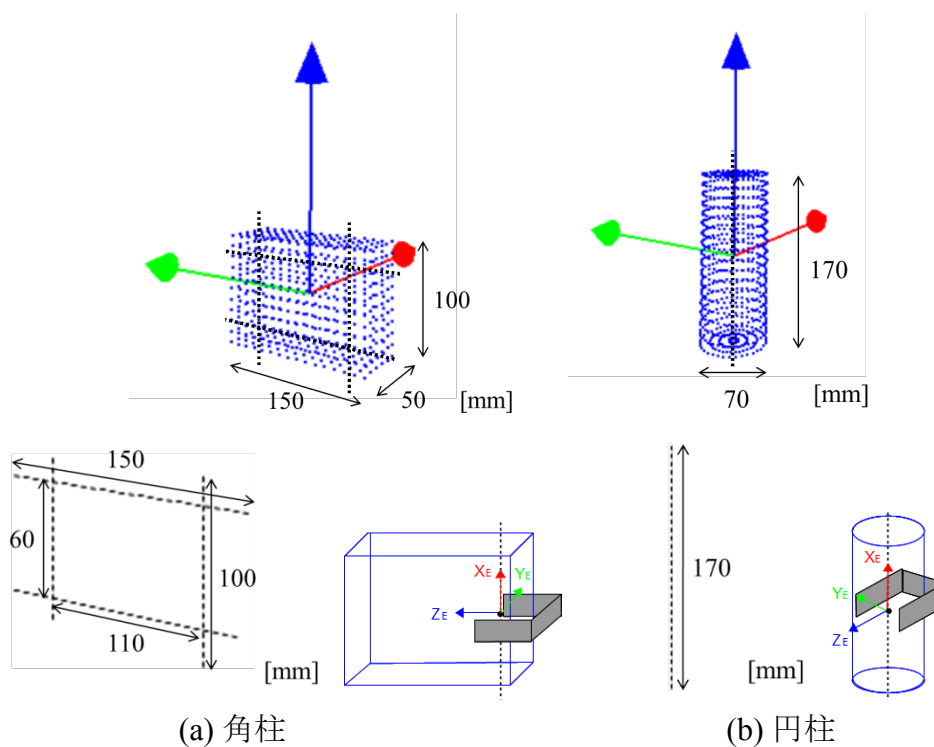


図 5.6.2 把持軸の設定例

5.6.2 把持位置・姿勢候補の決定

物体の形状は種々あるが、複雑な形状の物体も単純な造りの問題に還元できる。ここでは角柱と円柱を例に把持軸を用いたハンドリング計画について解説する。

[角柱のケース]

(1) 把持箇所の決定

図 5.6.3 に示す様に把持対象に把持軸が複数存在するときには、手先の初期位置から最も近い中心点を持つ把持軸を優先する。別の軸に探索を移行する場合には、次に近いものを選択する。

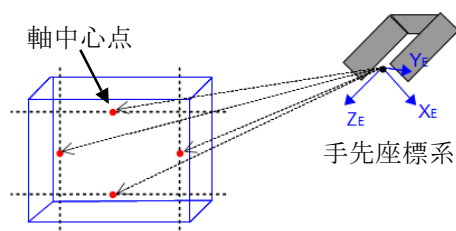


図 5.6.3 最近傍軸の探索（角柱モデル）

軸中心点はモデル点群と同様，モデルの座標系を基準とする座標値 (x_i, y_i, z_i) で初期定義されているので，モデルの位置姿勢のパラメータ $(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z) = (x_s, y_s, z_s, \phi, \theta, \psi)$ に合わせた同次変換を行うことで，式(5.6.1)によりアームの原点座標系から見た中心点 (x_i', y_i', z_i') を決定できる．

$$\begin{pmatrix} x_i' \\ y_i' \\ z_i' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & x_s \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & y_s \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.6.1)$$

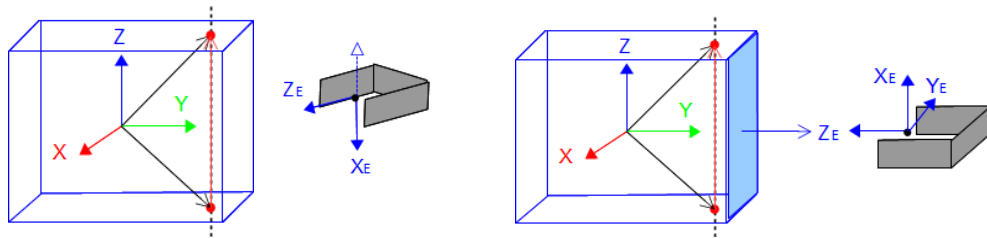
手先の初期位置を (x_E, y_E, z_E) とすると i 番目の軸中心との距離 l_i は次式で表される．

$$l_i = \sqrt{(x_i' - x_E)^2 + (y_i' - y_E)^2 + (z_i' - z_E)^2} \quad (5.6.2)$$

同次変換した中心点の座標は把持の際の手先位置の候補となる．

(2) 詳細な把持位置・姿勢の決定

把持軸は，与えられた始点と終点の座標値を持つ．また，物体モデルの各面には面法線ベクトルの事前知識もある．この把持軸ベクトル及び面法線ベクトルの姿勢と，手先座標系の各座標ベクトルとの相関関係を定義することで，手先の把持姿勢を決定できる．これも把持軸に教示している事前知識の一部である．図 5.6.4 に詳細を示す．



(a) 把持軸と手先の X_E 軸の一致 (b) 面法線ベクトルと手先の Z_E 軸の一致

図 5.6.4 手先姿勢の決定 (角柱モデル)

図 5.6.4 の手先姿勢を決定する流れを以下に示す.

(i) 把持軸の始点を (x_1, y_1, z_1) , 終点を (x_2, y_2, z_2) として, 把持軸ベクトル \mathbf{A} を次式で表わす.

$$\mathbf{A} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$$

(ii) ベクトル \mathbf{A} の単位ベクトル \mathbf{A}' を手先のベクトル \mathbf{X}_E とする.

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{A}'$$

(iii) 単位面法線ベクトル \mathbf{B} の逆向きを手先のベクトル \mathbf{Z}_E とする.

$$\mathbf{Z}_E = -\mathbf{B}$$

(iv) 外積により手先のベクトル \mathbf{Y}_E をもとめる.

$$\mathbf{Y}_E = \mathbf{Z}_E \times \mathbf{X}_E$$

以上より手先の姿勢が決定され, ロボットアームの原点座標系を基準とする手先の目標姿勢までの回転行列が式(5.6.3)の様に得られる. 決定された手先の把持位置・姿勢を図 5.6.5 に示す.

$$(\mathbf{X}_E \quad \mathbf{Y}_E \quad \mathbf{Z}_E) = \begin{pmatrix} X_{Ex} & Y_{Ex} & Z_{Ex} \\ X_{Ey} & Y_{Ey} & Z_{Ey} \\ X_{Ez} & Y_{Ez} & Z_{Ez} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad (5.6.3)$$

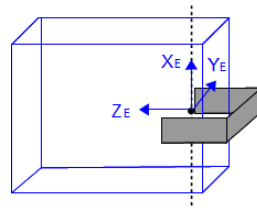


図 5.6.5 手先の把持位置・姿勢 (角柱モデル)

[円柱のケース]

(1) 把持箇所の決定

図 5.6.6 に示す様に，円柱の把持軸は中心軸に設定する．

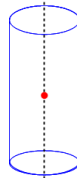
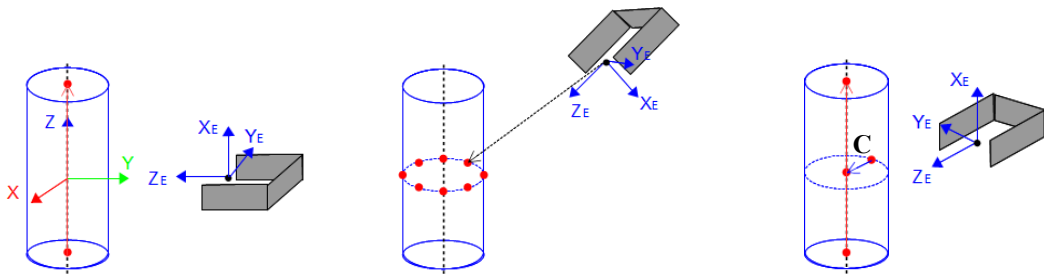


図 5.6.6 把持軸（円柱モデル）

(2) 詳細な把持位置・姿勢の決定

円は面法線ベクトルの方向が周上に分布しており，把持の方向に任意性がある．そこで，重心を原点とする円周上に均等に配列した点列を準備し，手先の初期位置から最も近い点を始点とする求心ベクトルを生成することで，適当な方向を決定する．図 5.6.7 に詳細を示す．



(a) 把持軸と手先 X_E 軸の一致 (b) 最近傍円周点の探索 (c) 求心ベクトルと手先 Z_E 軸の一致

図 5.6.7 手先姿勢の決定（円柱モデル）

図 5.6.7 の手先姿勢を決定する流れを以下に示す．

(i) 把持軸ベクトル \mathbf{A} の単位ベクトル \mathbf{A}' を手先のベクトル \mathbf{X}_E とする

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{A}'$$

(ii) 手先の座標系原点に最も近い円周点を探査する．

(iii) 円周点からモデル原点までの単位求心ベクトル \mathbf{C} を手先のベクトル \mathbf{Z}_E とする．

$$\mathbf{Z}_E = \mathbf{C}$$

(iv) 外積により手先のベクトル \mathbf{Y}_E をもとめる.

$$\mathbf{Y}_E = \mathbf{Z}_E \times \mathbf{X}_E$$

図 5.6.8 に最終的に決定された手先の把持位置・姿勢を示す.

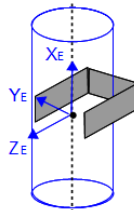


図 5.6.8 手先の把持位置・姿勢（円柱モデル）

[円柱パイプのケース]

(1) 把持箇所決定

円柱パイプは円柱同様の把持パターンと、空洞にハンドを差し込むことで、一端の縁を把持するパターンが考えられる。よって把持軸は、中心軸と両端の円状把持軸を設定した下図のようなものとする。

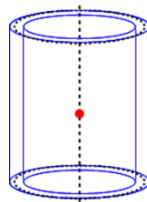
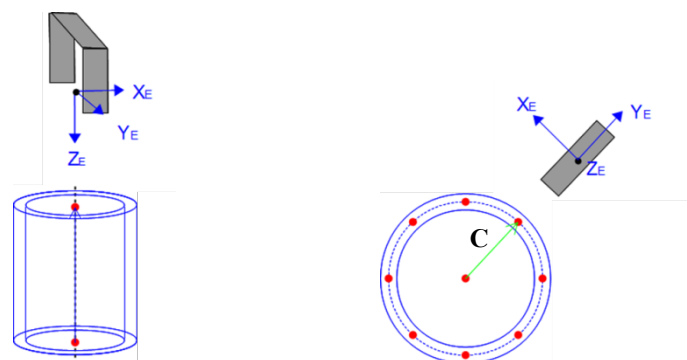


図 5.6.9 把持軸（円柱パイプモデル）

縁を把持する場合、中心軸と円状の把持軸を併用する。方向の任意性については円柱同様、円上において手先の初期位置から最も近い点を把持点とし、求心ベクトルを生成することで方向を定義する。図 5.6.10 に詳細を示す。



(a) 中心軸と手先 Z_E 軸の一致 (b) 求心ベクトルと手先 Y_E 軸の一致

図 5.6.10 手先姿勢の決定 (円柱パイプモデル)

図 5.6.10 の手先姿勢を決定する流れを以下に示す.

(i) 把持軸ベクトル \mathbf{A} の単位ベクトル \mathbf{A}' を手先のベクトル \mathbf{Z}_E とする

$$\mathbf{Z}_E = \mathbf{A}'$$

(ii) 手先の座標系原点に最も近い円周点を探索する.

(iii) 円周点からモデル原点までの単位求心ベクトル \mathbf{C} を手先のベクトル \mathbf{Y}_E とする.

$$\mathbf{Y}_E = \mathbf{C}$$

(iv) 外積により手先のベクトル \mathbf{X}_E をもとめる.

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{Y}_E \times \mathbf{Z}_E$$

図 5.6.11 に最終的に決定された手先の把持位置・姿勢を示す.

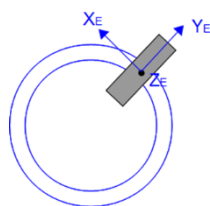


図 5.6.11 手先の位置・姿勢 (円柱パイプモデル)

5.6.3 ロボットアームの姿勢の導出

手先の把持位置姿勢候補が決定した後、続いてそれを再現するロボットアームの姿勢を導出する。使用するロボットアームは図 5.6.12 に示す 6 軸垂直型の関節機構を持つ 6DOF(自由度)マニピュレータである。6 つの各関節角度を指定することで動作が可能である。必要な関節変位量の導出は、順運動学の逆算となる逆運動学を用いる。ここでは逆運動学による各関節変位の算出と、把持動作までのフローについて示す。

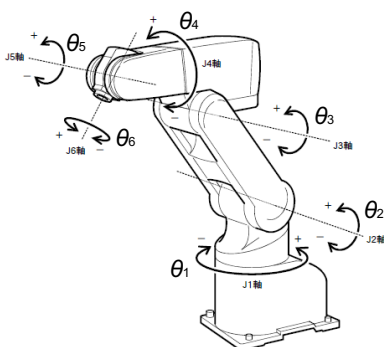


図 5.6.12 6 自由度ロボットマニピュレータ (三菱電機 RV-1A)

以下、逆運動学による関節変位 $\theta_1 \sim \theta_6$ の導出過程を示す。使用するアームに合わせてリンクパラメータとリンク座標系を以下(図 5.6.13)のように定義した。リンクパラメータはリンク長さ a_i を、リンクのねじれ角 α_i を、リンク間距離を d_i 、リンク間角度を θ_i とする。

(リンクパラメータ)

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0°	0	θ_1
2	0	-90°	0	θ_2
3	l_b	0°	0	θ_3
4	l_c	-90°	l_d	θ_4
5	0	90°	0	θ_5
6	0	-90°	0	θ_6

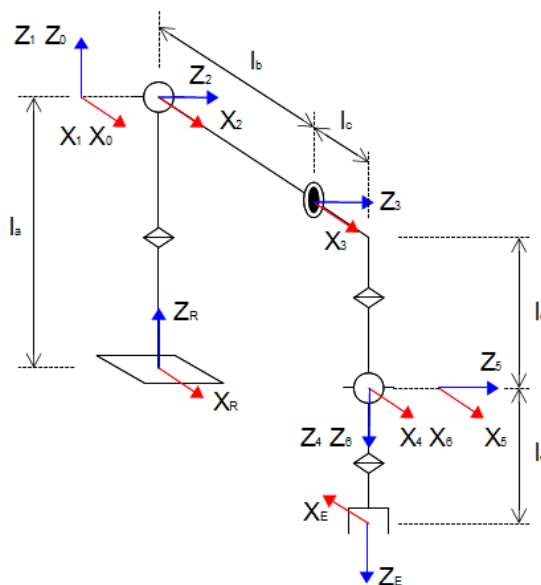


図 5.6.13 リンク座標系

リンク座標系 Σ_i を Σ_{i-1} から見た同次変換行列 ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$ は式(5.6.4)で表わされる.

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.6.4)$$

上式を用いて手先座標系 Σ_E をアームの原点座標系 Σ_R から見た同次変換行列 ${}^R\mathbf{T}_E$ は, 順運動学により式(5.6.5)となる. 回転行列 \mathbf{R}_{ij} はロール・ピッチ・ヨー角の回転行列に対応している.

$${}^R\mathbf{T}_E = {}^R\mathbf{T}_0 {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_4 {}^4\mathbf{T}_5 {}^5\mathbf{T}_6 {}^6\mathbf{T}_E = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x_E \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y_E \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.6.7)$$

上式を基に手先位置姿勢がそれぞれ (x_E, y_E, z_E) 及び回転行列 \mathbf{R}_{ij} で与えられたとき, 各関節角 $\theta_1 \sim \theta_6$ を逆算する計算過程を簡略化して以下に記す. 計算を容易にするため, ${}^R\mathbf{T}_E$ を分解して $\theta_1 \sim \theta_3$ と $\theta_4 \sim \theta_6$ を別途に求める.

$${}^0\mathbf{T}_6 = ({}^R\mathbf{T}_0)^{-1} {}^R\mathbf{T}_E ({}^6\mathbf{T}_E)^{-1} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & p_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & p_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.6.8)$$

$${}^0\mathbf{r}_6 = {}^0\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{r}_6 \quad (5.6.9)$$

$${}^3\mathbf{T}_6 = ({}^0\mathbf{T}_3)^{-1} {}^0\mathbf{T}_6 = \begin{pmatrix} \dot{R}_{11} & \dot{R}_{12} & \dot{R}_{13} & \dot{p}_x \\ \dot{R}_{21} & \dot{R}_{22} & \dot{R}_{23} & \dot{p}_y \\ \dot{R}_{31} & \dot{R}_{32} & \dot{R}_{33} & \dot{p}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.6.10)$$

Σ_0 から見た Σ_6 の原点位置を ${}^0\mathbf{r}_6 = (p_x, p_y, p_z)$, リンクパラメータより Σ_3 から見た Σ_6 の原点位置を ${}^3\mathbf{r}_6 = (l_c, l_d, 0)$ とすると, 式(5.6.9)を解いて $\theta_1 \sim \theta_3$ は以下のようになる.

$$\theta_1 = \text{atan2}(-p_x, p_y) \pm 90^\circ \quad (5.6.11)$$

$$\theta_2 = \text{atan2} \left[-(\sin\theta_3 l_c + \cos\theta_3 l_d) (\cos\theta_1 p_x + \sin\theta_1 p_y) - (\cos\theta_3 l_c + \sin\theta_3 l_d + l_b) p_x \right. \\ \left. , (\cos\theta_3 l_c + \sin\theta_3 l_d + l_b) (\cos\theta_1 p_x + \sin\theta_1 p_y) - (\cos\theta_3 l_c + \sin\theta_3 l_d + l_d) p_x \right] \quad (5.6.12)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(-l_d, l_c) \pm \text{atan2}(\sqrt{l_b^2(l_d^2 + l_c^2)} - K_a, K_a) \quad (5.6.13)$$

ただし, 以下を前提条件とする.

$$\text{atan2}(a, b) = \arg(b + ja) \\ K_a = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_b^2 - l_c^2 - l_d^2) / 2$$

また, 式(5.6.10)を解いて $\theta_4 \sim \theta_6$ は以下のようになる.

$$\theta_4 = \text{atan2}(\pm \dot{R}_{33}, m\dot{R}_{13}) \quad (5.6.14)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(\pm \sqrt{\dot{R}_{13}^2 + \dot{R}_{33}^2}, \dot{R}_{23}) \quad (5.6.15)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(\pm \dot{R}_{22}, m\dot{R}_{21}) \quad (5.6.16)$$

以上でアームの各関節変位 $\theta_1 \sim \theta_6$ が導出できる. ただし, 一つの手先位置姿勢を表現する関節解は複数あり, 使用する6自由度マニピュレータの場合, θ_1 と θ_3 で各2通り, $\theta_4 \sim \theta_6$ の組み合わせも2通り存在するため, 計8通りの解が得られる. アームの関節には動作範囲があるので, それに含まれる解は絞られるが, それでも複数の解が存在する場合には, 動作コストを考慮することで関節変位

の値を絞り込む。

動作コストは式(5.6.17)の様に，アームの初期姿勢からの各関節角の変位の総和 θ_s で評価する。

$$\theta_s = \sum_{i=1}^6 |\Delta\theta_i| \quad (5.6.17)$$

ただし，目標とする把持姿勢は図 5.6.14 に示すように，対象物からある程度距離を置いた待機姿勢を介して与える．実際には把持姿勢と待機姿勢の両方の解を逆運動学により求め，待機姿勢までの動作コストを評価する。

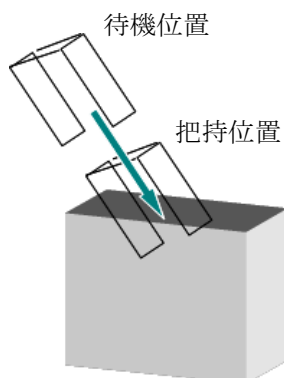


図 5.6.14 待機位置と把持位置の関係

5.6.4 ロボットの動作範囲内における把持位置・姿勢の探索

把持軸を利用した手先の把持位置姿勢候補の決定について 5.6.2 では，把持軸の中心を掴む最も理想的な状態を示したが，5.6.3 の逆運動学計算によって全ての解が動作範囲外となる場合がある．その場合には，同一の軸上でも位置姿勢を変化させることで実現可能な解を発見できる可能性がある．安定性の観点から軸の中心で把持する状態は初期候補とし，動作範囲外であれば軸上で新たな手先候補を探索することを考える．そこで，再び手先の 3 軸座標ベクトルを利用して，把持軸上における新たな手先位置姿勢の探索方法を示す。

[角柱のケース]

角柱は，図 5.6.15 に示した探索方針が考えられる．軸上で手先の位置を変化させることで，よりアームに近い位置で把持可能な手先位置を見つけ出す軸上(手先座標系 X_E 方向)位置探索と，手先の Y_E 軸回りに姿勢変換を行うことで無理のないアーム姿勢を探る手先座標系 Y_E 軸回り姿勢探索である．

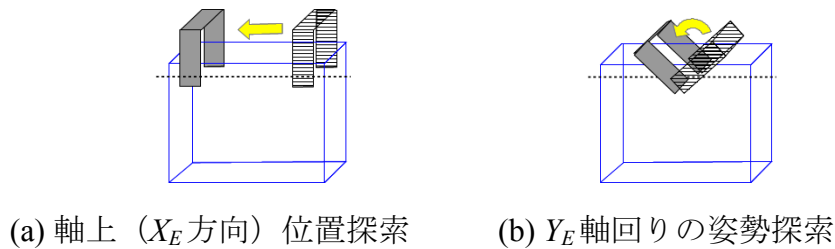


図 5.6.15 手先位置・姿勢の探索（角柱モデル）

それぞれを組み合わせることでより高い探索能力を発揮する．その探索範囲を比較した例を以下に示す．図 5.6.16 は角柱がアーム原点からの距離の違いによって探索方法を組み合わせることで把持可能な角柱の位置を広げることが可能であることを示す．図 5.6.15(a)は軸中心位置がアームの可動範囲内に存在するため，探索なしで把持位置を決定することができ，(b)は角柱の位置がアーム原点からやや離れ，可動範囲内に軸中心位置が存在しないため，軸上位置探索をすることで把持位置を決定できている様子である．(c)はさらに角柱の位置が離れ，姿勢変更による探索も加えることで把持位置を決定できている様子である．

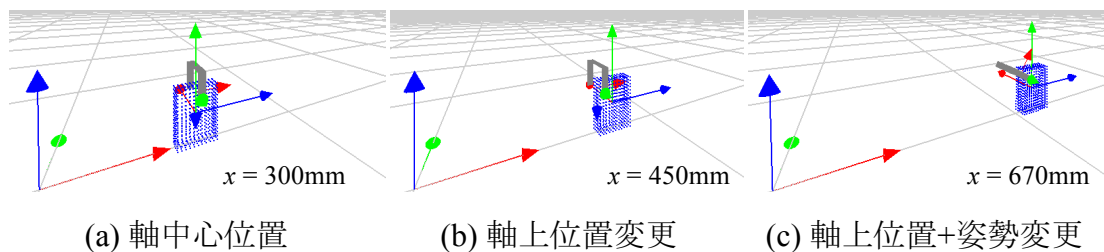


図 5.6.16 角柱の把持位置探索（アーム原点からの距離別）

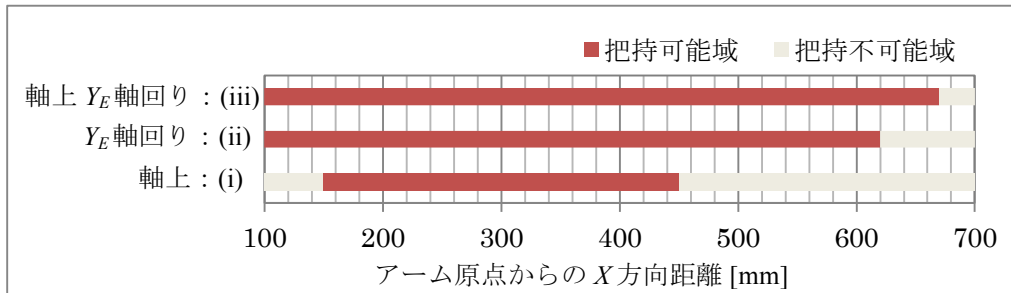


図 5.6.17 角柱 (寸法 : 50×100×150[mm]) での把持可能位置の検証

図 5.6.17 のグラフはある姿勢の角柱の位置をアーム座標系の X 軸上で 100~700[mm]まで変化させたときの把持可能範囲を探索方法別に検証した結果である。図 5.6.16 より、把持軸上で位置と姿勢の変更を共に行い、手先の状態を満遍なく探索可能な(iii)(軸上位置+ Y_E 軸回り姿勢)の方法が、最も広い範囲の把持をカバーできることが分かる。

[円柱のケース]

図 5.6.18 に示す様に、円柱も軸上(手先座標系 X_E 方向)位置探索と手先座標系 Y_E 軸回り姿勢探索があり、更に回転対称の形状より、手先座標系 X_E 軸回り姿勢探索も可能である。また、図 5.6.18(d)および(e)の様に、円柱の状態によっては端面での Z_E 軸回り、 Y_E 軸回りの姿勢探索を行うことで円柱の端を把持する姿勢も探索可能である。図 5.6.19 に探索方法の組み合わせにより、広い範囲で把持位置の探索が可能であることを示す。

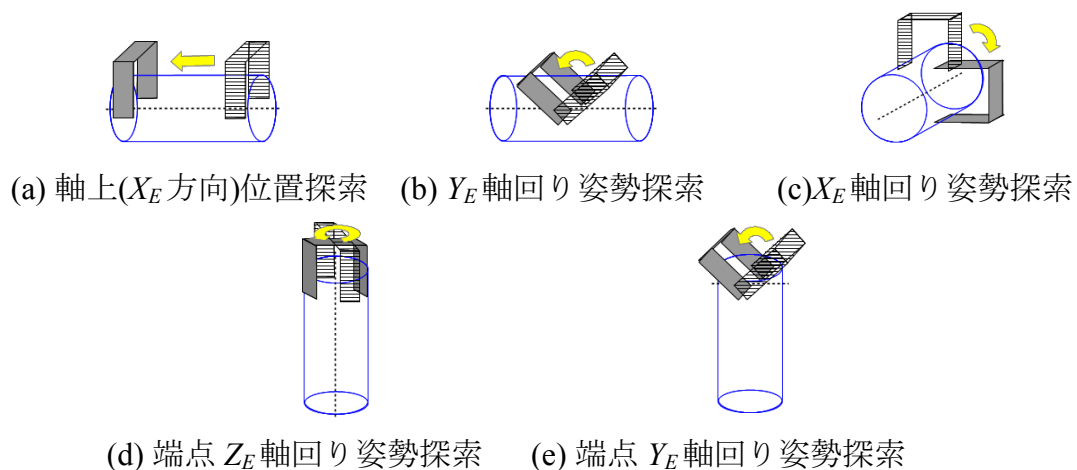
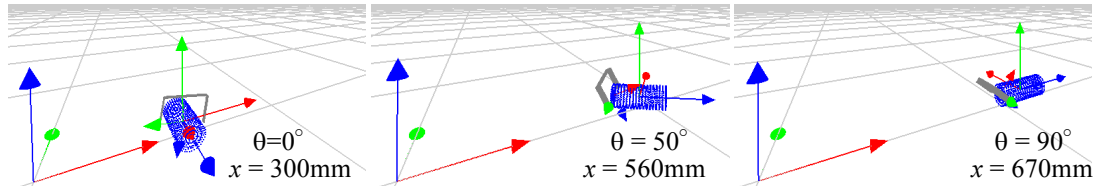
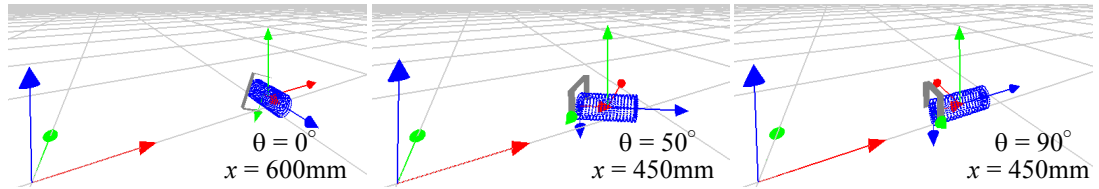


図 5.6.18 手先位置・姿勢の探索 (円柱モデル)

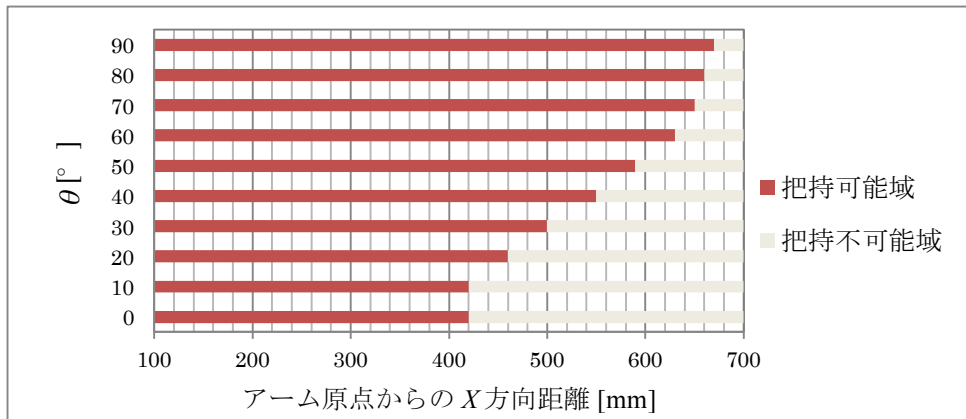


(a) 軸上位置+ Y_E 軸回り姿勢探索

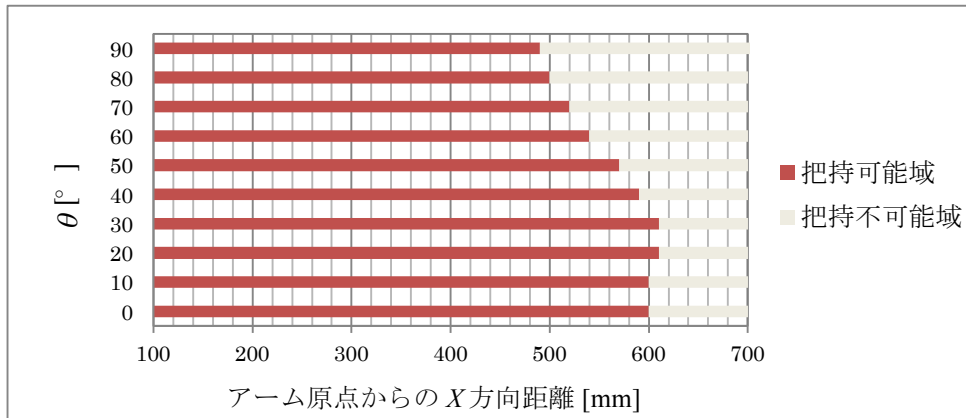


(b) 軸上位置+ X_E 軸回り姿勢探索

図 5.6.19 円柱の把持位置探索



(a) 軸上位置+ Y_E 軸回り姿勢探索



(b) 軸上位置+ X_E 軸回り姿勢探索

図 5.6.20 円柱（寸法：70×170[mm]）での把持可能位置の検証

図 5.6.20 にアーム原点からの距離 ($X=100\sim 700[\text{mm}]$) と円筒の姿勢 ($\theta=0\sim 90^\circ$) の違いによる把持可能領域の変化を探索方法の組み合わせ別で示す。図 5.6.19 から円筒の姿勢によってカバーできる把持可能領域に得手不得手があることがわかる。このことから探索方法を組み合わせることで探索可能な把持可能領域が広がると思われる。

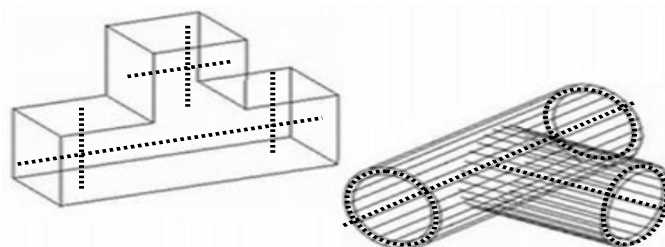
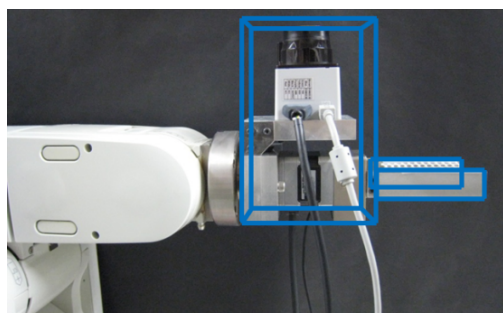


図 5.6.21 複雑形状への把持軸の設定例

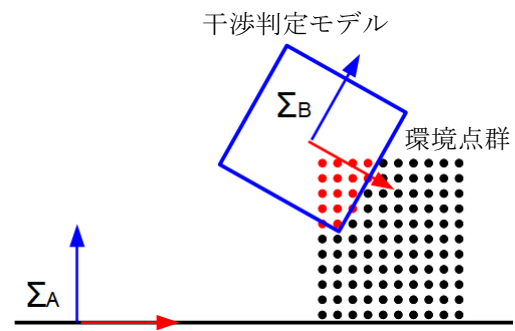
本項では物体形状の基本となる角柱モデルと円柱モデルのみを対象に検討したが、その他の形状モデルについても、図 5.6.21 に示す様な把持軸に基づく探索要領の事前知識を定義することで、共通のハンドリング計画に対応可能と考えている。

5.6.5 干渉評価

ロボットの動作を計画する場合、常に干渉問題を考慮に入れる必要がある。ロボット-環境、ロボット-対象物と言った組み合わせで干渉問題を解決することになる。本研究のハンドリング計画では、手前もしくは上部の物体から取り進めることを戦略としているため、干渉が発生する可能性は比較的抑えられていると言える。しかし状況次第では、アームを環境に対してアプローチさせる時や、ハンドで物体を掴むに際して、干渉の危険性が十分に考えられる。そこでロボットアームに対して図 5.6.22 に示す様な干渉判定モデルを設定し、環境点群との干渉評価を行う。



(a) アームの干渉判定モデル

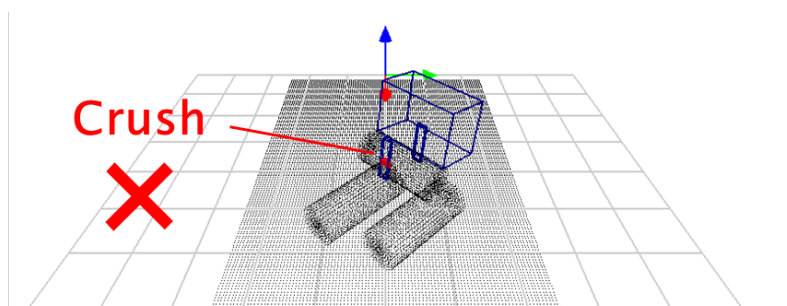


(b) 環境点群との干渉評価

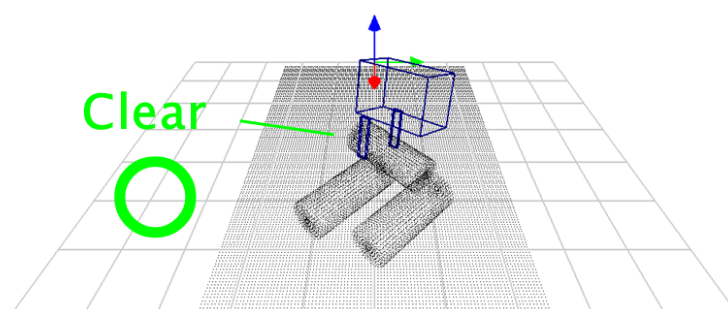
図 5.6.22 干渉判定モデルを用いた干渉評価

図 5.6.22(b)に示す様に、干渉判定モデルの領域に環境点群が一定量以上侵入した時、干渉が有るものと判断する。今回、手先以外のアームリンクについては、環境との衝突の可能性は無いと見て考慮していないが、必要に応じてアームに干渉モデルを設定すれば良い。

図 5.6.23 に実際の干渉判定の模式図を示した。このような密集環境においては、手先の差し込み位置を選ぶ必要性が出て来る。図 5.6.23 (a)は把持対象物の下に存在する物体との干渉が生じている結果であり、(b)はその干渉を解決した結果である。図 5.6.23 (a)の様な干渉が有る場合には、手先位置姿勢の候補の探索を継続させることで、(b)のように干渉の無い選択肢を発見することが可能である。



(a) 干涉有り



(b) 干涉無し

図 5.6.23 把持における干涉問題の回避

図 5.6.24 に示す様に、アームのアプローチ軌道上においても同様に干涉判定を行っている。図 5.6.24(a)はアプローチ軌道上に把持対象物以外の対象物が存在し、アプローチ軌道と干涉している例であり、(b)は中継点を経由することで他の物体と干涉せずに把持対象物へのアプローチが成功している例である。図 5.6.24(b)の様、本研究ではアプローチ軌道の干涉問題の回避には、事前に設定しておいた中継点を用いる。中継点を経由する軌道を検討することにより、比較的簡単にアプローチ軌道における干涉問題を可能となる。

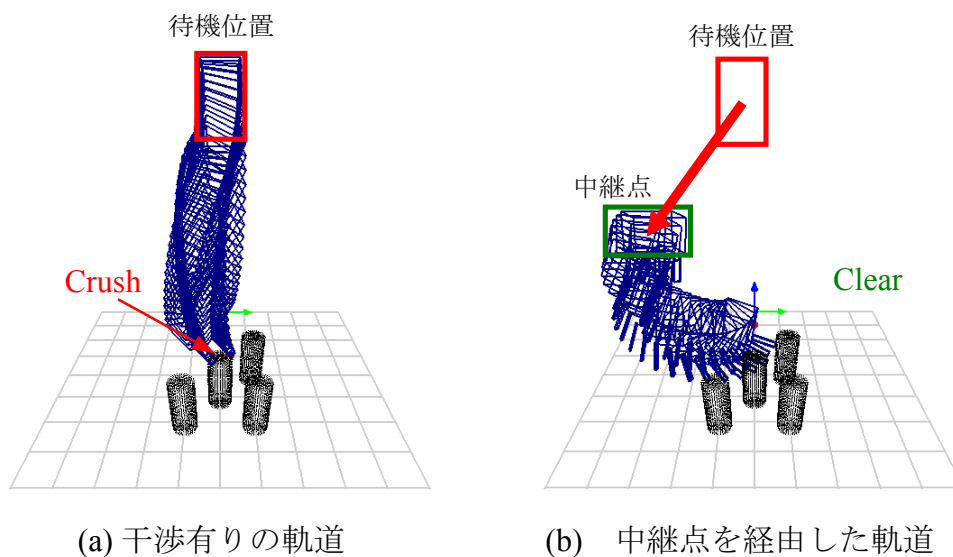


図 5.6.24 中継点を経由した干渉問題の回避

5.6.6 プレーシング計画

対象物をハンドリングした後は、その対象物を指事された場所へプレーシングする必要がある。基本的にプレーシングする際の物体の位置・姿勢は事前情報として与えておくものとする。このときに注意すべき点は以下のものになる。

1. **プレース底面の選び方**：対称性のある形状で、底面を選ぶ際に任意性がある物体の場合、どの面を下にした方が置きやすいか。
2. **無理のない手先姿勢**：円柱のように回転対称の物体の場合、手先の姿勢には冗長性があり、無理のない姿勢を選ぶ必要がある。
3. **持ち換えの必要性**：プレース姿勢が限られた物体の場合、必ずしも目的のプレース姿勢を実現できるとは限らないため、一度物体を持ち換える必要がある。

まず、プレース底面の選び方の問題への対応は、図 5.6.25(a)に示す様に、初期の手先位置から見て遠い側の面を底面とする方針に従う。把持計画により導出された手先姿勢は、近い側の面に傾くことが常であり、必ず遠い側の面の方が底面として適切であることが理由である。

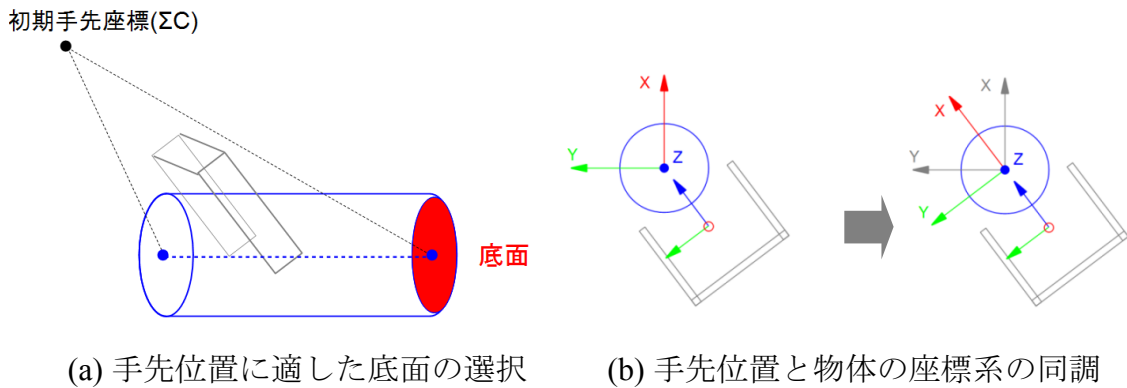
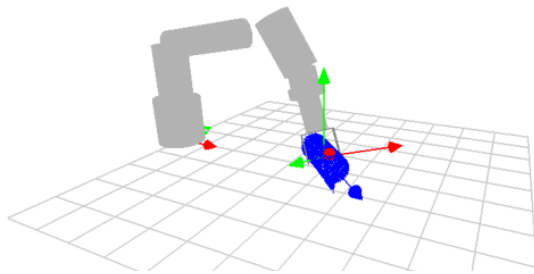


図 5.6.25 プレーシング計画の事前知識

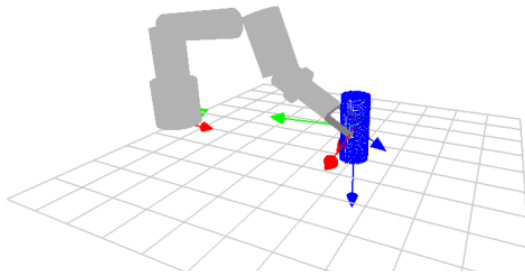
続く無理のない手先姿勢の問題への対応は、図 5.6.25(b)に示す様に回転対称形状の物体の場合には、物体の座標系と手先の座標系を、特定の状態に調整することとしている。(図 5.6.25(b)の場合、物体の X 軸と手先の正面方向を一致させている) このように調整することで、物体のあるべき姿勢と、手先の無理のない姿勢を議論しやすくなる。つまり、プレースした時の物体の Z 軸方向を Z_p 、 X 軸方向を X_p としたとき、 Z_p は必ず上向きであり、 X_p は必ずアームの手先が向いている方向(水平)であるべきと設定するとき、把持した際の手先が向く方向と物体の座標系の関係性はケースによって異なるため、物体座標系の再定義が必要となる。円柱の場合、プレース底面の選択によって Z 軸の方向が再定義でき、プレースしたときに手先が正面方向を向くように、手先の Z 軸の把持軸に垂直な成分が物体の X 軸の方向となるように再定義している。再定義された物体の Z 、 X 軸がプレース姿勢になるように計画を立てれば良いということになる。

持ち代えの必要性の問題への対応については、複雑な場合分けを要することが想定される。持ち換えるためには、一時的なプレース姿勢をどのようにして、どのように持ち直すのかを考える必要がある。目的を達成するための事前知識を与えるという意味においては共通しているが、作業が複雑化する程、事前知識も複雑性を要求されるため、状況に適した提案が重要である。

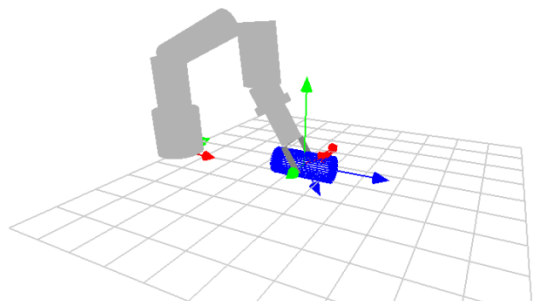
以上の点を考慮し、図 5.6.26(a)のように把持した物体に対して(b), (c)のようなプレース指示を与えることが可能となる。



(a) ハンドリング終了時



(b) プレーシング計画例 1 (縦置き)



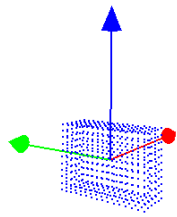
(c) プレーシング計画例 2 (横置き)

図 5.6.26 プレーシング計画と適用例

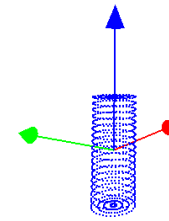
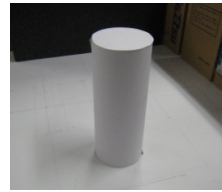
5.7 検証実験

5.7.1 事前情報

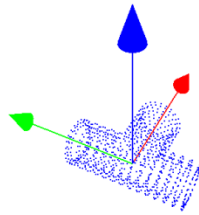
種々の環境に対してのシステム全体の通し実験を行なった。3次元環境計測、物体認識、ハンドリング計画、各段階における性能の確認と評価を実施する。検証を通して使用する物体の情報を図 5.7.1 に示す。



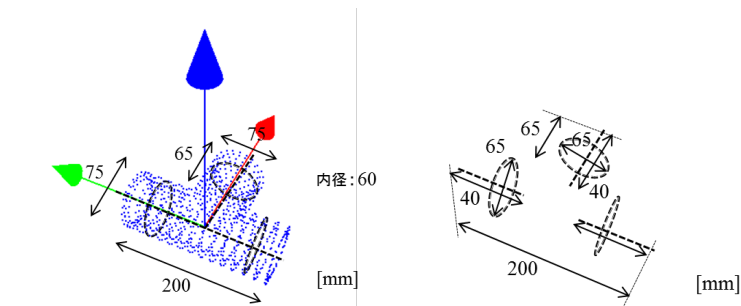
(a)角柱（寸法：50×100×150mm）



(b)円柱（寸法：φ70×170mm）



(c) T 字パイプ（寸法：φ75×140×200mm）



(d) T 字パイプ：把持軸・把持円

図 5.7.1 検証に用いる対象物の事前情報

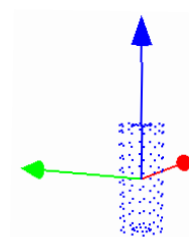
5.7.2 対象物が単体である場合

まずは最も単純な対象物が単体で存在する環境に対する検証実験を行う。図 5.7.2 に実験環境と対象物のモデルを示す。この環境に対してアーム手首に設置された LRF を用いて計測した結果を図 5.7.3 に示す。図 5.7.3 の点群情報は対象

物を前面・上面・左側面・右側面の 4 方面から測定した結果を統合し，不要な床面点群を取り除いたものである。



(a) 実験環境



(b) 対象物のモデル

図 5.7.2 実験環境と対象物のモデル

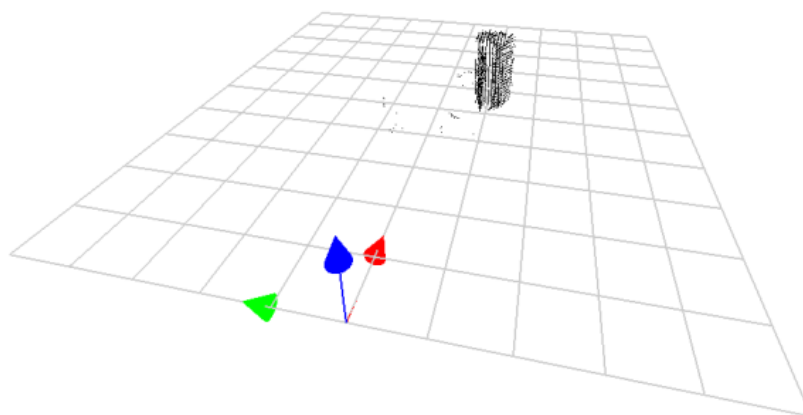


図 5.7.3 計測結果によりえられた点群情報

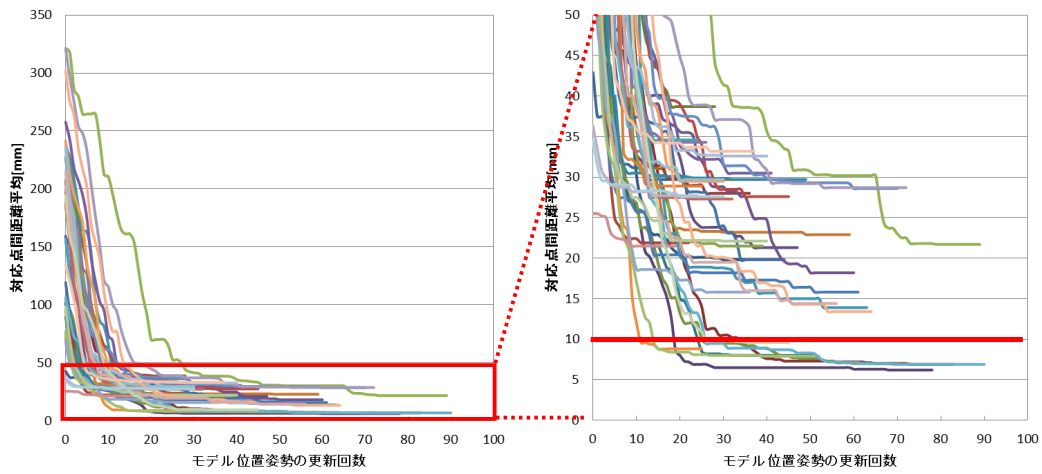


図 5.7.4 評価値 e の推移

図 5.7.4 に 43 回行ったマッチング処理中の評価値 e の推移のグラフを示す。マッチング処理においてモデルに与えられる初期位置・姿勢はランダムであるため、収束するまでのモデル位置姿勢の更新回数は毎回異なり、概ね 50~100 回程度の更新後に評価値 e は収束している。評価値 e の閾値は計測で用いている LRF の測距精度と同等の 10mm として設定しており、この閾値前後の収束結果の様子を図 5.7.5 に示す。

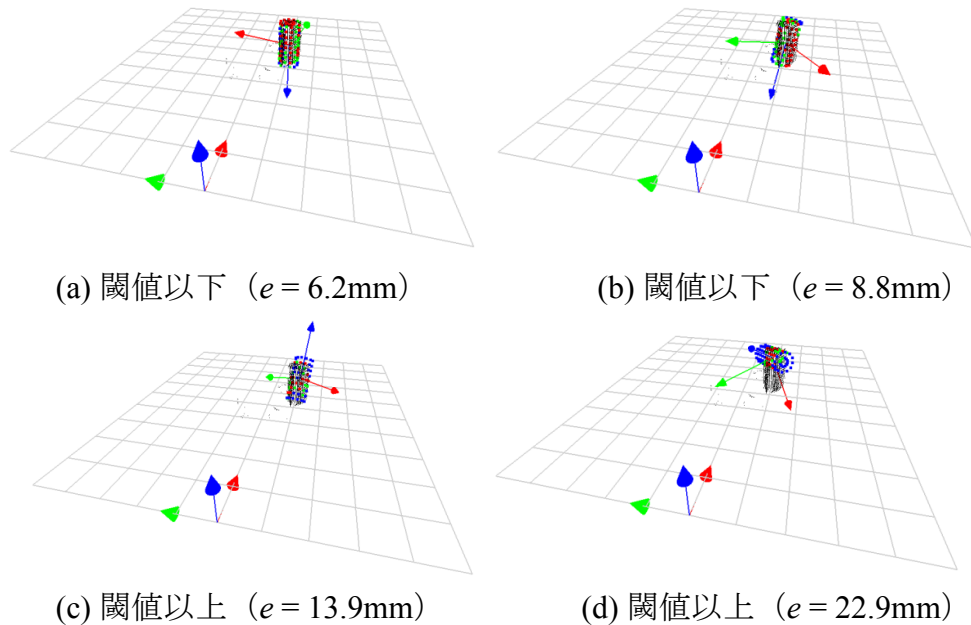


図 5.7.5 閾値付近のマッチング結果

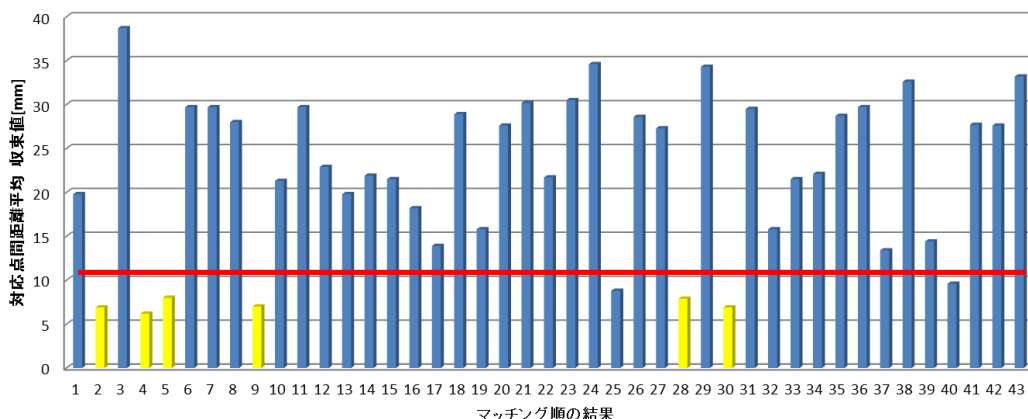


図 5.7.6 収束値の比較

図 5.7.5 から、評価値 e が大きくなるほど得られた収束結果はローカルミニマムによるものであることが分かる。図 5.7.6 に示すのは、行ったマッチングの順序通りに評価値 e の収束値を並べた棒グラフである。選別では、評価値の優れた上位5つ(最大数)の結果から、対応点間距離がより小さいものをより良いと判断し、物体別(複数の物体がある場合)に結果を選出する。グラフの色の違いは、収束値の小さくマッチングが良好なものとそうでないミスマッチなものとの違いを表す。

グラフから分かるマッチングの成功回数により ICP アルゴリズムの純粋な成功率を、閾値を下回った回数から分かる閾値判定を加えたマッチングシステムの実質的な成功率を表したものを表 5.7.1 に示す。

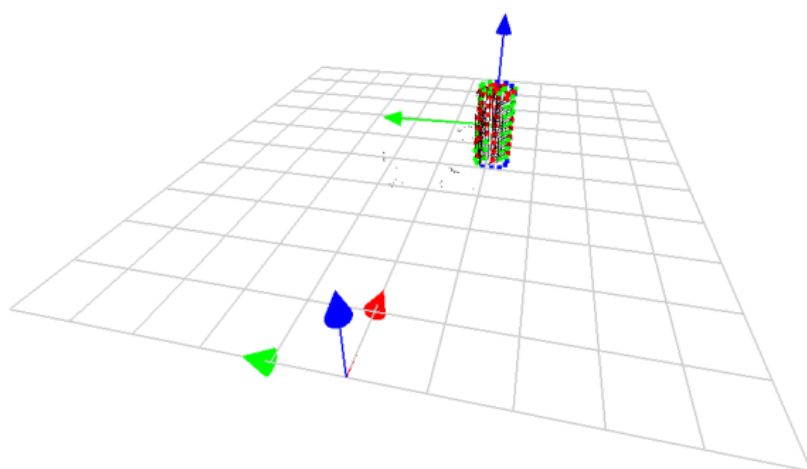
表 5.7.1 マッチングの成功確率

良好な確率	14% (6/43)	閾値10mmを下回る確率	16% (7/43)
ミスマッチな確率	86% (37/43)	マッチングの成功確率	86% (6/7)

ICP アルゴリズムによるマッチングが良好である本質的な確率は、14%程度と決して高くはないが、閾値の下回った結果内で見ると7回中6回の確率で適正なマッチング結果が得られることを示している。実際には、より良い結果の選別を更に介すことで、少なくとも単体が対象の環境においては、表 5.7.1 中の 86% 以上の確率で目的を達成できる。しかし、閾値以下でもマッチングが不完全な

ものが含まれる可能性があることも分かるため、位置姿勢の異なる複数の物体を認識しなければならない複雑な状況の場合、より良いマッチング結果のパターンを物体別に複数個判断しなければならないならず、その実質的なマッチングの成功確率は下がることが予想できる。

上記のマッチング結果より最終的に選択された結果を図 5.7.7 に示す。認識された物体位置は 3 軸の平均として 5mm 程度の誤差が見られ、姿勢誤差は数度程度となったが、使用している LRF の精度 (10mm) から考えても十分な結果が得られていると考えられる。



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
実測値	550	-100	70	0	0	0
認識値	553	-105	74	3	1	278

図 5.7.7 最終的に選択された認識結果 ($e = 6.9\text{mm}$)

図 5.7.7 の認識結果に対して、前項で述べた円柱モデルに対応するハンドリング計画を行い、導出された把持計画の結果を図 5.7.8 に示す。アームの可動範囲内で実現可能な把持姿勢、及び環境との干渉が無いアプローチ軌道を探求することで適当な計画図を求めることができている。円柱モデルには、その中心軸に把持軸の事前知識が割り当てられている。なるべく中央に近いポジションで無理なく把持可能な解を発見できるように、探索要領を教示した。干渉評価は、床面を既知の障害物として仮想的に定義した点列と、計測点群とを合わせた環境情報に対してアーム先端の衝突回避を考えた結果である。

得られたハンドリング計画を用いて実際にロボットアームにて動作を行った結果を図 5.7.9 に示す。現実の環境においても、ピッキング作業を完了することができた。把持に必要な物体の位置姿勢の認識精度が十分に得られていたと言える。

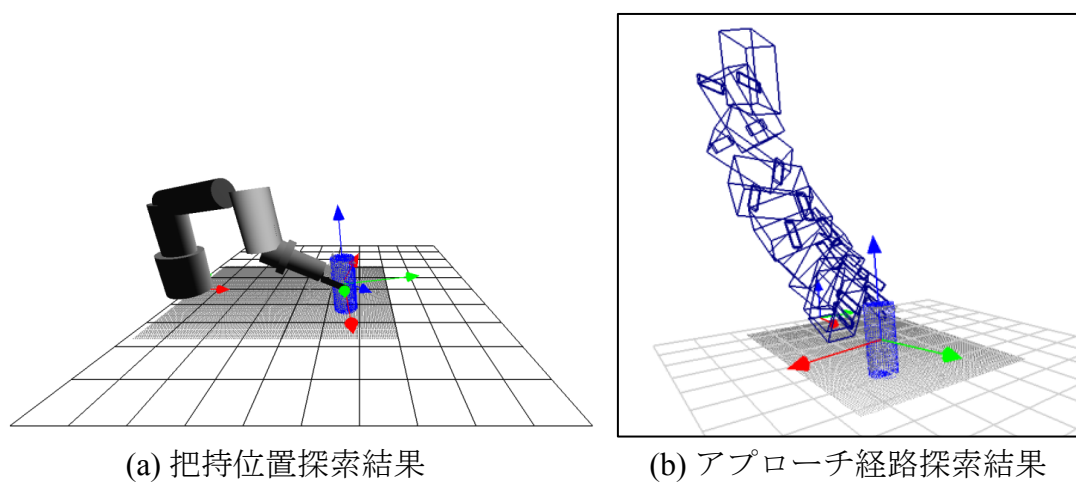


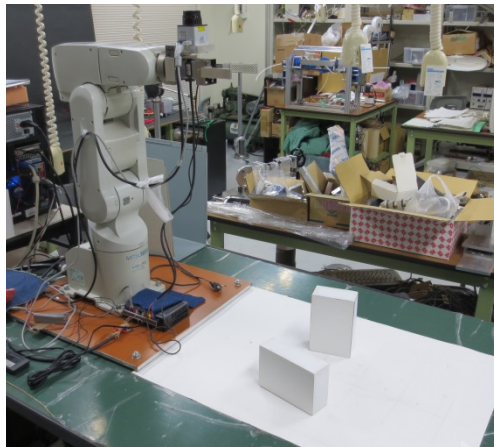
図 5.7.8 ハンドリング計画



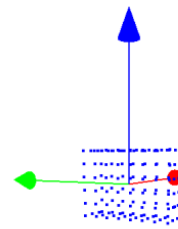
図 5.7.9 ハンドリング計画の実行結果

5.7.3 複数の対象物が独立している場合

図 5.7.10 に実験環境を示す。対象物は角柱 2 つが互いに接触することがない様に独立している環境を対象とする。この環境に対して LRF を用い計測した結果を図 5.7.11 に示す。図 5.7.11 の点群情報は対象物を前面・上面・左側面・右側面の 4 方面から測定した結果を統合したものである。



(a) 実験環境



(b) 対象物のモデル

図 5.7.10 実験環境と対象物のモデル

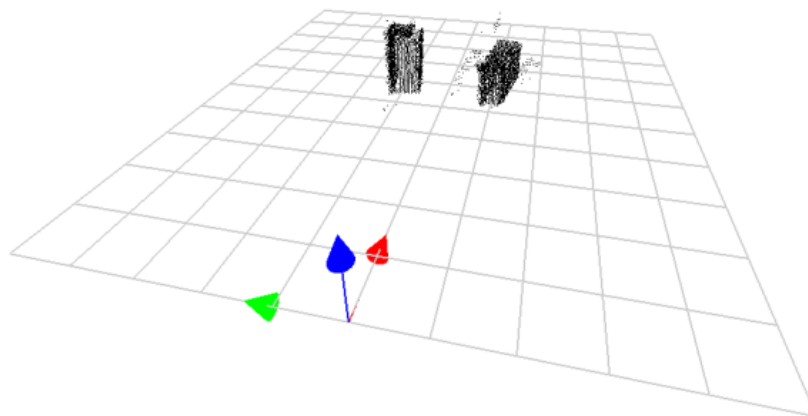


図 5.7.11 計測結果によりえられた点群情報

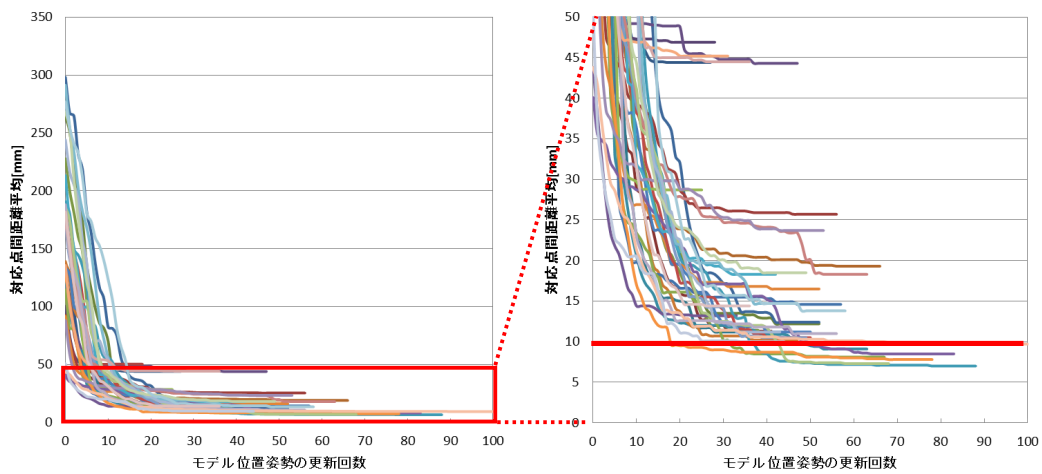


図 5.7.12 評価値 e の推移

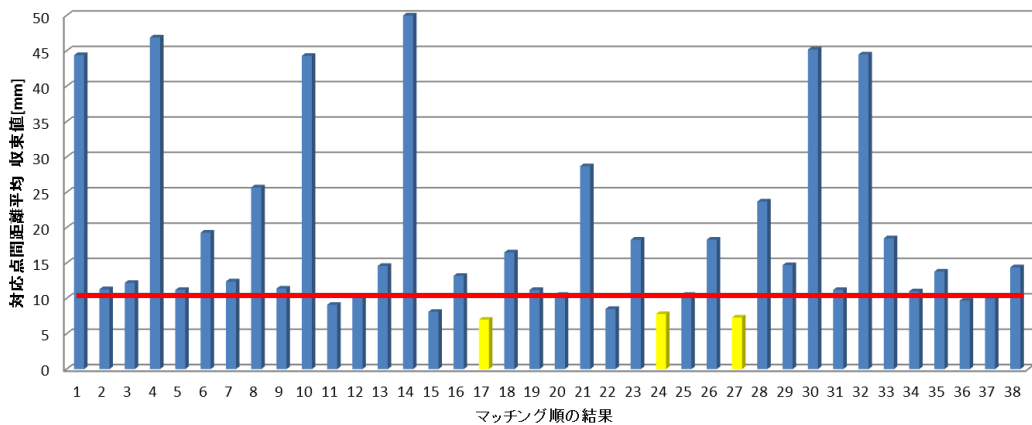


図 5.7.13 収束値の比較

図 5.7.12 は 38 回行ったマッチング処理における評価値 e 推移のグラフであり、図 5.7.13 は評価値 e の閾値を検証実験で使用している LRF の計測精度である 10mm に設定し、閾値を下回った収束結果の内、良好なマッチング結果を色分けした表したものである。複数の物体を認識する場合、上位 5 つのマッチング結果の中から、明らかにモデルの位置が異なる結果を区別することで、別個体の識別を行う。また、モデルの位置が似通う結果は同じものと判断することで同個体と見なすこととしている。最後に、物体別により良い評価値を持つ結果を選別して各認識結果としている。ただし、図 5.7.13 からわかる様に、今回は上位 5 つの中にミスマッチなケースが存在した。しかし収束位置が良好なものと似通っていたため、選出されることはなかった。このようにミスマッチな

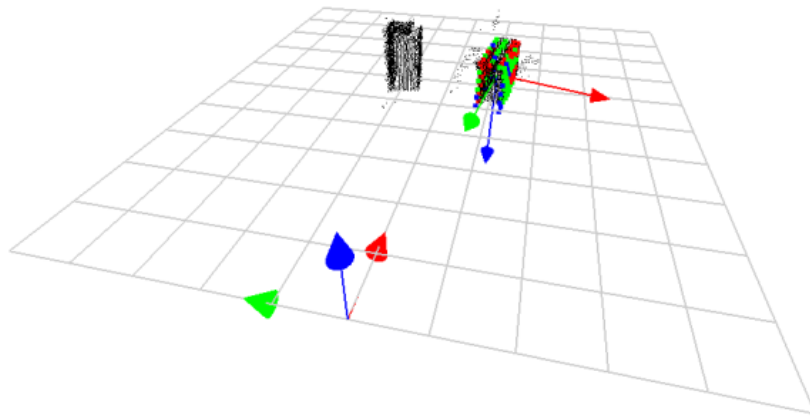
結果が選出される危険性は今後の課題である。

図 5.7.13 のグラフから分かるマッチングの成功回数により ICP アルゴリズムの純粋な成功率を、閾値を下回った回数から分かる閾値判定を加えたマッチングシステムの実質的な成功率を表したものを表 5.7.2 に示す。

表 5.7.2 マッチングの成功確率

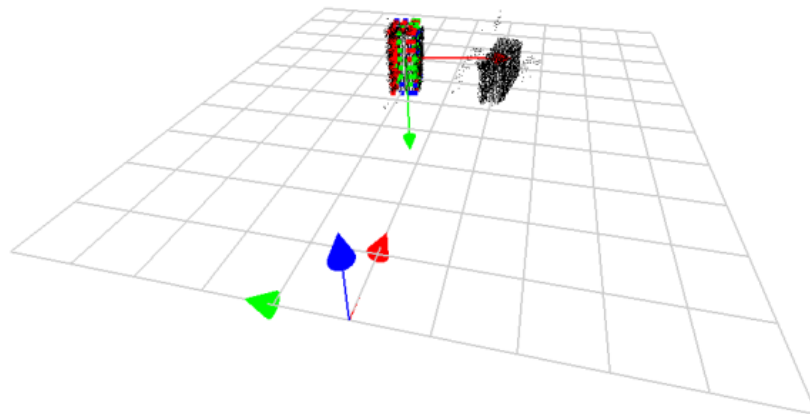
良好な確率	8% (3/38)	閾値10mmを下回る確率	18% (7/38)
ミスマッチな確率	92% (35/38)	マッチングの成功確率	43% (3/7)

角柱は、円柱に比べて良好なマッチングの確率が低かった。一方、閾値を下回る確率が高かったことで、マッチングの成功確率が低いことが分かる。マッチングの難しさは形状が要因と思われる。円柱のように自由度の高い回転対称な形状ではないため、姿勢の要求が厳しいと言え、モデルが収束する可能性そのものが低いと言える。閾値を下回り易かった理由は、LRF の誤差が角柱のエッジ部分などの形状を損なうために、不正確なマッチングが発生し易かったことが挙げられる。



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	575	-110	44	-182	4	-97

(a) 把持候補 1 ($e = 7.0\text{mm}$)



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	591	104	57	-96	-1	-81

(b) 把持候補 2 ($e = 7.3\text{mm}$)

図 5.7.14 認識結果

マッチング結果より最終的に選択された各対象物の認識結果を図 5.7.14 に、認識結果に対して前項で述べた角柱モデルに対応したハンドリング計画を行い、

導出された結果を図 5.7.15 に示す。把持対象物選別時の条件からロボットに近い場所にある対象物から優先して把持を行う計画となっている。図 5.7.15 のハンドリング計画を実際のロボットで実行した結果が図 5.7.16 である。アームの可動範囲内で実現可能な把持姿勢、及び環境との干渉が無いアプローチ軌道を探索することで適切な把持を行うことが可能となっている。

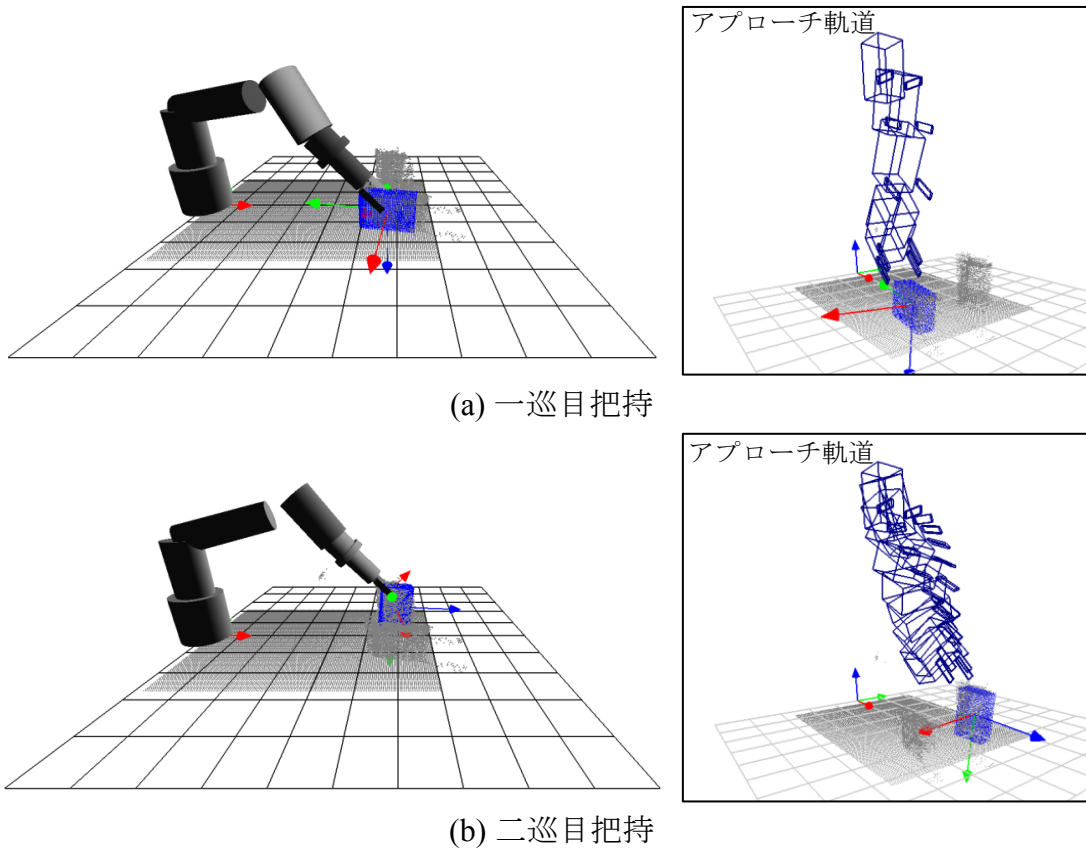


図 5.7.15 ハンドリング計画

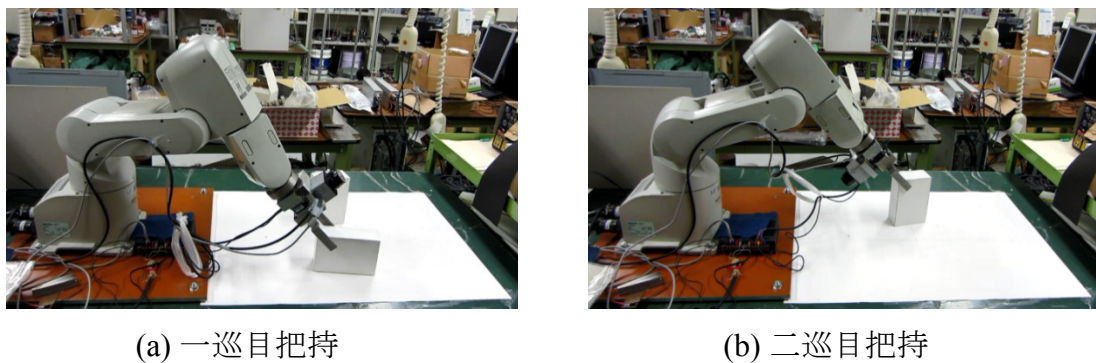
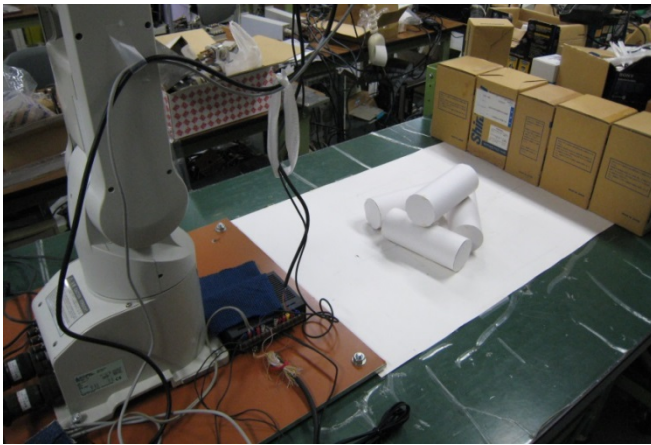


図 5.7.15 ハンドリング計画の実行結果

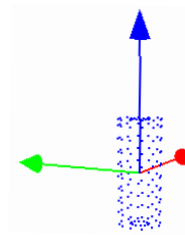
5.7.4 複数の対象物がバラ積みされている場合

複数の物体がバラ積みされている環境でのハンドリングは認識においても、干渉問題においても難易度が高い環境である。本検証実験では図 5.7.16 に示す様な物体が密集してバラ積み状態になっている環境を想定する。バラ積み環境においては、物体が密集していることが原因となって、モデルが点群に埋没してしまい、形状探索が独立環境に比べて難しいところがあることを前置きする。

この環境に対して LRF を用い計測した結果を図 5.7.17 に示す。図 5.7.17 の点群情報は対象物を前面・上面・左側面・右側面の 4 方面から測定した結果を統合したものである。



(a) 実験環境



(b) 対象物のモデル

図 5.7.16 実験環境と対象物のモデル

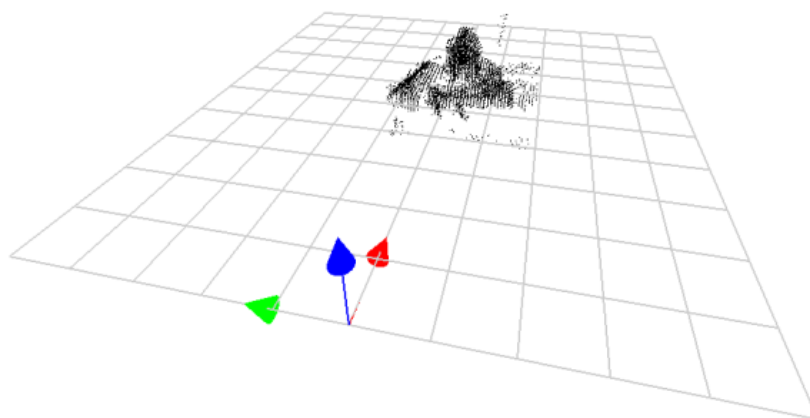


図 5.7.17 計測結果によりえられた点群情報

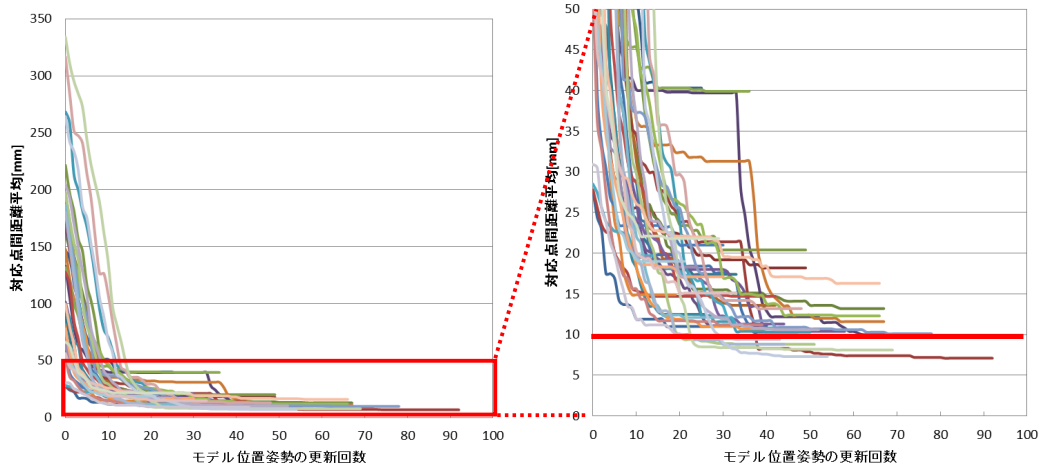


図 5.7.18 評価値 e の推移

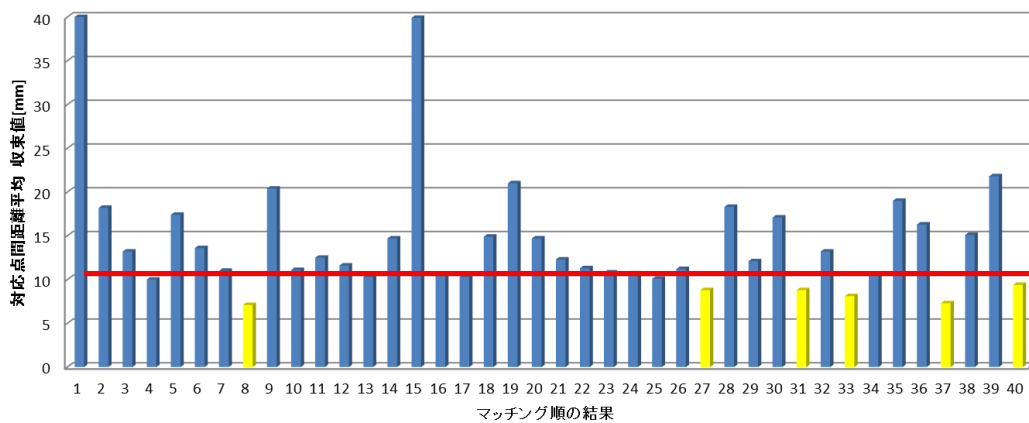
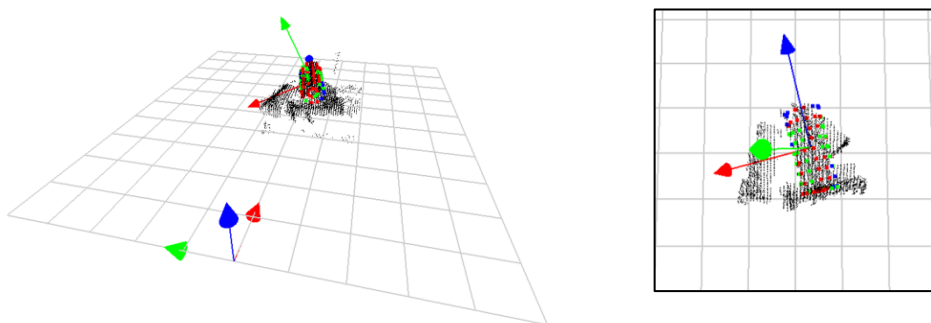


図 5.7.19 収束値の比較

図 5.7.18 は 40 回行ったマッチング処理における評価値 e 推移のグラフであり、図 5.7.19 は評価値 e の閾値を検証実験で使用している LRF の計測精度である 10mm に設定し、閾値を下回った収束結果を色分けした表したものである。図 5.7.19 からわかる様に、閾値以下の良好なマッチング結果が 6 回得られた。この時の認識の結果を図 5.7.20 に示す。閾値以下の結果の内 3 回は図 5.7.20(a) に示すようにバラ積みの上部に存在する把持候補 1 に収束し、残りの 3 回は下部の把持候補 2 に収束した。その他の個体に関しては、隠れている場合や形状が十分に見えないなどの要因で閾値を下回る程のマッチングには至っていない。以上の 2 種類のマッチングパターンから、上部の個体を優先して把持の順序立

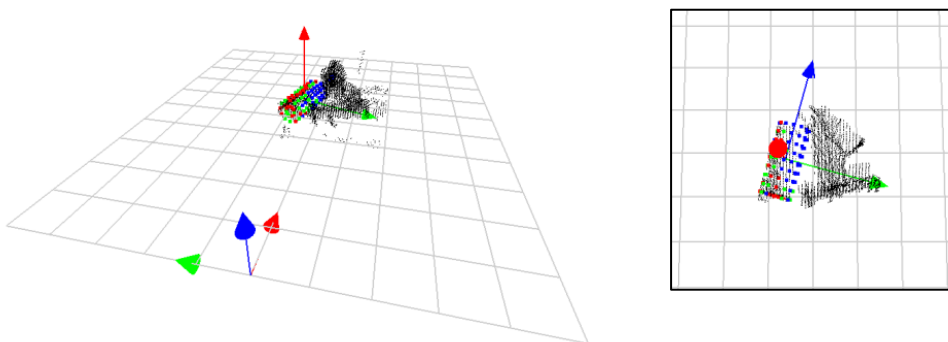
てが行われた。

バラ積み環境は、ミスマッチなケースを避けつつ、複数の物体を認識しなければならない状況の例としては、最も複雑で難しい環境である。物体同士の距離が近いために、有らぬ位置・姿勢にモデルが収束してしまうローカルミニマムに陥る可能性が高いことが理由である。また、重なりがあることで、全ての個体の認識は不可能なので、計測・認識・把持の反復は必須となる。見えやすく取りやすい個体が認識されやすいという関係性の手伝いを借りれば、一度に認識できる個体の数よりも、一つ一つ確実に取り進めることが重要とも言える。



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	604	-30	78	90	24	103

(a) 把持候補 1 ($e = 7.1\text{mm}$)



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	585	62	14	-171	272	336

(b) 把持候補 2 ($e = 8.1\text{mm}$)

図 5.7.20 認識結果

図 5.7.19 のグラフから分かるマッチングの成功回数により ICP アルゴリズムの純粋な成功率を、閾値を下回った回数から分かる閾値判定を加えたマッチングシステムの実質的な成功率を表したものを表 5.7.3 に示す。

表 5.7.3 マッチングの成功確率

良好な確率	18% (6/40)	閾値10mmを下回る確率	18% (6/40)
ミスマッチな確率	82% (34/38)	マッチングの成功確率	100% (6/6)

マッチングの成功確率の内訳は、5.7.2 で検証した単独円柱の各結果に非常に近い。多少複雑な環境下においても、同じ形状の物体認識は、同様にマッチングできるという可能性を示している。形状に左右されるマッチング性能の限界はあるが、円柱のバラ積み環境の認識は概ね可能と分かった。

図 5.7.20 の認識結果に対してハンドリング計画を行い導出された結果を図 5.7.21 に示す。実際にロボットで実行した結果を図 5.7.22 に示す。

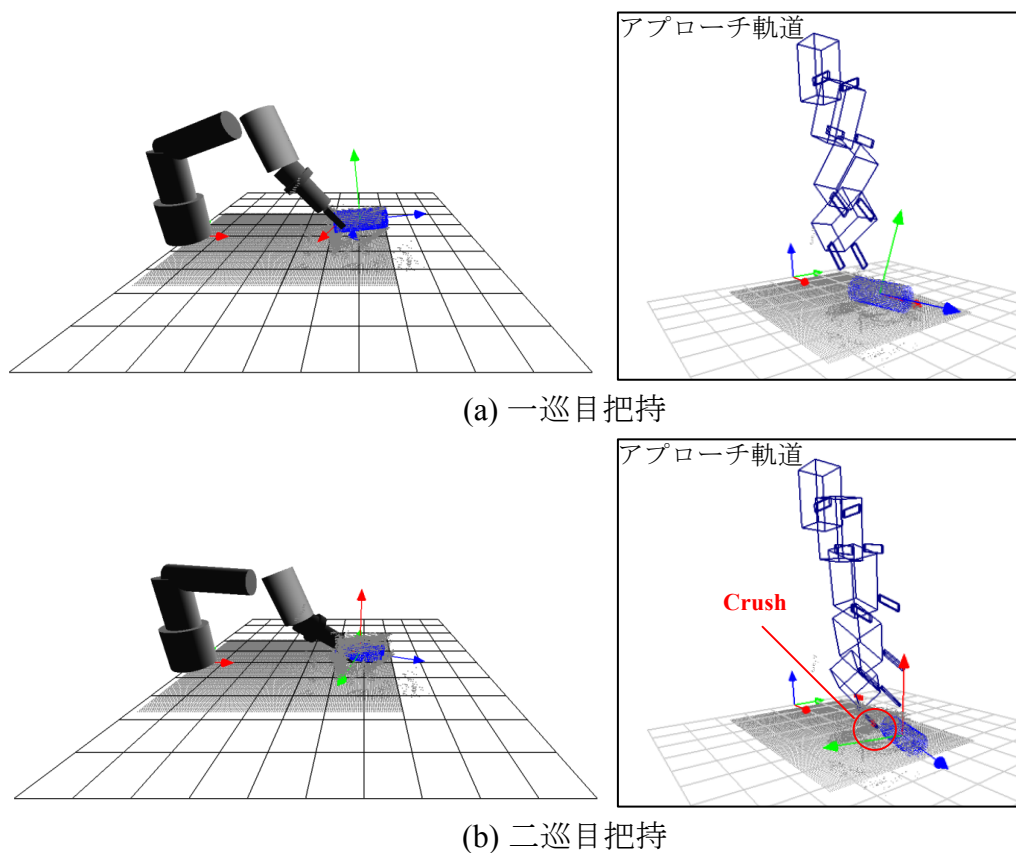
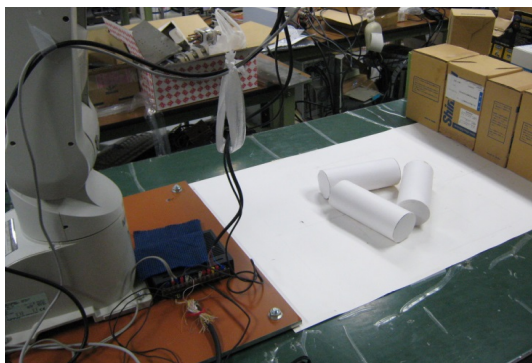


図 5.7.21 ハンドリング計画

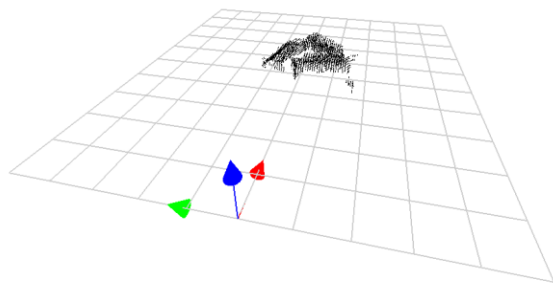


図 5.7.22 ハンドリング計画の実行結果

図 5.7.12 からわかる通り，一巡目把持ではバラ積みの上にある把持候補 1 に対してアームの可動範囲内で実現可能な把持姿勢，及び環境との干渉が無いアプローチ軌道を探索できたが，下部に存在する把持候補 2 を対象とした二巡目把持では近接する個体との干渉を回避することができなかった．この問題に対して再度計測と認識を行うこと対処を行う．再計測によりこれまで隠れていた部分の情報を得ることで今回の計測では認識されなかった他の個体を把持対象物として認識する可能性が高くなる．再計測時の環境とその計測結果を図 5.7.23 に示す．前工程でバラ積みされた上部の物体は取り除かれた状態である．



(a) 再計測環境



(b) 統合した計測点群

図 5.7.23 再計測の環境と得られた計測点群

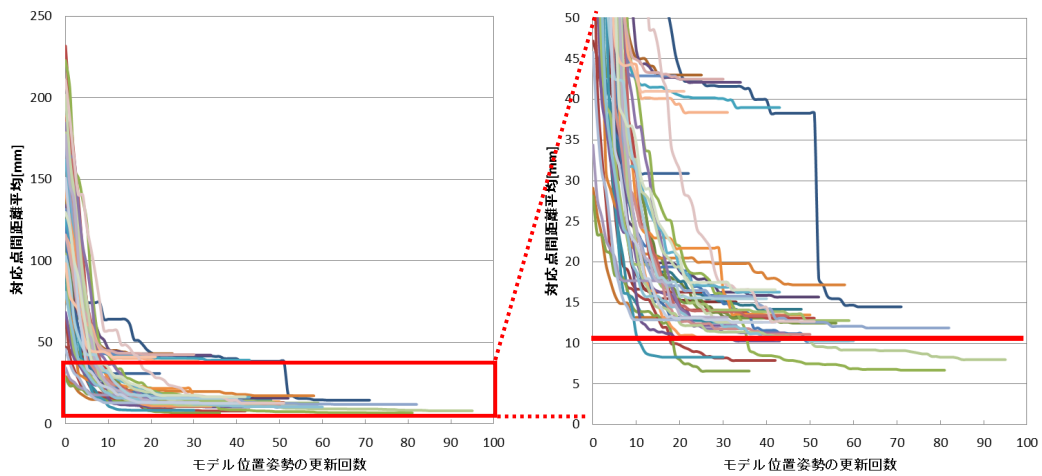


図 5.7.24 評価値 e の推移

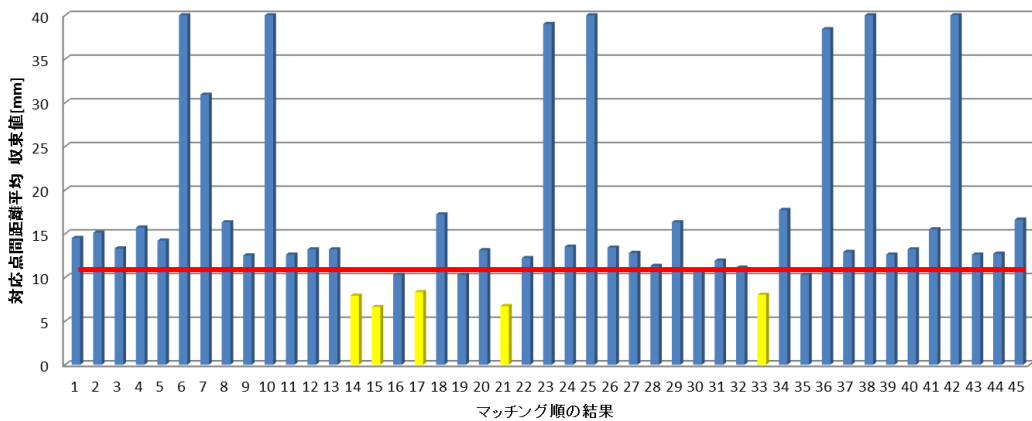
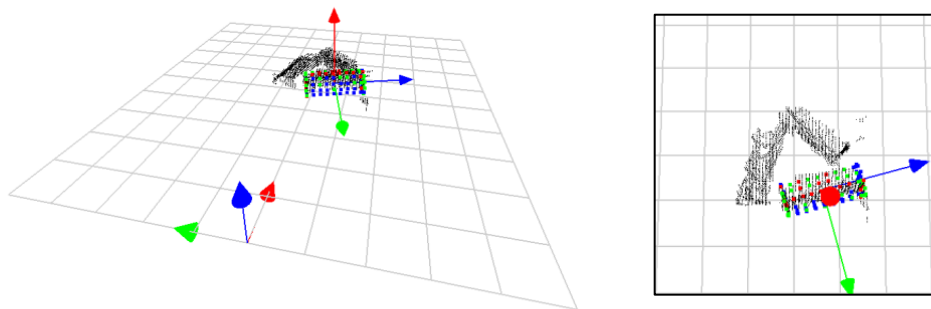


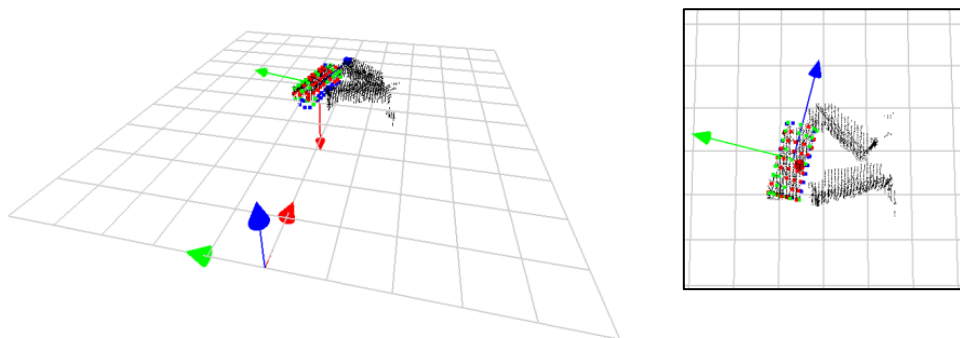
図 5.7.25 収束値の比較

図 5.7.18 は 42 回行ったマッチング処理における評価値 e 推移のグラフであり、図 5.7.19 は評価値 e の閾値を検証実験で使用している LRF の計測精度である 10mm に設定し、閾値を下回った収束結果を色分けした表したものである。閾値以下の良好なマッチング結果が 5 回得られている。このときの認識結果を図 5.7.26 に示す。閾値以下の結果の内 2 回は図 5.7.26(a)に示すような把持候補 1 に収束し、残りの 3 回は把持候補 2 に収束した。前工程では認識できなかった個体（把持候補 1）を認識することができている。把持候補 1 を先に取り除くことで、前工程で干渉問題により把持できなかった把持候補 2 の個体を安全に取り除くことができる可能性が生まれた。



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	523	-62	21	-45	-88	150

(a) 把持候補 1 ($e = 8.3\text{mm}$)



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	580	68	15	22	92	8

(b) 把持候補 2 ($e = 6.6\text{mm}$)

図 5.7.26 認識結果

図 5.7.25 のグラフから分かるマッチングの成功回数により ICP アルゴリズムの純粋な成功率を、閾値を下回った回数から分かる閾値判定を加えたマッチングシステムの実質的な成功率を表したものを表 5.7.4 に示す。

表 5.7.4 マッチングの成功確率

良好な確率	11% (5/45)	閾値10mmを下回る確率	11% (5/45)
ミスマッチな確率	89% (40/45)	マッチングの成功確率	100% (5/5)

図 5.7.26 の認識結果に対して再度ハンドリング計画を行い、導出された結果を図 5.7.27 に示す。実際にロボットで実行した結果を図 5.7.22 に示す。この様に計測・認識・ハンドリングを繰り返して行うことで積み上げられた環境に対しても対応可能であることを示した。

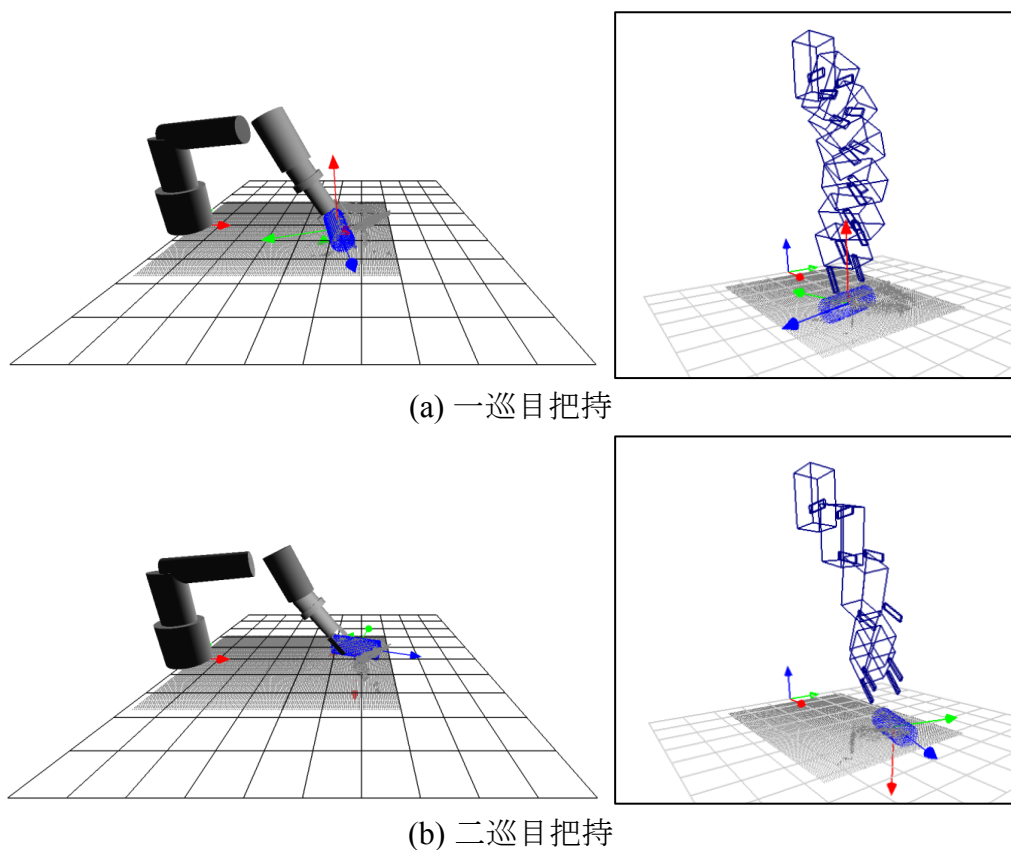


図 5.7.27 ハンドリング計画



(a) 一巡目把持

(b) 二巡目把持

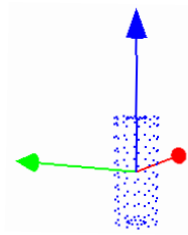
図 5.7.28 ハンドリング計画の実行結果

5.7.5 種類の異なる対象物が同時に存在する場合

生産ラインの様に扱う対象物の種類が限定される環境ではなく、家庭内の様に種類の異なる対象物が雑多に存在する環境に対しての検証実験を行った。図 5.7.29 に示す様に円柱と角柱が混在する環境に対して、円柱のみを認識することを目標とする。この環境に対して LRF を用い計測した結果を図 5.7.17 に示す。図 5.7.30 の点群情報は対象物を前面・上面・左側面・右側面の 4 方面から測定した結果を統合したものである。



(a) 実験環境



(b) 対象物のモデル

図 5.7.29 実験環境と対象物のモデル

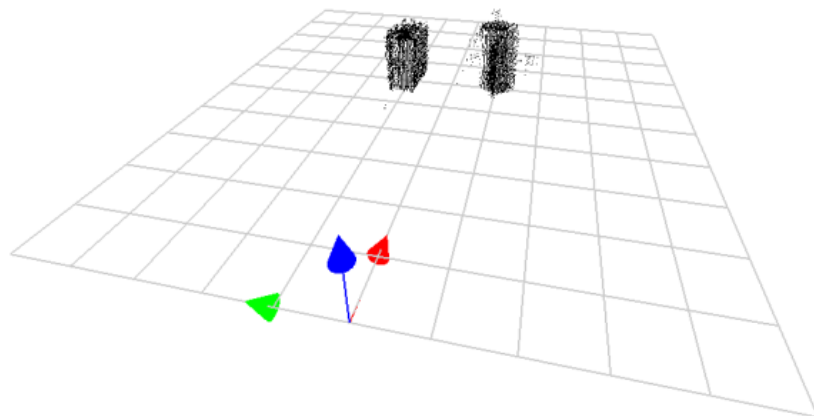
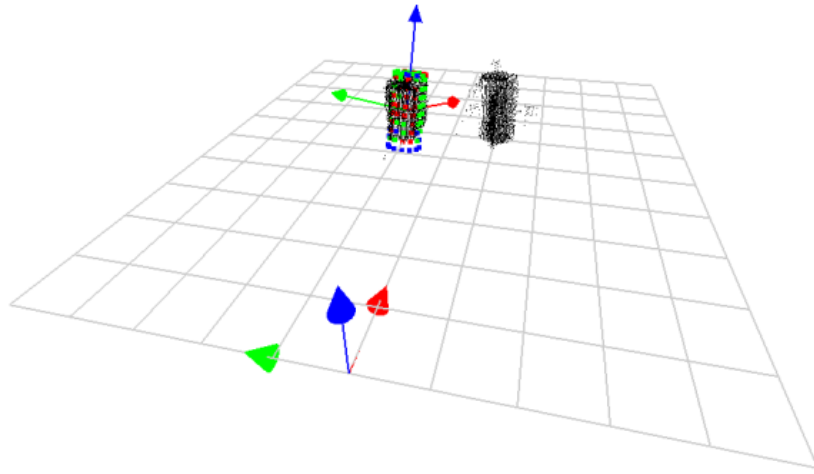
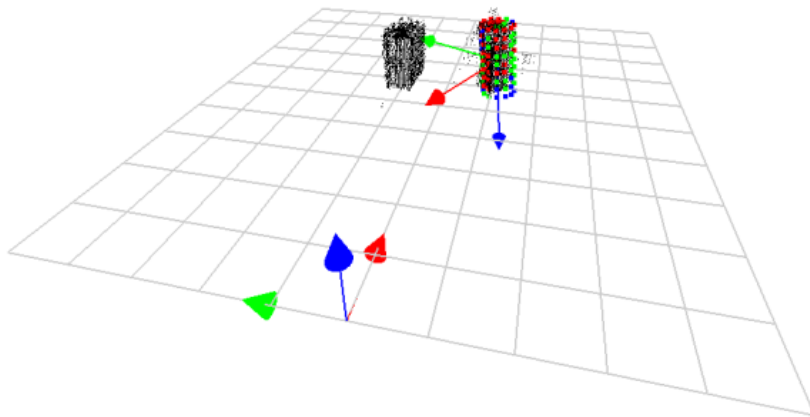


図 5.7.30 計測結果によりえられた点群情報



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	596	103	55	-3	16	-21

(a) 把持候補 1 ($e = 98.8\text{mm}$)



物体位置姿勢	x[mm]	y[mm]	z[mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
認識値	609	-109	65	3	-181	-28

(b) 把持候補 2 ($e = 7.5\text{mm}$)

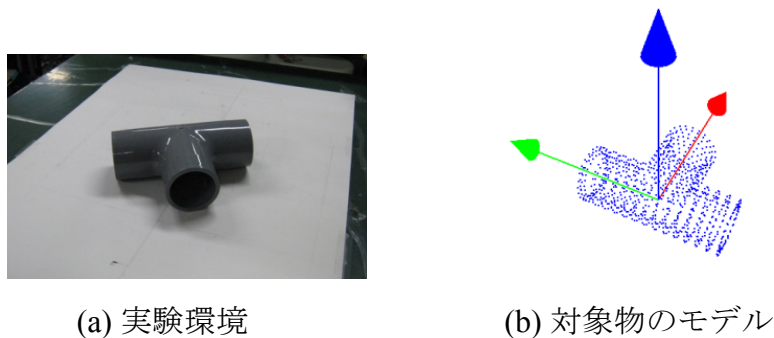
図 5.7.31 認識結果

計測により得られた点群情報に対して円柱モデルを用いてマッチングした結果を図 5.7.31 に示す。マッチングの結果、閾値以下のマッチングパターンで図

5.7.31 の 2 種類の把持候補が得られたが、把持候補 1 に関しては角柱の点群に対して円柱モデルが収束してしまっている。種類の異なる物体が混在する環境では、このように種類の違う物体との誤認識を起こすケースが課題となる。特に IPC アルゴリズムの性質上、点群の大きさが近いもの同士、あるいは認識対象の物体よりも大きな物体が存在する場合は同様の誤認識を起こすケースが増える。大きさの異なる物体が混在する場合は大きなものから認識を進めることで対処は可能であるが、点群の大きさが近いもの同士が混在する場合、その認識精度は点群の計測精度に直結しており、いかに精度よく計測できるかが課題となる。

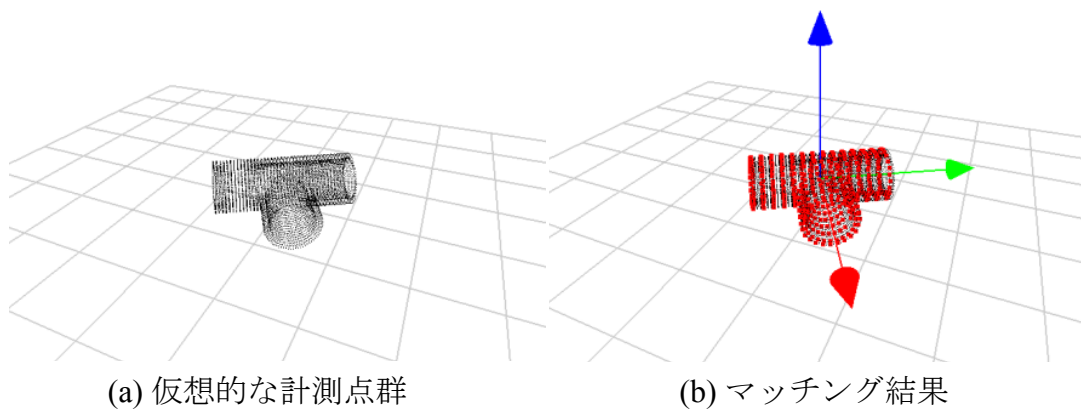
5.7.6 対象物の形状が複雑な場合

より複雑で実用品に近い物体に対しての検証実験を行った。ただし、図 5.7.32 に示す様に対象物は単体で存在する環境とする。実験の前に ICP アルゴリズムが複雑形状のマッチングに対しても機能するかどうかを、シミュレーション上にて精度の高い仮想的な計測点群に対して確認している。その結果を図 5.7.33 に示す。



(a) 実験環境 (b) 対象物のモデル

図 5.7.32 実験環境と対象物のモデル



(a) 仮想的な計測点群 (b) マッチング結果

図 5.7.33 シミュレーションによるマッチング結果

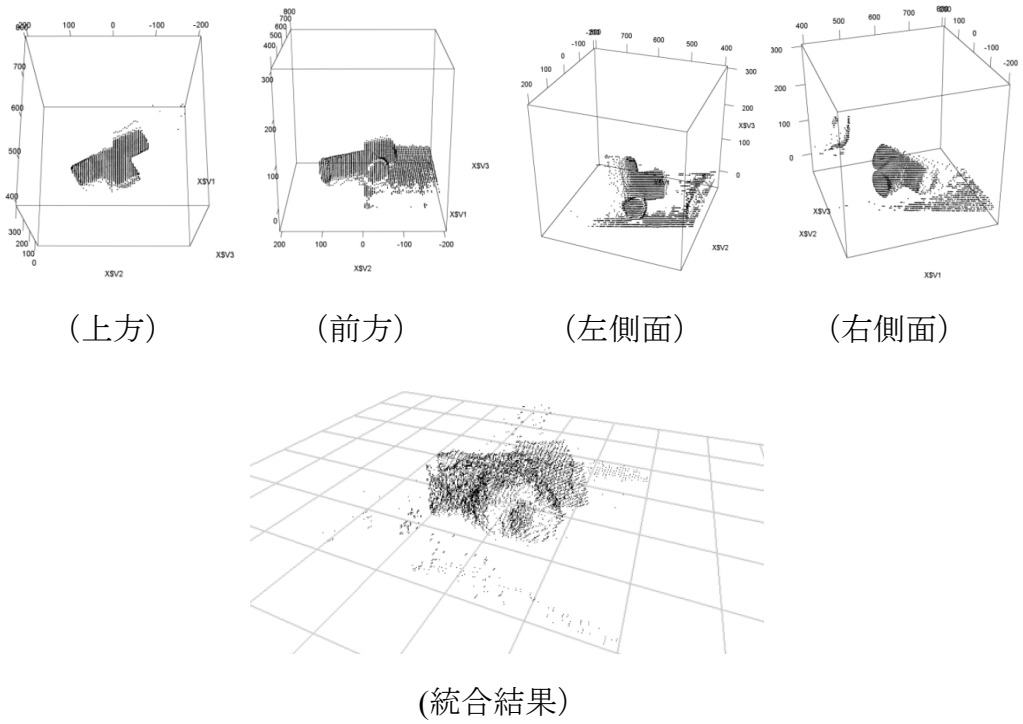


図 5.7.34 計測された測定点群

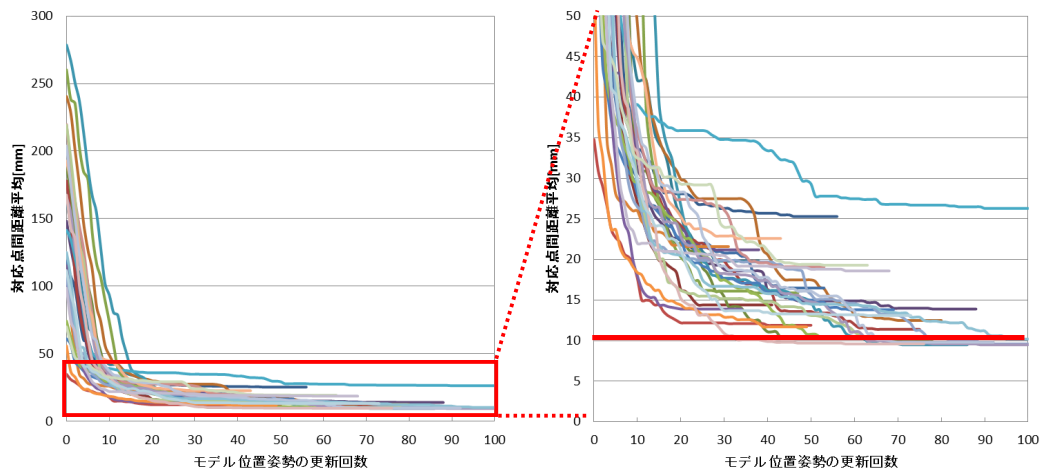


図 5.7.35 評価値 e の推移

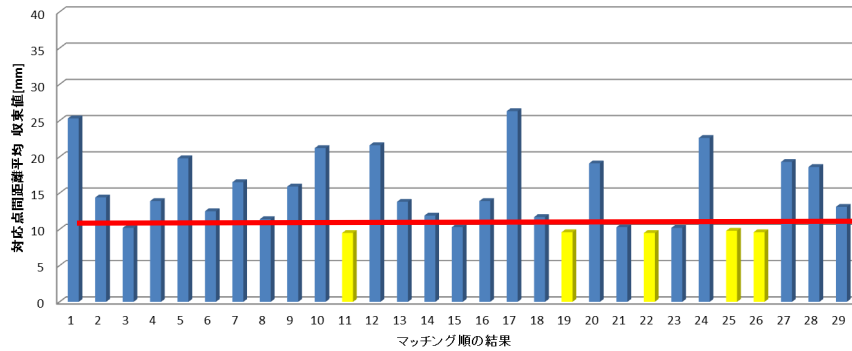


図 5.7.36 収束値の比較

図 5.7.35 は 29 回行ったマッチング処理における評価値 e 推移のグラフであり，図 5.7.36 は評価値 e の閾値を検証実験で使用している LRF の計測精度である 10mm に設定し，閾値を下回った収束結果を色分けした表したものである。図 5.7.35 から概ね 50~100 回程度のモデルの更新後に評価値が収束していることから複雑な形状においても収束時間に関しては単純な形状と同等のものであることがわかる。収束値の値が閾値に対してそれほど小さくならないことから，計測精度による形状誤差が大きく，図 5.7.37 に示す様に閾値付近の結果であっても mismatches 結果が多くなっている。

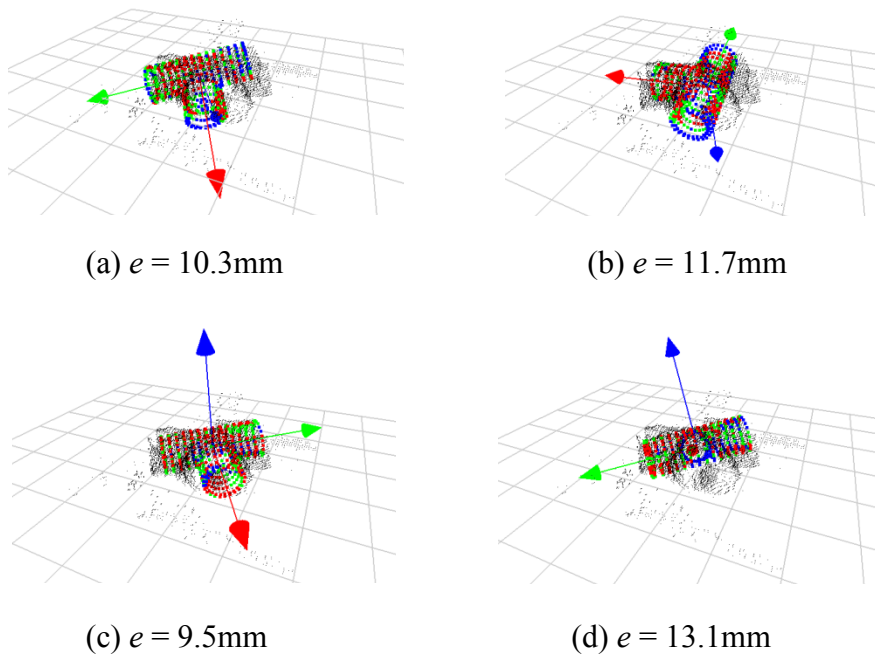
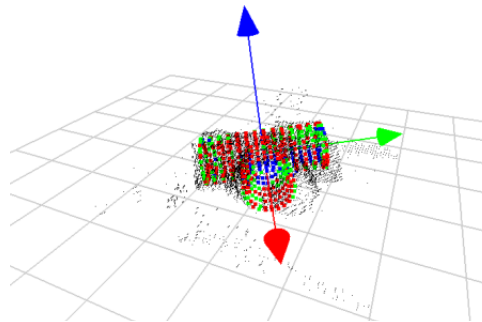


図 5.7.37 閾値付近のマッチング結果の比較

表 5.7.5 マッチングの成功確率

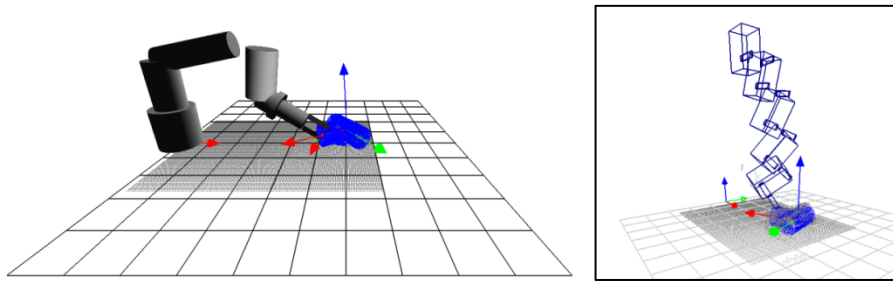
良好な確率	17% (5/29)	閾値10mmを下回る確率	17% (5/29)
ミスマッチな確率	83% (24/29)	マッチングの成功確率	100% (5/5)

図 5.7.36 のグラフから分かるマッチングの成功回数により ICP アルゴリズムの純粋な成功率を、閾値を下回った回数から分かる閾値判定を加えたマッチングシステムの実質的な成功率を表したものを表 5.7.5 に示す。図 5.7.38 に最終的に選択された認識結果を示す。認識結果に対してハンドリング計画を行った結果を図 5.7.39 に示す。ハンドリング計画は円柱把持の知識とパイプの縁を掴む知識の 2 つを考慮して計画を行った。どちらの把持方法でもハンドリング計画を行うことが可能であった。図 5.7.40 にそれらのハンドリング計画をロボットに実行させた結果を示す。

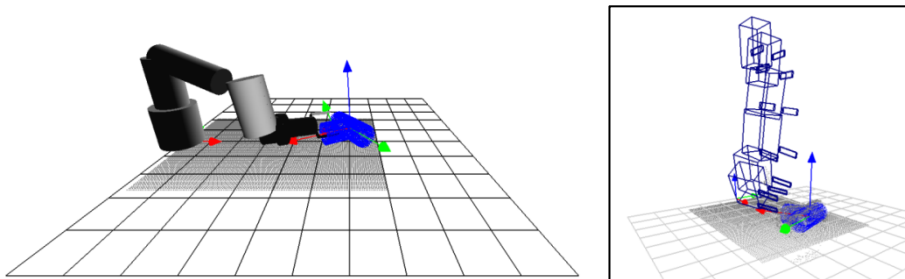


物体位置姿勢	x [mm]	y [mm]	z [mm]	θ_x [°]	θ_y [°]	θ_z [°]
実測値	600	0	22	0	0	-150
認識値	603	12	48	6	0	-152

図 5.7.38 認識結果 ($e = 9.5\text{mm}$)



(a) 円筒把持のパターン



(b) 縁を掴むパターン

図 5.7.39 ハンドリング計画



(a) 円筒把持のパターン



(b) 縁を掴むパターン

図 5.7.40 ハンドリング計画の実行結果

5.7.7 検証結果のまとめ

検証実験の結果から3次元の位置・姿勢認識及の評価を表5.7.6にびハンドリング計画の評価を表5.7.7にまとめる。

認識においては単独の対象物であれば処理の過程で適切なマッチング結果を安定的に得られており、評価値の閾値を反映させることで正しいマッチング結果を選別可能であった。同種が独立して存在する環境であれば複数の対象物に対しても同様に認識が可能である。ただし、形状により計測精度が認識に大きく影響を与える可能性がある。バラ積み環境においては把持の際の干渉問題が生じやすいが、一つずつ確実に取り進めることで対応は可能である。種類の異なる物体が混在する場合は特に計測精度の影響が大きく、点群の大きさが近い場合は誤認識が増える。

ハンドリングにおいては、正しく認識された物体に対しては十分な精度でピッキングが可能である。ただし、認識が成功していても物体の配置状態によっては干渉問題によってピッキングが不可能な場合も出てくる。

表 5.7.6 ICP アルゴリズムによる 3 次元位置・姿勢認識の総合評価

単体の対象物の認識	一定のスケールを有する計測形状が明瞭な単純形状		◎
	複雑形状		○
	計測形状が不明瞭な個体		△
複数の対象物の認識	同種の対象物の認識	単純形状が独立した状況	◎
		単純形状同士がバラ積みされた状況	○
		複雑形状が独立した状況	○
		複雑形状同士がバラ積みされた状況	未
	異種の対象物の認識	対象物が独立した状況(スケールが近い場合)	×
		対象物同士がバラ積みされた状況	未

表 5.7.7 ハンドリングの総合評価

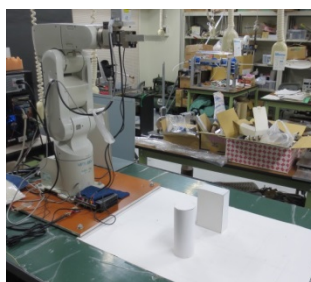
単体の対象物の認識	単純形状		○	
	複雑形状		△	
	計測不明瞭		×	
複数の対象物の認識	対象物が独立した状況	単純形状	○	
		複雑形状	△	
	対象物同士がバラ積みされた状況	密集度合い(低)	単純形状	○
			複雑形状	未
		密集度合い(高)		×

5.8 まとめ

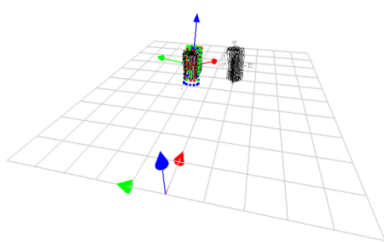
本研究ではレーザ測距式測域センサ LRF を使った 3 次元環境計測に基づく物体認識及びロボットハンドリング作業の実現を目指し，環境点群の獲得と点群マッチング，更に既知の寸法形状に合わせて教示したモデルの知識を介すことのできる簡潔な把持計画により，その基本システムの提案を行った。

各種の状況下でシステム全体の検証を実施した結果，同じ種類(単純形状)の物体で構成された環境については，独立環境・バラ積み環境共に，ピッキング動作までの一連の目的を達成し，実現の可能性を示すことができた．しかし，目的が達成できなかった失敗事例から，その課題も明らかになった．物体の材質に左右される計測誤差や単純な傾向に依存したセンサの機器定数誤差，データ間のばらつき誤差など，3次元点群を不安定化させる要因が多数存在することが分かっているが，これらは物体形状の散逸とそれに基因する認識誤差を招く大きな問題の一つである．測定精度は常に改善の余地がある課題と言える．より精度の高い形状計測ができれば本研究で用いた対象物より小型の物体への適用や異種形状の分類も行い易くなると考えられる．

また，図 5.8.1(a)に示す様なモデルマッチングで生じる誤認識の例から分かる評価基準の限界や，図 5.8.1(b)に示す様な現状では不可避な干渉の例も存在している．実際の複雑な環境へ応用できる 3 次元環境ハンドリングシステムの実現に向けて，例えば図 5.8.1 の様な状況に対してはロボットが積極的に環境に干渉することで物体同士を独立させる等，これらの問題事項を改善する工夫が今後求められる．



(a) 誤認識問題の例



(b) 把持不可能な例

図 5.8.1 システムの課題

第6章 結言

本研究では生産機械の高機能化を目指し、生産機械の構成要素の基本となるアクチュエータに関する要素技術から、それらをシステムとして応用的に運用するロボット技術を範囲として、以下の項目にスポットを当て、各要素技術における高機能化に関する検討と考察を行った。

(1) 間欠運動の高速化に関する考察

メカトロニクス技術の発展に伴い、機械運動の全てを制御を主体として目的の運動を得ようという考え方が普及してきているが、生産ライン等においては同じ量の移動を高速かつ正確に繰り返し行うことが求められる間欠運動を行うことも多い。そのため、間欠運動を対象にしてサーボ系とカム機構を比較検討を行い、間欠運動の様に一定の加減速を繰り返す運動ではサーボ系に比べてカム機構を利用する方がモータの消費エネルギーを小さくかつ高速化が可能であることを示した。サーボ系によって間欠運動を生成する場合、負荷の保持剛性はサーボ系ではサーボモータ自身もつ保持剛性に依存するため、カム機構に比べその保持剛性は極めて低い。また、モータに流れる最大電流が限界値を超えると間欠運動の生成が困難になるが、カム機構の場合にはモータ電流がその限界値を超えてカム加減速特性の歪曲が大きくなっても確実に間欠運動が得られる。カム曲線を減速時間を伸ばして加速側と減速側とを非対称にすることで入力軸であるモータ軸の回転むらがあっても出力軸における加減速の歪曲を解消することができることを示した。カム機構において間欠運動のさらなる高速化の可能性を示した。

(2) サーボモータ系に含まれる電流制限と電流フィードバックとの関連に関する考察

生産機械のアクチュエータとしてサーボモータを使用することが増えてきており、一般的なサーボドライバには過電流に対してモータやドライバを保護する目的から、ドライバ回路内に飽和要素を設けて、モータに流れる電流値に制限を与えている。実際のサーボモータの利用状況においては、モータに流れる電流値が飽和してしまうような使い方まで、その使用範囲を拡大して使われていることも多いことから電流飽和の影響を無視することができない。しかしな

がら電流フィードバックを与えることにより、モータが発生する誘起電圧の影響を無視することができるようになるため、モータが発電機として動作する場合の回生エネルギーについて考慮する必要はなく、かつサーボドライバ内の動作電圧を低下させることができる。このためサーボドライバ中の操作量飽和に対する影響を小さくできることを示した。また電流フィードバックを与えることによりモータに流すことのできる最大電流値を正確に制御することができるため、モータやサーボドライバを過電流に対して保護することが可能になるだけでなく、モータに流すことのできる最大電流値を意図的に制限することにより負荷の移動経路と力制御とを両立させられることを示した。

(3) 真空吸着式搬送リフトのためのパワーアシスト技術の改善

工場内や倉庫内での重量物の搬送装置の一つとして真空吸着式の搬送リフトを対象にして、搬送リフトに付加されたパワーアシスト装置の改善を行った。特に荷物の引き上げ時に生じる衝撃力を緩和するためにパワーアシスト装置の中にコンプライアンス制御を実装する手法を提案した。コンプライアンス制御を実現する方法として、モータ軸の変位と速度のフィードバックゲインを調整することにより実現する方法も考えられるが、実際には減速機等に含まれる固体/粘性摩擦等の外乱力の影響を強く受け、1Hz 以下の非常に柔らかいコンプライアンスを実現することは現実的には困難である。このため、本研究ではサーボゲインを大きくした位置制御系を用いて外乱に対して強いモータ軸の回転を得ることで制御系の安定性を高めている。その一方でコンプライアンスモデルを計算機中に構成し、ロープ張力以外の不必要な外乱のないコンプライアンスモデルからの出力を AC サーボモータへの位置指令値として与えることによりパワーアシストのためのコンプライアンス制御を実現した。この結果非常に柔らかいコンプライアンス制御が実現できることを示した。

(4) ロボットハンドリング技術の高機能化

ロボットアームに要求される動作には物体を把持し、別の場所へ置くといったピックアッププレースの動作が多く、近年ではその作業環境も多様化してきているため、考慮しなければならない点が増えてきている。それらを踏まえた上で3次元環境の計測、測定により得られた3次元の環境点群を用いた物体の位置・姿勢の認識、干渉問題を考慮したロボットの動作計画の3段階において高

機能化を図った。

3次元環境の計測においてはロボットアームの自由度を利用し、対象物を多方面から計測することで死角を減らした。対象物の位置・姿勢の認識においては、事前に与えたモデルを用い、ICPアルゴリズムにより位置・姿勢のマッチングを行った。このとき複数回のマッチングを行い、閾値以下の結果に対しランキング付けをすることで、認識精度の向上を行った。ロボットの動作計画においては事前に与えた対象物のモデル情報に、把持をするための把持情報を付加し、ロボットハンドとして最も一般的な2指グリップハンドを対象とした把持位置の探索方法を提案した。また、ロボットアームに干渉モデルを設定し、サブターゲットを利用することでより簡単に干渉問題の回避した軌道の生成を行えることを示した。ただし、認識における限界や現状では不可避な干渉問題も存在することが分かった。

以上の結果、生産機械において必要とされる要素技術の内、生産機械の動作の基本となるサーボ技術の高機能化と、様々な要素技術を組み合わせてシステムとして応用的に運用されるロボット技術における高機能化を実現することができた。

参考文献

- [1] 神崎一男, 小林信明, 直流サーボモータによるカム曲線の出力 (第1報) - 逆伝達関数補償法の適用 -, 精密工学会誌, Vol.55, No.12, 1989, p2215-2221.
- [2] 神崎一男, 小林信明, 直流サーボモータによるカム曲線の出力 (第2報) - 振動負荷系の残留振動特性 -, 精密工学会誌, Vol.57, No.11, 1991, p2023-2029.
- [3] 神崎一男, 小林信明, 直流サーボモータによるカム曲線の出力 (第3報) - ポリサイン曲線による位置決め -, 精密工学会誌, Vol.59, No.1, 1993, p107-112.
- [4] H.Makino, N.Fruya, Motion Control of a Jointed Arm Robot Utilizing a Microcomputer, Proceedings 11th ISIR, Tokyo, 1981, pp.405-412.
- [5] 牧野 洋, 村田 誠, 古屋 信幸, SCARA ロボットの開発, 精密機械, Vol.48, No.3, 1982, pp.378-383.
- [6] 神谷 好承, 岡部 佐規一, 横山 恭男, 関節型ロボットアームの高速化のための運動制御 間欠運動の高速化に関する研究, 精密機械, Vol.47, No.6, 1981, pp.706-711.
- [7] 山田一郎, 中川三男, 機械的な振動特性を考慮したサーボモータ系の位置決め制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.1, 1982, pp.84-91.
- [8] 西岡雅夫, 内野光雄, カム式位置決め装置の入力軸トルク補償機構の研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.562, 1993, p1913-1919.
- [9] 西岡雅夫, 内野光雄, カム式位置決め装置の入力軸トルク補償機構の研究 (第2報, 理論の検証), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.60, No.569, 1994, p338-342.
- [10] 酒井史敏, 神谷好承, 関啓明, 疋津正利, DC サーボモータの動特性に関する考察 -サーボ増幅器内の回路定数の推定-, 精密工学会誌, Vol.66, No.2, 2000, p266-271.
- [11] 酒井史敏, 神谷好承, 関啓明, 疋津正利, サーボ増幅器により駆動されるモータが持つ非線型動特性の解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.647, 2000, p189-195.
- [12] 高野政晴, ロボットの運動の高速化技術, 計測と制御, Vol.21, No.12, 1984, p1122-1128.
- [13] 神谷好承, 関啓明, 疋津正利, 酒井史敏, DC サーボモータの動特性に関する考察, 精密工学会誌, vol.65, No.3, 1999, p464-468.

- [14] 板生清, 神崎一男, ポリダイナムによるタイプヘッドの高速位置決め, 精密機械, Vol.37, No.434, 1971, pp204-211.
- [15] K. Kanzaki and K. Itao, Polydyne Cam Mechanisms for Typehead Positioning, Trans. ASME Ser. B, 91-4, 1972, pp.250-254.
- [16] 大石 潔, 間下 知紀, 操作量飽和を考慮したデジタルロバスト速度サーボ系の一構成法, 電気学会論文誌 D, Vol.119, No.1, 1999, P.88-96.
- [17] 渡辺 亮, 内田 健康, 示村 悦二郎, 藤田 政之, 制御入力制限を受ける制御系に対する Anti-Windup and Bumpless Transfer の新しい設計法, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.6, 1994, P.660-668.
- [18] P.J.Campo, M.Morari and C.N.Nett, Multivariable Anti-Windup and Bumpless Transfer: A General Theory, International Proceedings American Control Conference, 1989, pp.1706-1711
- [19] 鈴木 文泰, 堀 洋一. 飽和状態オブザーバを用いたアンチwindアップ制御, 電気学会論文誌 D, Vol. 120, No.1, 2000, P.120-125.
- [20] A.H.Glatfelter and W.Scaufelberger, Stability Analysis of Single Loop Control System with Saturation and Antireset-Windup Circuits, Automatic Control, Vol.28, No.12, 1983, pp.1074-1081.
- [21] M.V.Kothare, P.J.Campo, M.Morari, and C.N.Nett, A Unified Framework for the Study of Anti-windup Designs, Automatica, Col.30, No.12, 1994, pp.1869-1883.
- [22] K.J.Asutrom and T.Hagglund, Automatic Tuning PID Controllers, Instrumentt Society of America, 1988.
- [23] C.Bohn and D.P.Atherton, An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies, IEEE Control System Magazine, Vol.15, No.2, pp.34-40,1995.
- [24] Y.Peng, D.Varncic, and R.Hauns, Anti-Windup , Bumpless, and Conditioned Trasfer Techniques for PID Controllers, IEEE Control System Magazine, Vol.16, No.4, 1996, pp.48-57.
- [25] R.Haunus, M.Kinnaert and J.L.Henrotte, Conditioning Technique, a General Anti-windup and Bumpless Transfer Method, Automatica Vol.23, No.6, 1987, pp.729-739.
- [26] J.K.Park and C.H. Choi, Dynamic Compensation Method for Multivariable Control System with Saturating Actuators, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.40, No.9, 1995, pp.1635-1640.

- [27] 佐伯 正美, 和田 信敬, 土屋 正樹, 飽和時の応答を考慮したアンチwindアップ制御器の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.6, 1999 P.754-761.
- [28] M.Saeki and N.Wada, Design of Anti-Windup Controller Based on Matrix Inequalities, Proc. of the 35th Conference of Decision and Control, 1996, pp.261-262.
- [29] C.Edwards and I.Postlethwaite, Anti-windup and Bumpless-transfer Schemes, Automatica, Vol.34, No.2, 1998, pp.199-210.
- [30] 古賀孝好, バキュームローリフターによるローリ自動倉庫, 紙パ技協誌, Vol.46, No.1, 1992, pp.90-96.
- [31] 山口大助, 田川泰敬, 山田学, 今岡静男, 懸垂機構を用いたパワーアシスト搬送装置における対象物移動性能の向上, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No.716, 2006, pp.1178-1183.
- [32] 山本 優一, 打田 正樹, 森田 良文, 原 進, パワーアシスト搬送装置のためのインパルス状入力を用いた振動低減制御による操作支援, 電気学会論文誌 C, Vol.132, No.7, 2012, pp.1160-1167.
- [33] 三好孝典, 小島秀人, 寺嶋一彦, パワーアシスト搬送装置の介護リフトへの応用, 福祉工学シンポジウム講演論文集, 2006, pp.309-310.
- [34] 早津昌樹, 山田 学, 田川泰敬, 山口大助, 懸垂機構を用いた多自由度型パワーアシスト吊搬装置の開発(第 1 報)実規模試験装置の試作と制御手法の検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.671, 2002, pp.2009-2015.
- [35] 山口 大助, 田川 泰敬, 早津 昌樹, 山田 学, 懸垂機構を用いた多自由度型パワーアシスト吊搬装置の開発 第 2 報, 速度変換行列逐次同定手法の検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.693, 2004, pp.1456-1462.
- [36] 舟久保 昭夫, 谷城 博幸, 福井 康裕, パワーアシスト移動介助用リフト, 計測と制御, Vol.40, No.5, 2001, pp.391-395.
- [37] 原進, パワーアシスト制御のロバスト性向上を目的とした制御系設計法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.690, 2004, pp.416-426.
- [38] 原進, サーボ搬送制御とインピーダンス制御のなめらかな切り換えによる台車の位置決め, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.689, 2004, pp.127-134.
- [39] 原進, 山田陽滋, サーボ搬送制御とインピーダンス制御のなめらかな切り換えによる台車の位置決め: 力覚センサレス制御の実現, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.730, 2007, pp.1618-1624.

- [40] 小島秀人, 三好孝典, 寺嶋一彦: パワーアシストシステムにおける搬送物接地時のリミットサイクルの抑制, 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, 2004, pp.236-237.
- [41] 小島秀人, 三好孝典, 寺嶋一彦: リミットサイクルを抑制したパワーアシストシステムの応用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会論文集, 2006, pp.1-4.
- [42] 金田憲明, 成田十一, 大滝雄一郎, 本間智之, 渡邊健次郎, 伊関陽一郎, 大野宏: ステレオビジョン画像処理技術の実用化研究, 新潟県工業技術総合研究所工業技術研究報告書, Vol.34, 2006, pp.45-51.
- [43] J. Kirkegaard and T. B. Moeslund, "Bin-Picking based on Harmonic Shape Contexts and Graph-Based Matching", Int. Conf. on Pattern Recognition, vol. 2, 2006, pp. 581-584.
- [44] A. Zuo, J. Z. Zhang, K. Stanley, and Q. M. J. Wu, "A Hybrid Stereo Feature Matching Algorithm for Stereo Vision-Based Bin Picking", J. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, vol. 18, no. 8, 2004, pp. 1407-1422.
- [45] 金谷健一, 三島等, 未校正カメラによる2画像からの3次元復元とその信頼性評価, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, 42-SIG 6, 2001, pp.1-8.
- [46] 山田健人, 金澤靖, 金谷健一, 菅谷保之, 2画像から3次元復元最新アルゴリズム, 情報処理学会研究報告, 2009, pp.1-8.
- [47] R. Koch, M. Pollefeys, and L. V. Gool, Multi Viewpoint Stereo from Uncalibrated Video Sequences, Computer Vision ECCV'98, Vol.1406, 1998, pp.55-71.
- [48] 美濃導彦, 中井康博, 複数の点群に対する位置合わせ手法の性能比較, 京都大学特別研究報告書, 2012
- [49] S. Fuchs, S. Haddadin, M. Keller, S. Parusel, A. Kolb, and M. Suppa, "Cooperative Bin-Picking with Time-of-Flight Camera and Impedance Controlled DLR Lightweight Robot III", Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2010, pp.4862-4867.
- [50] O. Ghita and P. F. Whelan, "A bin picking system based on depth from defocus", J. Machine Vision and Applications, Vol. 13, No. 4, 2003, pp. 234-244.
- [51] 阿久根大成, 宮地晃平, 大河内彰, 木下和樹, 佐藤功太, 測域センサの使い方, 2011年度山彦セミナー, 2011.
- [52] H.Kawata, A.Ohya, S.Yuta, W.Santosh, and T.Mori, Development of ultra-small

- lightweight optical range sensor system, Proc. of IROS'05, 2005, pp.3277-3282.
- [53] S.Gumhold, X.Wang, R.Macleod, Feature Extraction from Point Clouds, Proceeding of the 10 International Meshing Roundtable, Sandia national Laboratories, 2001, pp.293-305.
- [54] K.Kodani, T.Manabe, T.Taniguchi, Surface Generation from Point Cloud on Surface of 3D Domain, Proceedings of Computational Engineering Conference, Vol.8, 2003, pp.837-840.
- [55] F.Xu, I.Hagiwara, Developing of registration System for Range Scan Data, Proceedings of the 26th Japan Simulation Conference, 2007, pp.15-118.
- [56] 永田和之, 宮坂崇, 金宮好和, 山野辺夏樹, 丸山健一, 川端聡, 河井良浩, 複雑な環境下における指示物体の把持, 機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.797, 2013, pp.27-42.
- [57] A.E.Johnson, M.Hebert, Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.21, 1999, pp.433-449,.
- [58] A.S.Mian, M.Bennamoun, R.A.Owens, A novel representation and feature matching algorithm for automatic pairwise registration of range images, International Journal of Computer Vision, Vol.66, No.1, 2006, pp.19-40.
- [59] G. Hetzel, B. Leibe, P.Levi and B. Schiele, 3D Object Recognition from Range Images using Local Feature Histograms, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, 2001, pp.394-399.
- [60] G.Natassha, I.Leslie, R.Szymon, Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm, Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling(3DIM'03), 2003, pp.260-267.
- [61] J.P.Besel, and N.McKay, A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Transaction on Patter Analysis and Machine Intelligence, 1992, No.14-2, pp.239-256.
- [62] Z.Zhang, Iterative point matching for registration of free-form curves and surface, The International Journal of Computer Vision, No.13-1, 1994, pp.119-152.
- [63] G. Sharp, S. Lee, and D. Wehe, ICP registration using invariant features, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.24, No.1, 2002, pp.90-102.

- [64] 増田建, ICP アルゴリズム, 情報処理学会, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM) 2009-CVIM-168(23), 2009, pp.1-8.
- [65] A. E. Johnson and S. B. Kang, Registration and integration of textured 3-D data, *Image and Vision Computing*, Vol.17, 1999, p.135-147.
- [66] D. Akca, "Matching of 3D surfaces and their intensities," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 2, 2007, pp.112–121.
- [67] C. Dorai and A. K. Jain, "COSMOS-A Representation Scheme for 3D Free-Form Objects," *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.19, No.10, 1997, pp.1115–1130.
- [68] H. Chen and B. Bhanu. 3D free-form object recognition in range images using local surface patches. *Pattern Recognition Letters*, Vol.28, No.10, 2007, pp.1252–1262.
- [69] 武口 智行, 金子 俊一, 距離アスペクト画像照合による高効率なロボスト探索, *電気学会論文誌 C*, Vol. 124, No.3, 2004, pp.637-646.
- [70] F.Tombari, S.Salti, L.D.Stefano , Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description, *Computer Vision - ECCV*, 2010, pp.356-369.
- [71] F. Tombari and L. D. Stefano, Hough Voting for 3D Object Recognition under Occlusion and Clutter, *IPSA Computer Vision and Applications*, Vol.4, 2012, pp.1–10.
- [72] B.Drost, M.Ulrich, N.Navab, and S.Ilic, Model Globally, Match Locally: Efficient and Robust 3D Object Recognition, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2010, pp.998-1005.
- [73] E. Kim and G. Medioni, 3D Object Recognition in Range Images using Visibility Context, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp.3800–3807.
- [74] C. Choi, Y. Taguchi, O. Tuzel, M. Liu, and S. Ramalingam, Voting-Based Pose Estimation for Robotic Assembly Using a 3D Sensor, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp.1724–1731.
- [75] S. El-Khoury, A. Sahbani, and V. Perdereau, Learning the Natural Grasping Component of an Unknown Object, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp.2957-2962.
- [76] N. Curtis and J. Xiao, Efficient and Effective Grasping of Novel Objects through Learning and Adapting a Knowledge Base, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp.2252-2257.

- [77] A. Morales, G. Recatala, P.J. Sanz, A.P. del Pobil, Heuristic Vision-Based Computation of Planar Antipodal Grasps on Unknown Objects, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, pp.583-588.
- [78] G. M. Bone, A. Lambert, and M. Edwards, Automated Modeling and Robotic Grasping of Unknown Three-Dimensional Objects, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008, pp.292-298.
- [79] M. Richtsfeld and M. Vincze, Grasping of Unknown Objects from a Table Top, Proceedings of ECCV Workshop on 'Vision in Action: Efficient strategies for cognitive agents in complex environments', 2008.
- [80] J. Bohg and D. Kragic, Learning Grasping Points with Shape Context, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 58, No. 4, 2010, pp.362-377.
- [81] K. Harada, K. Kaneko, and F. Kanehiro, Fast Grasp Planning for Hand/Arm Systems Based on Convex Model, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008, pp. 1162-1168.
- [82] 楠田嘉宏, 産業用ロボット技術発展の系統化調査, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, Vol.4, 2004.
- [83] 日本ロボット工業会, 国産ロボット技術発達の系統化に関する調査, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, Vol.3, 2003.
- [84] P. J. Sanz, J. M. Inesta, and A. P. del Pobil, Grasping the not-so-obvious; Vision-based object handling for industrial applications, IEEE Robotics & Automation Magazine, pp.44-52, 2005.
- [85] 原田研介, 辻徳生, 永田和之, 山野辺夏樹, 丸山健一, 中村晃, 河井良浩, 把持面の柔軟性を考慮したパラレルグリッパの把持計画, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.7, pp.364-372, 2012.