

—修士学位論文—

構造可変型ロボットによる
協調把持物体制御に関する研究

Research on the Cooperative Holding Object Control
for a Reconfigurable Robot

平成23年度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 電気電子工学専攻
川北 将大

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景と目的	1
1.2 論文の構成	3
第2章 構造可変型ロボットの概要	4
2.1 構造可変型ロボットの構造	4
2.2 構造可変型ロボットの制御システムの概要	5
2.3 電力・情報の無接触伝送 [3]	6
第3章 構造可変型ロボットシステム	8
3.1 中央制御部	8
3.2 分散知能	9
3.2.1 ロボットアームの動力学	9
3.2.2 外乱オブザーバ	10
3.2.3 係数関法 [4]	12
3.3 ロボットの運動学	14
3.3.1 構造可変型ロボットに適した逆運動学	14
3.4 作業空間オブザーバ	16
第4章 機能性に基づいた分散制御 [4][10]	18
4.1 機能性に基づく制御	18
4.2 構造可変型ロボットに適した機能性に基づく分散制御システム [10]	18
第5章 構造可変型ロボットにおけるマルチレートサンプリング制御	21
5.1 加速度制御	21
5.2 シングルレートサンプリング制御	22
5.3 本研究に適したマルチレートサンプリング制御	23

第6章	姿勢制御システムの構築	26
6.1	姿勢情報の推定	26
6.2	姿勢情報推定の実験	28
6.3	姿勢制御システムの構築	30
第7章	シミュレーションと実機実験	32
7.1	実験1(マルチレート化に関するシミュレーション)	33
7.2	実験2(マルチレート化に関する実験)	34
7.3	実験3(姿勢制御に関するシミュレーション)	38
7.4	実験4(姿勢制御に関する実験)	38
第8章	まとめと今後の課題	41
8.1	まとめ	41
8.2	今後の課題	42
	参考文献	43
	謝辞	45
	論文目録	47

第1章 緒言

1.1 研究背景と目的

従来、工場では生産コストの削減を目的とし、同じ製品を多量に生産する「少品種多量生産」が行われてきた。そのため、工場では作業効率を向上するために作業を分担し、各々の作業工程で専用のロボットが決められた作業を行っている現状があった。しかし、近年社会ではあらゆる面での多様化が進んでおり、産業界においても現在の生産コストの削減を目的とした「少品種多量生産」だけでは多様化するニーズに柔軟に対応していくことが困難になりつつあるため、「多品種少量生産」または「変種変量生産」へ産業形態の移行が余儀なくされている。しかしながら、多様な要求に応えるために生産サブラインを設けることや複数のロボットを使用することはコストの問題を引き起こし、多自由度のロボットを使用しても扱う製品の大きさなどにより行える作業には限りがある。また、人の作業が入ることはコストの面でも時間の面でも問題がある。したがって、これからの工場で利用されるロボットは、多様な作業が実現できる柔軟性を求められるため、決められた作業のみを行っている従来のロボットではそれらに対応できなくなりつつある。

このような問題の一解決方法として、構造の組み替えが容易なロボットシステム [1, 2] が注目されている。構造の組み替えを容易とすることで、様々な要求に応えることができ、かつ状況変化に対しても柔軟な対応が可能となる。さらに、故障に対しても故障箇所のみを取り替える事で迅速な作業復帰が行えるという利点も有する。

これらを背景に、我々は生産現場で利用されることの多いロボットアームに対して、構造の組み替えを前提とした構造可変型ロボットシステムを提案している。我々の提案する構造可変型ロボットは、従来のロボットアームを関節ごとに分割した「モジュール」をあらかじめ構成しておき、それらを組み替える事で新たなロボットを構成し、様々な作業や環境に対応する。また、モジュールはそれぞれが、機構、機能が異なるものとし、作業や環境に応じて必要なモジュールを選択し、多様なロボットを構成可能にしていくことを目指している。他研究でも、構造の組み替えを前提とするロボットシステムとして、単一規格のキューブとリンクモジュールから構成されるモジュール型

ロボットシステム [1] や、セル構造化ロボット [2] などが提案されてはいるが、これらのシステムはモジュールが限定されている点が我々の提案と異なる。そのため、提案する構造可変型ロボットシステムは、より多様な組み合わせのロボットが構成可能であることに期待できるが、その分、構造の変更による制御システムの対応が複雑化する。したがって、このようなシステムを実現するためには、構造の組み替えの対応を単純化し、柔軟に対応可能なシステムを構成する必要がある。

これらを踏まえて、先行研究では、構造可変型ロボットに適した制御システムとして、中央制御部と分散知能を配置する分散制御システムが提案されている [3, 4]。この分散制御システムは、運動学を解き、各関節への指令を生成する中央制御部とその指令にしたがって各関節を制御する複数の分散知能を構成することで計算の集中を回避し、構造の組み替えに対する対応を簡単化している。各分散知能では、各関節の応答特性が構造に依存しないように制御器パラメータを自律的に更新することで、モジュールを変更したときに生じる応答特性の変化を解消している。そして、中央制御部で使用する逆運動学では、一般的な逆運動学として必要となるヤコビ行列の逆行列を使用しない逆運動学の解法である仮想速度伝播アルゴリズム (VVTA) や仮想位置伝播アルゴリズム (VPTA) が考案されている [3, 4, 5]。これらの運動学は、構造の組み替えによる計算式の変更が容易であり、モジュールの変更に対する煩わしさを解消している。先行研究では、これらを用いた分散制御システムによって、構造可変型ロボット単体の手先位置の制御システム、そして、力センサの使用を前提とした力制御システムが考案されており、シミュレーション、実機実験において有効性が確認されている。また、さらに多様かつ汎用性の高い作業を実現するために、複数体の構造可変型ロボットで一つの作業を共有する協調作業を可能とする制御アルゴリズム [5] が考案されており、シミュレーション、実機実験において有効性が確認されている。

本研究では先行研究で提案された制御システムをさらに応用し、構造可変型ロボットを用いて、多様な作業を達成することを目指す。そこで、構造可変型ロボットに対してマルチレートサンプリング制御を適用する。つまり、分散制御システムの利点を活かし、分散知能だけ可能な限り短いサンプリング周期で制御することで、外乱抑圧特性の向上とロバスト性の向上や加速度次元における制御帯域の広帯域化が行える。そのため、マルチレートサンプリング制御の適用によって構造可変型ロボットシステムは、さらに多様かつ汎用性の高い作業の実現が期待できる。

さらに、本研究では、協調作業に対するさらなる付加価値として協調把持物体の姿勢制御について検討する。まず、ビジョンなど新たなセンサを用いず、構造の組み替え

に煩雑さを伴わないことで，構造の組み替えに対して対応が容易，かつマルチレートサンプリング制御との対応が容易である姿勢情報の推定法を提案する。そして，姿勢情報をフィードバックし，機能空間における位置制御と置き換えることによって，構造の組み替えに適した協調制御システムとの対応を単純化し，多様な要求を達成可能な制御システムが構築する。

最後に，提案するシステムの有効性を，構造の変更を模擬したロボットを用いた実機実験を行い，提案する制御システムの有効性を確認する。

1.2 論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。まず第 2 章において本研究で対象とする構造可変型ロボットの概要について説明する。この章では，構造の組み替えを行うために重要な要素となる電力・情報の無接触伝送，分散知能，中央制御部を搭載した構造可変型ロボットを紹介し，それぞれの役割を簡単に説明する。第 3 章では，先行研究の中央制御部と分散知能の制御システムについて説明し，構造の組み替えによって自律的に制御システムを更新する方法や，構造可変型ロボットに適した逆運動学である仮想速度伝播アルゴリズムについて説明する。そして，第 4 章において本研究で用いる機能性に基づいた協調制御システム [10] について説明する。次に，第 5 章では従来における制御手法であるシングルレートサンプリング制御を説明した後，構造可変型ロボットに対しマルチレートサンプリング制御を適用について述べる。第 6 章では，構造可変型ロボットシステムとの対応が容易な協調把持物体の姿勢情報の推定法について説明した後，姿勢制御についても述べる。そして，第 7 章で提案する制御システムの有効性を，構造可変型ロボットを模擬した実機システムを用いた実験によって確認する。最後に，第 8 章で本研究におけるまとめと今後の課題を述べる。

第2章 構造可変型ロボットの概要

構造の組み替えを前提とするロボットを構築する際、ロボットの機構や制御システムは、組み替えに対して柔軟に対応することが求められる。そこで、電力・情報の無接触伝送、分散知能、中央制御部を搭載することで組み替えに対応するロボットの制御システムを提案している。この章では、これらについて簡単に説明し、構造可変型ロボットの概要を説明する。

2.1 構造可変型ロボットの構造

提案する構造可変型ロボットの基礎構造を図 2.1 に示す。

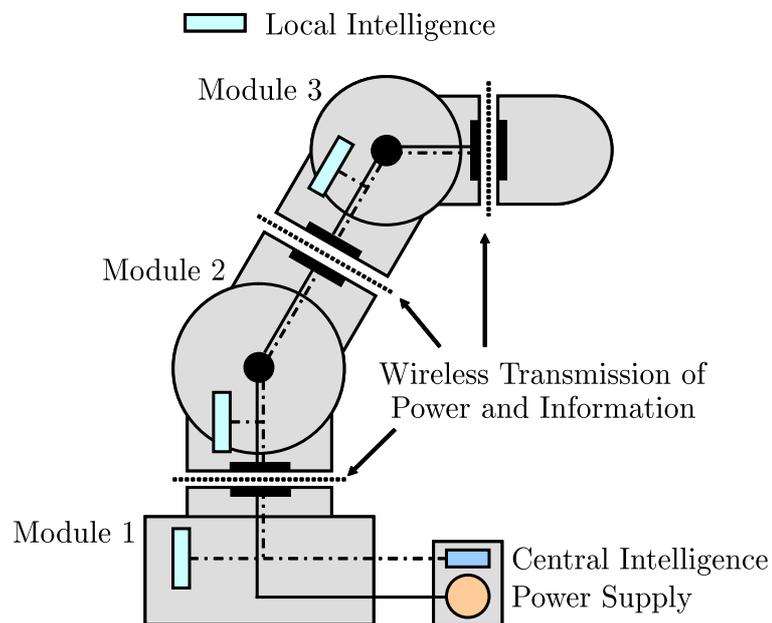


図 2.1: 構造可変型ロボットの構造

図 2.1 に示されるように、構造可変型ロボットは中央制御部 (Central Intelligence) と組み替え可能な複数のモジュールから成り立っている。各モジュールは、電磁誘導に

よる無接触伝送によって電力と情報が伝送されるため、物理的な配線につながれておらず容易に構造を組み替えることができる。

また、各モジュールは分散知能 (Local Intelligence) を持っており、それぞれの物理パラメータを保持する。そのため、構造を組み替えたときや故障したときなど必要に応じて中央制御部と情報の送受信を行うことにより、様々な作業や環境への対応が可能となるほか、故障したときにも故障箇所のみを組み替えることで迅速な作業復帰を可能とする。また、無接触伝送は、配線の接続による磨耗や動作範囲の制限といった問題も解決する。さらに、この分散知能では自律的に制御器のゲインを調整し、各モジュールのアクチュエータの速度制御を行うことで構造の組み替えに対応する。中央制御部は、構造可変型ロボット全体を統括する役割を担い、各分散知能への指令を生成する。

2.2 構造可変型ロボットの制御システムの概要

組み替えに対して柔軟に対応するために、構造可変型ロボットの制御システムでは中央制御部と分散知能を配置している。その関係を図 2.2 に示す。

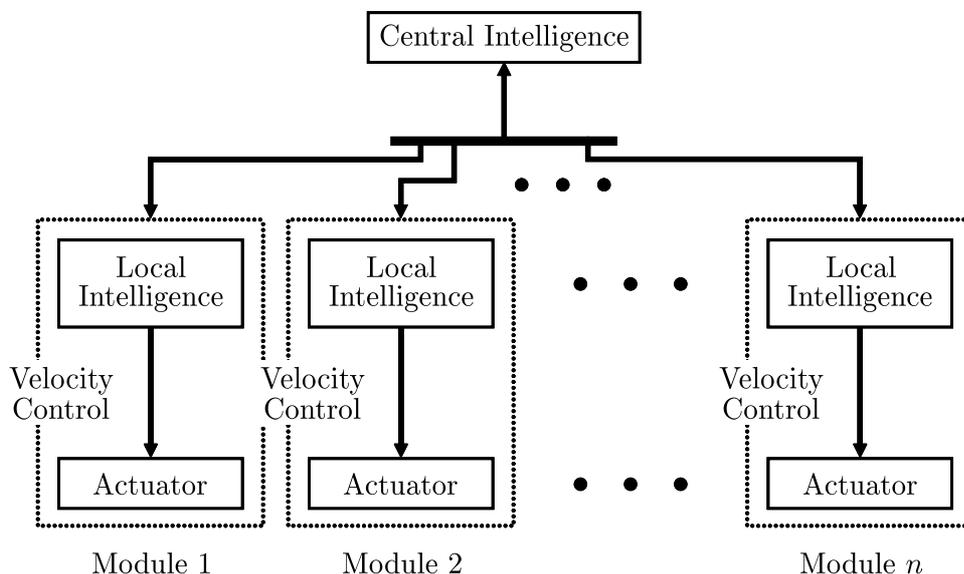


図 2.2: 構造可変型ロボットのシステム図

分散知能では、それぞれの物理パラメータを保持しており、構造を組み替えたときや故障したときなど必要に応じて中央制御部と情報の送受信を行うことで、構造を組み替えたときに新たなモジュールに関する情報を操作者が入力するという煩わしい作

業を解消している。また，この分散知能では自律的に制御器のゲインを設計する速度制御システムが構築されているため，構造に依存しない応答特性を得ることが可能である。

また，中央制御部は，構造可変型ロボット全体を統括する役割を担っている。具体的には，接続されるモジュールを認識し，作業の変更に対して適切なモジュール，中央制御部のコントローラを選択などを行う。

このように，アクチュエータの制御と指令を生成する部分に制御システムを分散することで，組み替えに対して簡単な対応である制御システムが構築できる。第 3 章で，先行研究で提案されている分散知能と中央制御部の制御システムの詳細について述べる。

2.3 電力・情報の無接触伝送 [3]

構造可変型ロボットにおける電力・情報の無接触伝送について簡単に説明する。電力・情報の無接触伝送は図 2.3 のようなインバータとコンバータ，トランスを用いた回路となる。結合部はトランスにより電氣的に無接触なので組み替えの繰り返しによる劣化の影響を受けない。またトランスの形状を円状にすることでアームの動作範囲が格段に向上する。また情報の無接触伝送については電力線と同じ配線上に信号を乗せて送信する方法と別のトランスを使用して送受信する方法がある。電力の無接触伝送はモジュール間の微小空間を介して電力を供給するため通常の配線に対して効率が悪化することが考えられるが，トランスの種類，形状または共振型インバータ回路にするなど工夫することで効率はそれほど低下しない。

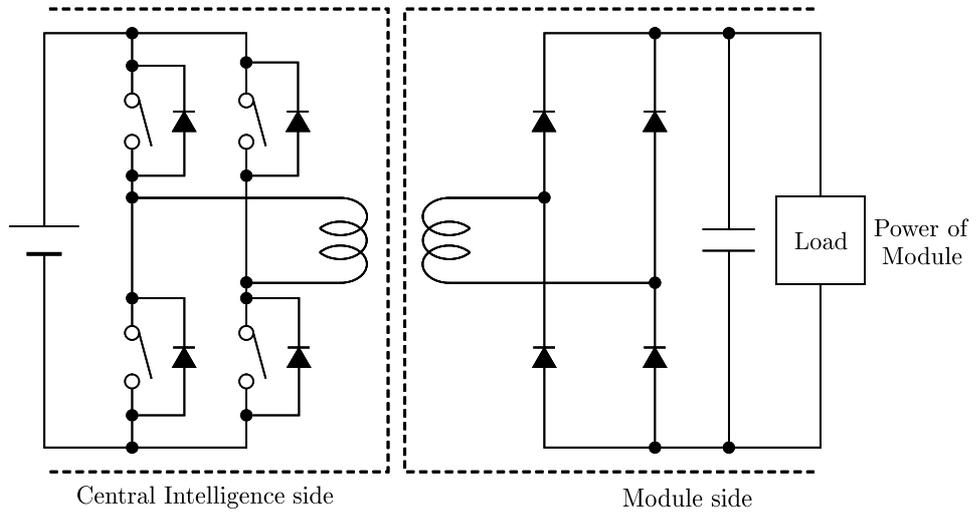


図 2.3: 電力・情報の無接触伝送

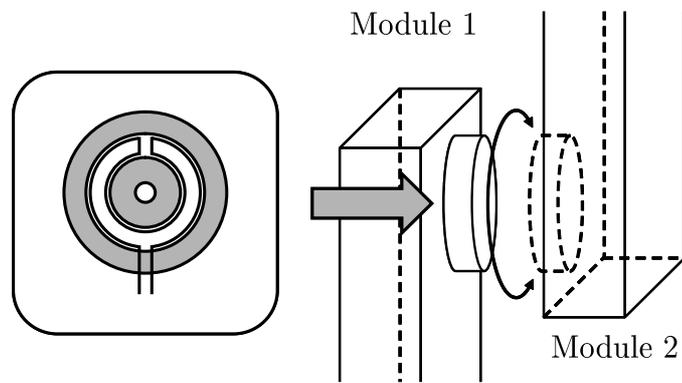


図 2.4: モジュール接続イメージ図

第3章 構造可変型ロボットシステム

前章では、分散知能と中央制御部を配置する構造可変型ロボットに適した制御システムの概要について述べた。本章では、それらに対して提案されている先行研究の制御システムについて詳しく説明する。

なお、本章以降、手先の位置 x 、速度 \dot{x} 、加速度 \ddot{x} 及び力 f のように直交座標系で定義する空間を作業空間、各アクチュエータの角度 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 、角加速度 $\ddot{\theta}$ 及びトルク τ のように回転座標系で定義する空間を関節空間と呼ぶものとする。

また、パラメータの上添え字 \bullet^{cmd} は指令、 \bullet^{ref} は指令と応答の差を制御器に通して計算した参照入力、 \bullet^{res} は応答、 \bullet^{dis} は外乱を表すものとする。

3.1 中央制御部

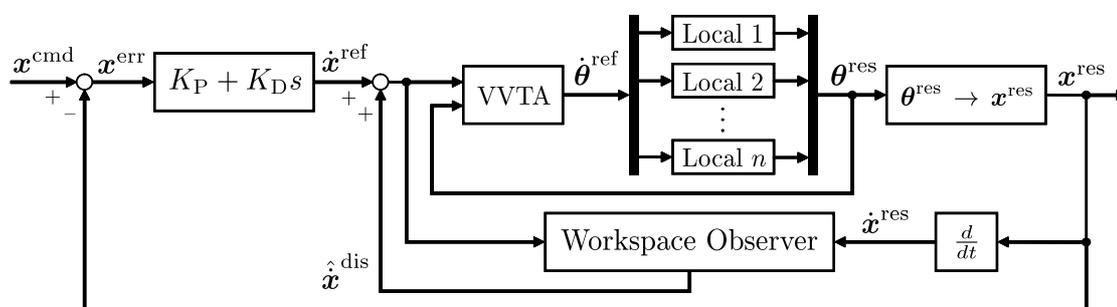


図 3.1: 中央制御部 (手先の位置制御システム)

中央制御部は、構造可変型ロボット全体を統括する役割を担い、各分散知能への指令を生成する部分である。例として、ロボット単体の手先の位置を制御する中央制御部のブロック図を図 3.1 に示す。中央制御部は、作業空間における手先の位置指令 x^{cmd} と手先の位置応答 x^{res} の偏差 x^{err} をフィードバック制御器に通し、速度参照入力 \dot{x}^{ref} を計算する。その後、その参照入力 \dot{x}^{ref} を仮想速度伝播アルゴリズム (VVTA) を用いて関節空間における速度参照入力 $\dot{\theta}^{\text{ref}}$ へ変換し、その参照入力を各分散知能へ送信する。そして、各分散知能から各関節の角度応答 θ^{res} を受信し、手先の位置応答 x^{res} を

順運動学により計算する。また、この手先の位置応答 x^{res} をフィードバックし、以下の小節で、図 3.1 中の分散知能、運動学、作業空間オブザーバの詳細について説明する。

3.2 分散知能

多様化する要求や環境変化に対応するためにロボットの構造を組み替える必要がある。しかし、そのロボットが有する物理パラメータは構造を組み替えるごとに変化してしまう。そこで、その都度新たに物理パラメータなどの情報を入力し、制御システムを再設計・再調整することは非常に非効率である。そのため、構造の組み替えに適した制御システムを構築するために、各モジュールに分散知能を配置する。また、分散知能はそのモジュールの物理パラメータを保持させ、必要に応じて中央制御部へ送信し、自律的に制御システムを再設計・再調整することで構造の組み替えにも柔軟に対応することが期待できる。このような制御システムとして、図 3.2 に示される速度ベースの制御システムが考案されている。次節にて、ロボットの動的な挙動を理解するために基本となる「動力学」について説明した後、この制御システムについて詳しく説明する。

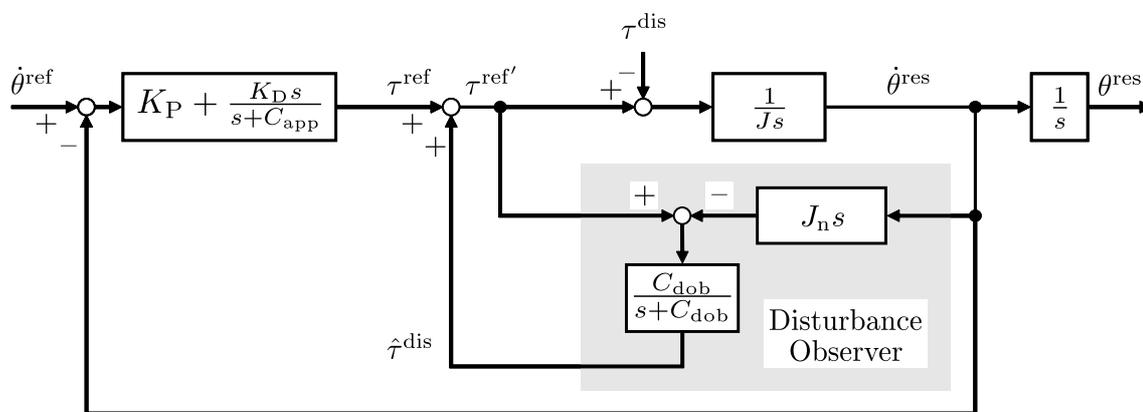


図 3.2: 分散知能 (速度制御システム)

3.2.1 ロボットアームの動力学

ロボットアームの運動方程式は、一般に、ラグランジュ法やニュートンオイラー法を用いることで、(3.1) 式のように表すことができる。

$$\tau = J(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + D\dot{\theta} + f(\dot{\theta}) + g(\theta) \quad (3.1)$$

ここで、 τ は関節トルク、 $J(\theta)\ddot{\theta}$ は慣性力項、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力及びコリオリ力項、 $D\dot{\theta}$ は粘性摩擦力項、 $f(\dot{\theta})$ は動摩擦力項、 $g(\theta)$ は重力項である。

一般に、各関節は他の関節からの干渉や摩擦などの非線形要素の影響を受けるため、各軸は複雑な動力学モデルとなる。構造は組み替えないことを前提とした従来のロボットアームでは、構造はある一つのものに固定されていたため、動力学モデルの導出が複雑であっても問題はない。しかし、構造可変型ロボットでは構造の組み替えを前提としており、組み替えるごとに複雑な動力学モデルを導出することは問題となってしまう。また、制御を行うのに必要な参照入力を計算する最適な制御器も、当然ながら組み替えごとに異なるため、その都度最適なものを設計する作業も同様に問題となる。そこで、本研究では動力学までは立ち入らず、干渉や摩擦などの非線形要素の影響をモデル(運動方程式)に基づいて推定し、簡単な運動学のみで計算でロボットアームの制御を行い、制御器パラメータに関しても単純な代数計算のみで自律的に更新可能な制御方法を提案している。それゆえ、以下の小節では、提案されている分散知能、中央制御部の制御システムについて説明する。

3.2.2 外乱オブザーバ

分散知能における速度制御システムでは、外乱オブザーバを適用している。そこで、外乱オブザーバについて説明するために図 3.3 について考える。ここで、図 3.3 はある一つのモジュールにおける分散知能のブロック図であるが、構造の異なるモジュールが持つ分散知能においても同様のブロック図が得られる。

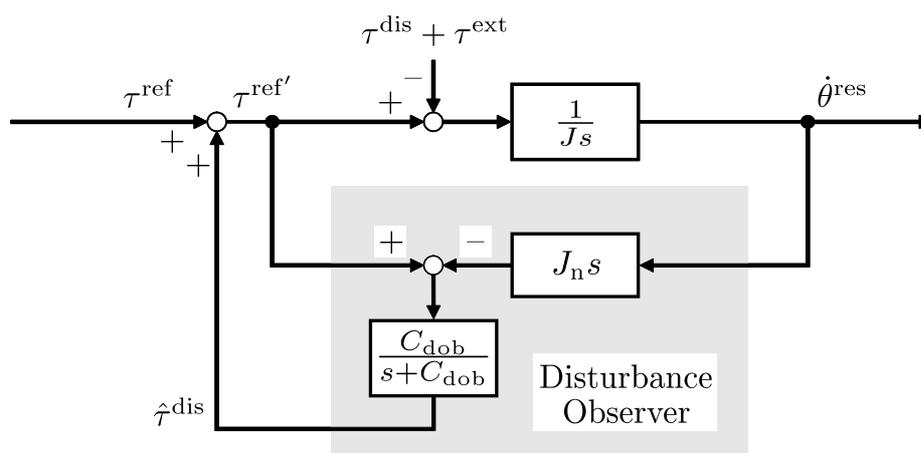


図 3.3: 外乱オブザーバ

ここで，図 3.3 中の τ^{dis} は，動力学モデルとして示した (3.1) 式における相互慣性力項 $\{I - \text{diag} \hat{J}(\theta^{\text{res}})\} \ddot{\theta}^{\text{res}}$ ，遠心力及びコリオリ力項 $h(\theta, \dot{\theta})$ ，粘性摩擦力項 $D\dot{\theta}$ ，クーロン摩擦力項 $f(\dot{\theta})$ ，重力項 $g(\theta)$ のすべての情報を含んだ外乱であり， τ^{ext} はロボットに外力が加わったときの外力トルクである。このブロック図では，アクチュエータのトルク参照入力 τ^{ref} とアクチュエータの角速度応答 $\dot{\theta}^{\text{res}}$ を微分しノミナル慣性 J_n を乗じたものとの差をとりローパスフィルタを通すことによって，推定外乱 $\hat{\tau}^{\text{dis}}$ を算出する。このとき，推定外乱 $\hat{\tau}^{\text{dis}}$ は (3.2) 式のように推定される。

$$\hat{\tau}^{\text{dis}} = \frac{C_{\text{dob}}}{s + C_{\text{dob}}} \left\{ (J - J_n) s \dot{\theta}^{\text{res}} + \tau^{\text{dis}} + \tau^{\text{ext}} \right\} \quad (3.2)$$

ここで， C_{dob} は外乱オブザーバのローパスフィルタのカットオフ周波数である。この推定外乱を用いて図 3.3 のようにフィードフォワード補償を行うと (3.3) 式が算出できる。

$$\dot{\theta}^{\text{res}} = \frac{1}{J_n s} \left\{ \tau^{\text{ref}} - \frac{s}{s + C_{\text{dob}}} (\tau^{\text{dis}} + \tau^{\text{ext}}) \right\} \quad (3.3)$$

(3.3) 式より， $\tau^{\text{dis}} + \tau^{\text{ext}}$ にはハイパスフィルタが付加されていると考えることができるため，外乱オブザーバのカットオフ周波数 C_{dob} 以下において，その項はほぼ無視することができる。すなわち，逆動力学を計算せずに干渉や摩擦などの非線形項を補償することができ，制御対象はノミナル慣性 J_n に固定される。また，外乱オブザーバの補償が十分に行われていると仮定すると，図 3.3 中のトルク参照入力 τ^{ref} から角速度応答 $\dot{\theta}^{\text{res}}$ までの伝達関数は $\frac{1}{J_n s}$ になる。そのため，図 3.2 のブロック線図において，関節空間の角速度参照入力 $\dot{\theta}^{\text{ref}}$ からアクチュエータの角速度応答 $\dot{\theta}^{\text{res}}$ までの伝達関数は (3.4) 式のようになる。

$$\dot{\theta}^{\text{res}} = \frac{(K_P + K_D)s + K_P C_{\text{app}}}{J_n s^2 + (J_n C_{\text{app}} + K_P + K_D)s + K_P C_{\text{app}}} \dot{\theta}^{\text{ref}} \quad (3.4)$$

(3.4) 式には，リンク間の干渉や慣性変動による項が含まれていないため，速度制御システムのコントローラ設計を簡単に行うことができる。

このように，各モジュールの分散知能に外乱オブザーバを適用することで，構造を組み替えたときの速度制御システムの設計問題を簡単に扱うことができる。そして，ロボットの構造を組み替えたとき，中央制御部は各分散知能からリンク長，質量などの物理パラメータを収集し，適切なノミナル慣性 J_n を算出し，各分散知能へ送信する。各分散知能はそのノミナル慣性を用いて，次節で述べる係数図法により適切な制御器のゲインを更新する。

3.2.3 係数図法 [4]

図 3.2 に示されている制御器のゲイン (K_P, K_D) の設計については、文献 [4] で考案されている係数図法を用いることで簡単な代数計算により設計を行うことが可能である。そこで、係数図法について簡単に説明する。

ある制御システムの伝達関数 $G(s)$ を次式のように定義する。

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_j s^j + \cdots + b_1 s + b_0}{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \cdots + a_j s^j + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (3.5)$$

このとき、特性方程式 $D(s)$ は制御システムの安定性や過渡応答などの重要な特性を表現している。係数図法では、特性方程式を良い応答が得られている形に沿って制御システムを設定していく。ここで、安定性に関わる安定度指標 γ_j 、整定時間に関わる等価時定数 τ_v を (3.6), (3.7) 式で与える。

$$\gamma_j = \frac{a_j^2}{a_{j+1} a_{j-1}} \quad (3.6)$$

$$\tau_v = \frac{a_1}{a_0} \quad (3.7)$$

安定度指数 γ_j の与え方の指針として、(3.8) 式で表される標準形がある。

$$\gamma_1 = 2.5, \quad \gamma_{n-1} = \gamma_{n-2} = \cdots = \gamma_2 = 2 \quad (3.8)$$

標準形では安定性や応答性が非常に優れた特性となるため、本研究では標準形を中心に制御器を設計する。係数図法に従って図 3.2 の制御器のゲイン K_P, K_D を求めると以下のようなになる。

$$\gamma_1 = \frac{(J_n C_{\text{app}} + K_P + K_D)^2}{J_n K_P C_{\text{app}}} \quad (3.9)$$

$$\tau_v = \frac{J_n C_{\text{app}} + K_P + K_D}{K_P C_{\text{app}}} \quad (3.10)$$

これらの式を K_P, K_D について整理すると、

$$K_P = \frac{J_n \gamma_1}{C_{\text{app}} \tau_v^2} \quad (3.11)$$

$$K_D = J_n \frac{\gamma_1 C_{\text{app}} \tau_v - C_{\text{app}}^2 \tau_v^2 - \gamma_1}{C_{\text{app}} \tau_v^2} \quad (3.12)$$

となる。この (3.11), (3.12) 式を用い、 γ_1 を標準形とし、 τ_v を仕様により決定することで簡単に制御器のゲインを決定できる。

このような手順で設計された速度制御システムは以下のような応答として表せる。

$$\dot{\theta}^{\text{res}} = G_L(s)\dot{\theta}^{\text{ref}} \quad (3.13)$$

$$G_L(s) = \frac{(2.5 - C_{\text{app}}\tau_v)\tau_v s + 2.5}{\tau_v^2 s^2 + 2.5\tau_v s + 2.5} \quad (3.14)$$

また，外乱オブザーバで各リンクが非干渉化されていると仮定するならば，以下の式が成り立つ。

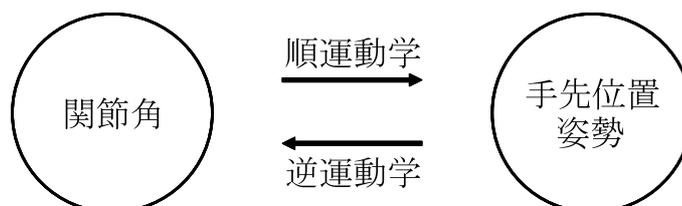
$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^{\text{res}} \\ \dot{\theta}_2^{\text{res}} \\ \vdots \\ \dot{\theta}_n^{\text{res}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & G_L(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^{\text{ref}} \\ \dot{\theta}_2^{\text{ref}} \\ \vdots \\ \dot{\theta}_n^{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\dot{\theta}^{\text{res}} = G_L(s)\dot{\theta}^{\text{ref}} \quad (3.16)$$

外乱オブザーバの補償が十分に行われる範囲においては，どのようなモジュールに対しても (3.16) 式が成り立ち，ロボットの構造を意識する必要がない。この点が，構造可変型ロボットに対して速度ベースの制御システムを持つ分散知能を構成する利点となる。

3.3 ロボットの運動学

ロボットの制御を行う上で、ロボットの運動学を解く必要がある。図 3.4 で示すように各関節角から手先位置・姿勢を求めることを順運動学、これとは対称的に手先位置・姿勢から各関節角を求めることを逆運動学という。



※逆運動学の解は一意的に求まらない
解析的には必ずしも解けない

図 3.4: ロボットの順運動学と逆運動学

一般的に、様々な組み合わせにより考えられるロボットの機構の各関節角と手先位置・姿勢を求める方法として Denavit-Hartenberg の表記法 (DH 法) がある。本研究でも、この手法を用いて運動学を解いているのだが、手先位置・姿勢から各関節角を求める逆運動学は、DH 法から生成されるヤコビ行列の逆行列を用いるため計算量が増えすぎてしまい構造可変型ロボットには欠点となってしまふ。そこで、我々はヤコビ行列を用いることなく簡単な制御量の伝播によって逆運動学を解く仮想速度伝播アルゴリズム (VVTA : Virtual Velocity Transmission Algorithm) を提案している。そのため、以下で VVTA について詳しく説明する。

3.3.1 構造可変型ロボットに適した逆運動学

図 3.5 のように座標を定義する。 $i + 2$ 番目の関節に (3.17) 式に示される基準座標系 Σ_0 における速度参照値 \dot{x}_0^{ref} が与えられたとする。

$$\dot{x}_0^{\text{ref}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_0^{\text{ref}} & \dot{y}_0^{\text{ref}} & \dot{z}_0^{\text{ref}} \end{bmatrix}^T \quad (3.17)$$

この速度参照値は、座標系 Σ_0 であるので座標系 Σ_{i+2} に変換すると、

$$\dot{x}_{i+2}^{\text{ref}} = {}^{i+1}R_{i+2} \cdots {}^1R_2 {}^0R_1 \dot{x}_0^{\text{ref}}$$

となる。ここで、 ${}^{i+1}R_{i+2}$ は 3×3 の座標系 Σ_{i+1} から座標系 Σ_{i+2} への回転行列である。 z 軸を中心に回転するモータに対する伝播のときは、速度参照値 $\dot{z}_{i+2}^{\text{ref}}$ は、(3.18) 式を用

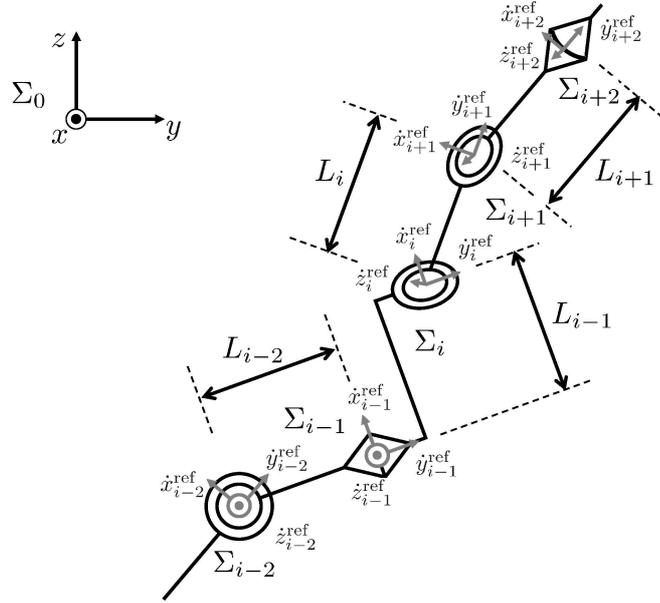


図 3.5: 関節空間における座標系

いて関節 $i + 1$ の指令となり，残りの成分の指令は (3.19) 式を用いて次の関節への指令として伝播される。

$$\dot{\theta}_{i+1}^{\text{ref}} = \dot{z}_{i+2}^{\text{ref}} / L_{i+2} \quad (3.18)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{i+1}^{\text{ref}} = {}^{i+1}\mathbf{R}_{i+2}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_{i+1}^{\text{ref}} & \dot{y}_{i+1}^{\text{ref}} & 0 \end{bmatrix}^{\text{T}} \quad (3.19)$$

また， x 軸を中心に回転するモータに対する伝播のときは，速度参照値 $\dot{x}_{i+2}^{\text{ref}}$ は，(3.20) 式を用いて関節 $i + 1$ の指令となり，残りの成分の指令は (3.21) 式を用いて次の関節への指令として伝播される。

$$\dot{\theta}_{i+1}^{\text{ref}} = \dot{x}_{i+2}^{\text{ref}} / L_{i+2} \quad (3.20)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{i+1}^{\text{ref}} = {}^{i+1}\mathbf{R}_{i+2}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & \dot{y}_{i+1}^{\text{ref}} & \dot{z}_{i+1}^{\text{ref}} \end{bmatrix}^{\text{T}} \quad (3.21)$$

このように関節から関節への速度参照値の伝播を繰り返すことで，作業空間で与えられた速度参照値を関節空間の角速度指令値へと変換する。

しかし，先に速度参照値が伝播される関節に過大な指令が与えられる可能性があり，ロボットの不安定化を招く問題が考えられる。そこで，与えられる速度参照値を手先からと根元からの 2 つに分けることを考え， α というパラメータを用いて以下のように速度参照値を分配することができる。

$$\dot{\mathbf{x}}_e^{\text{ref}} = (1 - \alpha)\dot{\mathbf{x}}^{\text{ref}} \quad (3.22)$$

$$\dot{\boldsymbol{x}}_b^{\text{ref}} = \alpha \dot{\boldsymbol{x}}^{\text{ref}} \quad (3.23)$$

ここで、 α は $0 \leq \alpha \leq 1$ とし下添え字 \bullet_e と \bullet_b は、それぞれ手先 (end effector) からの伝播を行う速度参照値と根元 (base) からの伝播を行う速度参照値である。そして、関節 i への速度参照値は次のようになる。

$$\dot{\theta}_i^{\text{ref}} = (\dot{z}_{e_{i+1}}^{\text{ref}} + \dot{z}_{b_{i+1}}^{\text{ref}}) / L_{i+1} \quad (3.24)$$

$$\dot{\theta}_i^{\text{ref}} = (\dot{x}_{e_{i+1}}^{\text{ref}} + \dot{x}_{b_{i+1}}^{\text{ref}}) / L_{i+1} \quad (3.25)$$

ここで、(3.24) 式は z 軸中心に回転するモータに対して達成する指令、(3.25) 式は x 軸中心に回転するモータに対して達成する指令である。

一般的な逆運動学の解法としてヤコビ行列の逆行列を用いた場合であれば、計算量は $O(n^2)$ に対してこのアルゴリズムでは計算量は $O(n)$ となる。そのため、関節数の増加により、計算量が急激に増加することもなく、アルゴリズムも単純であり、構造可変型ロボットに適した逆運動学であるといえる。

3.4 作業空間オブザーバ

各分散知能の速度制御システムでは、外乱オブザーバを用いて制御対象をノミナル化し、係数図法を用いて安定性や整定時間を考慮した制御器のゲインの設計を行っているが、実際の応答はノミナル応答 ((3.16) 式) に対して必ず偏差が存在する。さらに、前節で説明した VVTA による逆運動学は速度参照値の座標変換において完全な変換が行われているとは限らず、各関節に角速度指令値を生成した際、最終的に伝播が行われずに余りとなってしまいう速度参照値が存在する。そこで、ノミナル応答と実応答の偏差や VVTA によって生じた余りの速度参照値を外乱 $\dot{\boldsymbol{x}}^{\text{dis}}$ とし、外乱を推定・補償するために作業空間オブザーバを導入する。

作業空間オブザーバでは、図 3.1 における速度参照値 $\dot{\boldsymbol{x}}^{\text{ref}}$ と、速度応答値 $\dot{\boldsymbol{x}}^{\text{res}}$ を (3.26) 式のように計算することで推定外乱 $\hat{\boldsymbol{x}}^{\text{dis}}$ を求める。

$$\hat{\boldsymbol{x}}^{\text{dis}} = \frac{C_{\text{wob}}}{s + C_{\text{wob}}} \{ \dot{\boldsymbol{x}}^{\text{ref}} - G_L^{-1}(s) \dot{\boldsymbol{x}}^{\text{res}} \} \quad (3.26)$$

ここで、 C_{wob} は作業空間オブザーバのローパスフィルタのカットオフ周波数であり、この周波数以下の外乱が補償される。

また, (3.16) 式が成り立っており, 作業空間オブザーバでの補償が十分に行われていると仮定すると作業空間では次式が成り立つ。

$$\boldsymbol{x}^{\text{res}} = \frac{(2.5 - C_{\text{app}}\tau_v)\tau_v s + 2.5}{\tau_v^2 s^2 + 2.5\tau_v s + 2.5} \cdot \frac{1}{s} \boldsymbol{x}^{\text{ref}} \quad (3.27)$$

(3.27) 式は, 速度参照値 $\dot{\boldsymbol{x}}^{\text{ref}}$ が与えられたときの位置応答値 $\boldsymbol{x}^{\text{res}}$ が構造の変更に依存せず, 常に同じ形で表されることを示す。

以上が, 先行研究で確立されている構造可変型ロボットシステムである。それでは, 本研究の目的である構造可変型ロボットに対するマルチレートサンプリング制御を適用, 並びに協調把持物体の姿勢制御について説明する上で, 協調作業が必要となるため, まず次章では先行研究における複数体の構造可変型ロボットを用いた機能性に基づく分散制御について説明する。

第4章 機能性に基づいた分散制御 [4][10]

本論文では、提案する制御システムで多様な協調作業を実現することを目的として、先行研究で提案されていた制御システムを応用する。その準備として本章では先行研究で提案されている「機能性に基づいた分散制御」について説明する。なお、本章以降、パラメータの下添え字 \bullet_r は作業空間におけるパラメータ、下添え字 \bullet_f は機能性を用いるために新たに導入する機能空間を示すものとする。

4.1 機能性に基づく制御

まず、文献 [4] で提案されている「機能性に基づく分散制御システム」の概要について簡単に説明する。

この手法は、複数のロボットを用いる協調作業を対象とする制御システムであり、「複数の作業の最小要素」を「機能」と定義し、その「機能」を組み合わせることで要求される「複数の作業」に対応を可能とする制御システムである。そのため、操作者はあらかじめ複数の「機能」を想定し、作成する必要があるが、構造の組み替えに対して「機能」を作成し直すことはないので問題とならない。また、構造可変型ロボットシステムでは外乱オブザーバと係数図法を用いることで各アクチュエータの応答特性は構造に依存しないものとして得られるため、各機能を互いに独立に定義でき、複数の機能を同時かつ独立に制御することができる。

4.2 構造可変型ロボットに適した機能性に基づく分散制御システム [10]

「機能性に基づく分散制御」を中央制御部へ組み込んだ制御システムの概略を図 4.1 に示す。

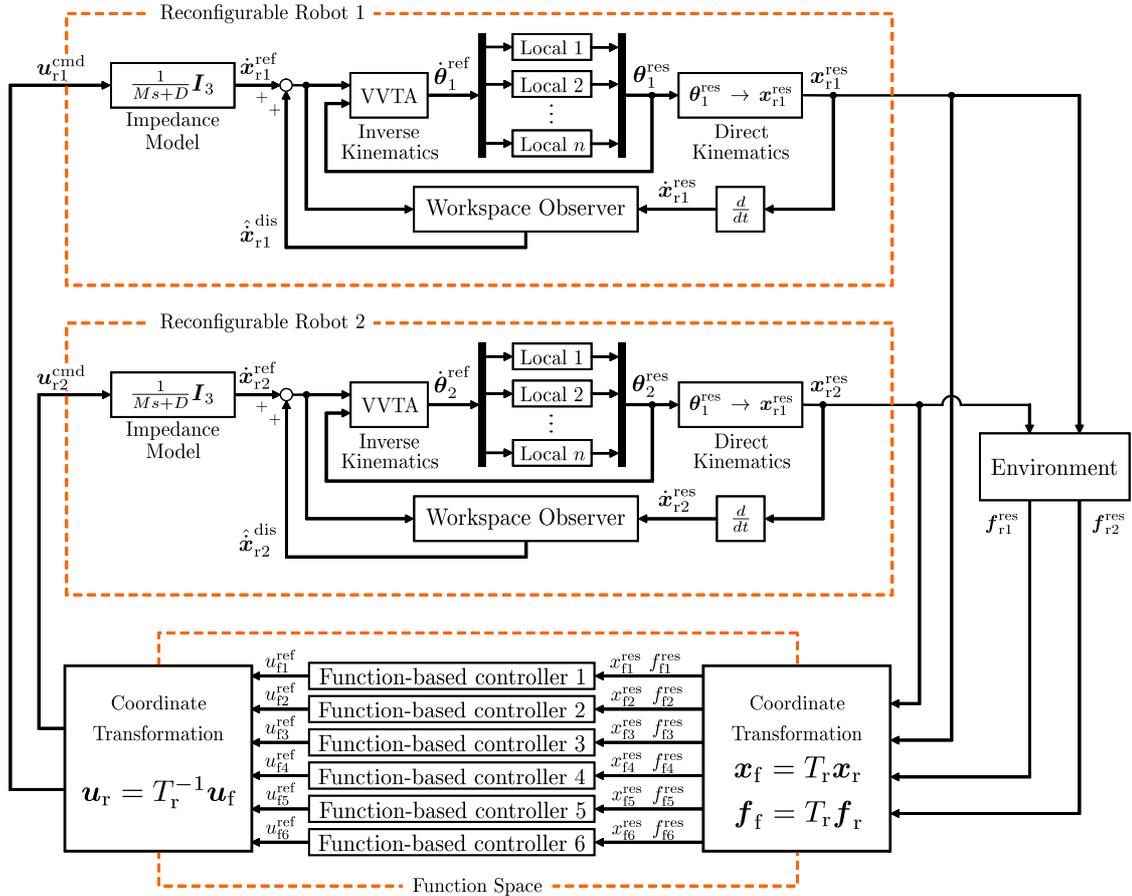


図 4.1: 協調把持制御システム

図 4.1 では、2 体のロボットの手先の位置応答値 x_{r1}^{res} , x_{r2}^{res} や反力値 f_{r1}^{res} , f_{r2}^{res} に対して、それぞれの作業に適した情報を座標変換することで、各作業情報 x_f^{resi} , f_f^{resi} が生成され、各機能に基づく制御器へ入力される。そして、それらの制御器を経て機能空間上での制御入力 u_f^{refi} が生成され、再び座標変換することによって作業空間における 2 体のロボットの制御入力 u_{ri}^{ref} となる。機能に基づく制御器は、文献 [5] にならい、位置制御を行うときは PD 制御器となり、力制御を行うときは P 制御器となる。なお、この概略図では位置と反力による制御入力のみ座標変換を行っているが、速度応答値 \dot{x}_{ri}^{res} 、加速度応答値 \ddot{x}_{ri}^{res} も同様に座標変換が行われる。

ここで、速度参照 \dot{x}_{ri}^{ref} の導出として、位置指令 x_{ri}^{cmd} と位置応答 x_{ri}^{res} との偏差 x_{ri}^{err} を PD 制御器に通してした部分が、機能性に基づく分散制御システムでは機能に基づく制御器とインピーダンスモデルへと変更されている点が従来の構造可変型ロボットの制御システムと異なる。そして、2 体のロボットの手先位置 $x_{r1}^{res} = [x_{r1}^{res} \ y_{r1}^{res} \ z_{r1}^{res}]^T$,

$\mathbf{x}_{r2}^{\text{res}} = [x_{r2}^{\text{res}} \ y_{r2}^{\text{res}} \ z_{r2}^{\text{res}}]^T$ は自由度がそれぞれ 3 つずつであるので、合計で自由度は 6 つ存在する。そのため、6 つの機能を独立に制御することが可能となり、図 4.1 中の変換行列 T_r の構造は 6×6 の行列となる。そして、図 4.1 では手先の位置と反力しか座標変換を行わないように見えるが、実際では様々な作業に応じて座標変換を行っており、機能変更するときにあらかじめ生成された機能に基づく制御器を組み替えている。また、図 4.1 中のインピーダンスモデルは、分散知能で速度ベースの制御を行うため、力次元の制御入力 $\mathbf{u}_{ri}^{\text{ref}}$ を速度次元の参照入力 $\dot{\mathbf{x}}_{ri}^{\text{ref}}$ へ変換している。これにより、各ロボットの手先はインピーダンスパラメータ M, D により指定されたインピーダンスを持つように振舞う。また、このインピーダンスモデルは 1 次のローパスフィルタであり、作業変更するときの制御器の組み替えにより $\mathbf{u}_{r1}^{\text{ref}}, \mathbf{u}_{r2}^{\text{ref}}$ が不連続に変化しても $\dot{\mathbf{x}}_{ri}^{\text{ref}}$ を滑らかにすることができる。

第5章 構造可変型ロボットにおけるマルチレートサンプリング制御

前章では、多様な作業を行うことや複雑な環境化においても動作を実現するために、先行研究で提案された複数体の構造可変型ロボットを用いた協調制御システムについて説明した。しかし、協調作業などの高度な作業を行うために、手先の位置や環境からの反力を正確に得る必要がある。また、協調作業は物体との接触動作を対象とするため速応性が重要となり、力覚を正確に再現するためには加速度次元における制御帯域が広いことが要求される。そして、このような要求を満たすためにはサンプリング周期を短くすることが有効であると知られている。そのため、本章では、マルチレートサンプリング制御を適用した構造可変型ロボットシステムの構築を行う。

5.1 加速度制御

本節では、マルチレートサンプリング制御を行う上で重要となる加速度制御の特徴についてサンプリング周期の観点から考察するため、図 5.1 の破線部に注目する。

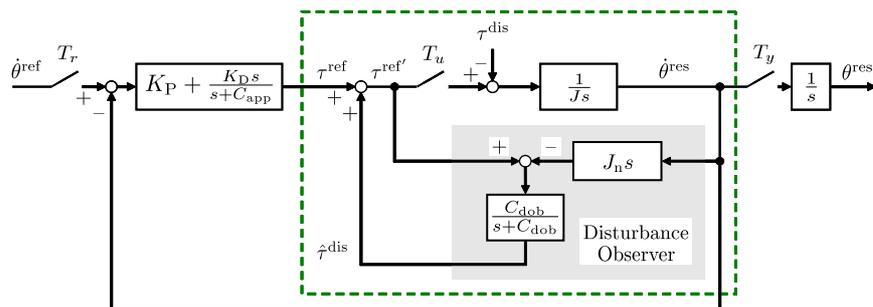


図 5.1: 分散知能制御システム

このとき、外乱トルクは (3.3) 式で表され、システムは加速度制御系となり、ロバストなモーションコントロールを行うことが可能となる。しかし、第 3 章でも述べたように実際にはすべての帯域でロバスト性が保証されているわけではなく、外乱オブザー

バのカットオフ周波数 C_{dob} によってその限界が決定される。そして、この C_{dob} は、サンプリング周期を短くすることによって高い値に設定できることが知られている。また、実際のシステムで得られる出力情報はエンコーダからの角度情報である。すなわち、加速度情報を得るためには 2 度の微分演算が必要となる。しかし一般に、取得されるデータにはノイズが混入しているため、微分値を直接求めることは困難である。そこで、(5.1) 式のようにローパスフィルタを用いて近似的に微分値を求める手法を用いる。

$$\hat{\theta}^{\text{res}} = \frac{C_{\text{enc}}}{s + C_{\text{enc}}} s\theta^{\text{res}} \quad (5.1)$$

ここで、 C_{enc} はローパスフィルタのカットオフ周波数を表す。すなわち、外乱オブザーバを用いて加速度制御を実現する場合には、出力信号は 2 つのローパスフィルタを通る。一方、ローパスフィルタを通ったデータは元のデータと比較して遅れていることを考慮すると、エンコーダ情報から計算された加速度情報は取得された角度情報に対して遅れていることは明らかである。加速度制御においては、遅れを持った入力を短い周期で与えるより、短い周期で出力情報を取得することによって加速度情報の遅れを低減することが重要である。そのため、制御システムにおけるサンプリング周期を可能な限り短くすることを考え、次節では、まず従来手法で適用していたシングルレートサンプリング制御について説明する。

5.2 シングルレートサンプリング制御

制御システムにおけるサンプリング周期を可能な限り短くするにあたり、はじめに従来制御であったシングルレートサンプリング制御について説明するため、図 5.1 に注目する。ここで、それぞれのサンプリング周期は以下の通りである。

- T_r … 中央制御部からの出力におけるサンプリング周期
A/D 変換器の速度や中央制御部との通信速度により上限が決定
- T_u … 制御入力におけるサンプリング周期
D/A 変換器の速度により上限が決定
- T_y … 中央制御部への入力におけるサンプリング周期
中央制御部との通信速度により上限が決定

また、シングルレートサンプリング制御では、それぞれのサンプリング周期は以下のような関係である。

$$T_r = T_u = T_y \quad (5.2)$$

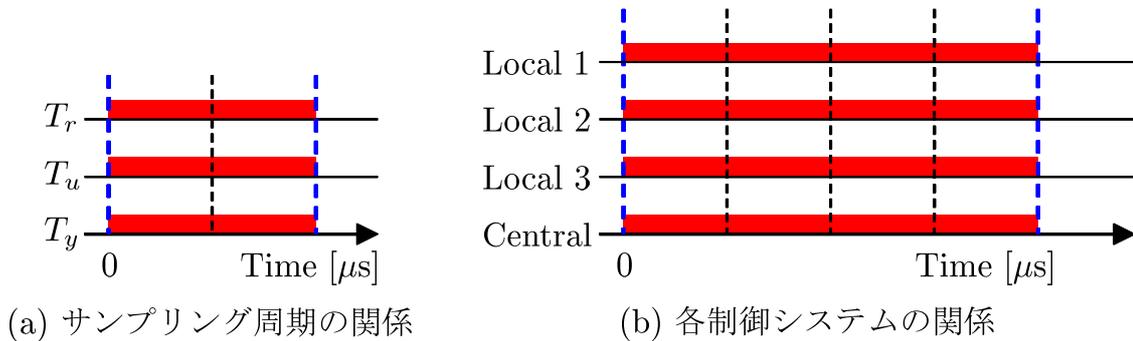


図 5.2: シングルレートサンプリング制御イメージ図

つまり，(5.2) 式，図 5.2(a) のように，すべてのサンプリング周期がある一定の値に設定されているためシングルレートサンプリング制御と言われ，中央制御部と各分散知能の関係は図 5.2(b) のようになる。

このとき，加速度次元における制御帯域の広帯域化や制御性能の観点からも可能な限り短いサンプリング周期で分散知能を制御することが求められる。しかし，シングルレートサンプリング制御では T_r ， T_u 及び T_y のうち最も長いサンプリング周期がすべてのサンプリング周期になる。つまり，各分散知能は中央制御部のサンプリング周期に統一されてしまうという問題があげられる。しかし，構造可変型ロボットシステムでは中央制御部は各分散知能を統括するなど複雑な制御を行っているのに対し，各分散知能は物理パラメータの保持と速度制御ループを持つという中央制御部と比較して簡単な制御を行っている。それゆえ，設定上各分散知能のサンプリング周期をさらに短くできる場合においても，中央制御部によって各分散知能のサンプリング周期はある一定の値を上限としてしまう。

そこで，この問題を解決するために次節では構造可変型ロボットにおいてマルチレートサンプリング制御を適用する。

5.3 本研究に適したマルチレートサンプリング制御

文献 [11] で提案されているマルチレートサンプリング制御では，入力値の更新より短い周期で出力情報を取得することを重要としている。本研究では，その考えのベースに中央制御部と各分散知能をそれぞれ異なるサンプリング周期で制御することをマルチレートサンプリング制御とし，それについて考える。

構造可変型ロボットは中央制御部と各分散知能による分散制御を行っており、それぞれ異なる CPU を保持する。そのため、各々を異なるサンプリング周期で制御することは極めて当たり前のことであり、各分散知能のサンプリング周期だけを可能な限り短くすることができる。そのため、前節と同じように図 5.1 に注目すると、それぞれのサンプリング周期は以下のような関係である。

$$T_r = nT_u \quad (5.3)$$

$$T_r = T_y \quad (5.4)$$

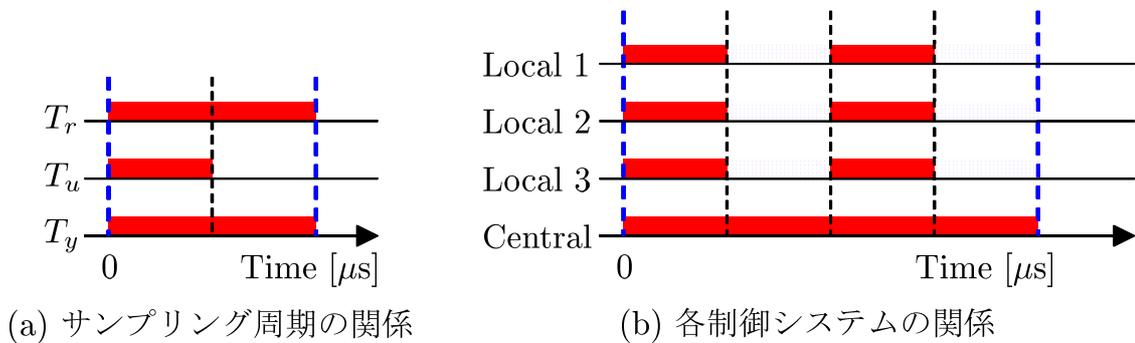


図 5.3: マルチレートサンプリング制御イメージ図

ここで、 n は 2 以上の自然数である。また、(5.4) 式、図 5.3(a) のように、中央制御部からの出力におけるサンプリング周期 T_r と中央制御部への入力におけるサンプリング周期 T_y は中央制御部と同じサンプリング周期にし、制御入力におけるサンプリング周期 T_u を可能な限り短くすることによって図 5.3(b) のようにマルチレート化を図る。また、 n 周期つまり中央制御部のサンプリング周期ごとに各分散知能と情報の送受信を行うことで、それぞれ異なるサンプリング周期で制御を行っても、他の制御システムに影響を与えない。

そして、このマルチレートサンプリング制御を行うことで以下のような利点も得られる。

- 加速度次元のローパスフィルタのカットオフ周波数 C_{enc} , C_{dob} を高く設定可能
- 外乱に対する速応性やロバスト性の向上

ここで、外乱とは相互慣性力，遠心コリオリ力，粘性摩擦力，クーロン摩擦力，重力，そして外力トルクのことである。

このように、カットオフ周波数 C_{enc} を高く設定する利点として、加速度次元の情報の遅れが低減され、制御性能の向上や力覚を正確に再現できるため力センサレス制御 [10] の精度も向上されることや、ロバストな加速度制御が実現される帯域が広くなり、ロバスト性が向上されることが期待できる。さらに、カットオフ周波数 C_{dob} を高く設定できることで、外乱を推定できる帯域が広がり、外乱オブザーバによって制御対象をノミナル化できる帯域が広がるため、制御性能の向上が図れる。また、外乱情報が短い周期で得られることで、外乱抑圧特性の向上や、外乱に対するロバスト性の向上が期待できる。

そして、これらの利点が期待されるマルチレートサンプリング制御を適用した制御システムの動作結果については、第 7 章で述べる。

第6章 姿勢制御システムの構築

現在まで、多様な動作や様々な環境に対応するために構造可変型ロボットシステムを提案してきた。しかし、産業システムにおいて協調把持物体の姿勢情報を考慮せずに制御することは、生産物の管理に関わる問題となる。これを背景に、構造可変型ロボットシステムにさらなる付加価値を持たせるために、構造可変型ロボットの協調作業を行うときにも、協調把持物体の姿勢制御を行うことが望ましい。そこで、本章では、複数体の構造可変型ロボットを用いた協調把持物体の姿勢制御システムについて検討する。

6.1 姿勢情報の推定

一般に、協調把持物体の姿勢情報を得るためにはカメラなどのビジョンを用いるもの [12] や力センサを用いて推定するもの [13][14] がある。しかし、カメラなど新たなセンサを用いた手法は多くの実機実験が他研究で行われているが、センサなどを新たに取り付けることになりコストの面やそれに応じた制御システムの構築を行わなければいけないことが問題として考えられる。また、力センサから得られた情報を用いて姿勢情報を推定する手法の多くはシミュレーションまでしか行われていない。さらに、3本指以上で協調把持物体座標を求めるため計算量の面からも構造可変型ロボットに不利となる。そのため、現在、構造可変型ロボットに用いている各モータに取り付けられているエンコーダや手先に取り付けてある力センサという既存のセンサを用いて、計算量が少なく構造の変更にも依存されない推定法が求められる。

そこで、図 6.1 について考える。図 6.1 は 2 次元平面を動作する 3 関節ロボット 2 体を用いて物体を協調把持しており、そのうち操作者から見て左側に配置されているロボット 1 体に注目したものである。ここで、 $\Sigma_{f_{\text{sensor}}}$ は手先における力センサが基準としている座標を表し、 F_x, F_z は $\Sigma_{f_{\text{sensor}}}$ における x 軸、 z 軸方向にかかる反力を表す。このとき、協調把持物体と手先の成す相対角度 θ_{diff} は、手先に取り付けられている力セ

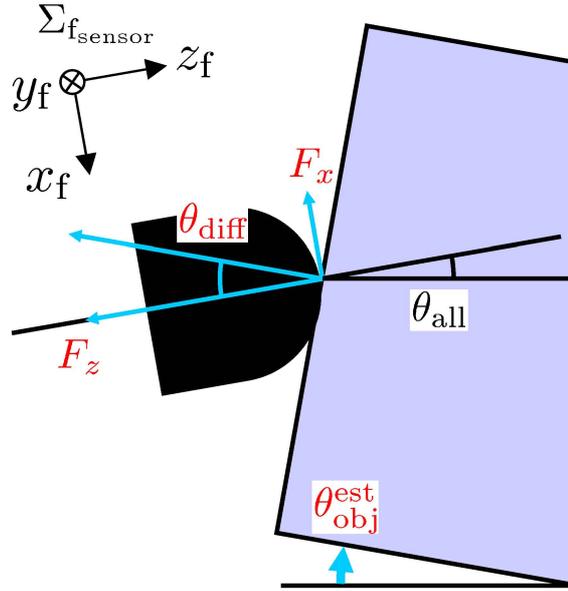


図 6.1: 協調把持物体の姿勢推定法

ンサの反力 F_x , F_z から (6.1) 式のように算出される。

$$\theta_{\text{diff}} = \tan^{-1} \frac{F_x}{F_z} \quad (6.1)$$

そして、次に地面と手先の成す相対角度は各モータに取り付けられているエンコーダの値の和から (6.2) 式として算出される。

$$\theta_{\text{all}} = \theta_1^{\text{res}} + \theta_2^{\text{res}} + \theta_3^{\text{res}} \quad (6.2)$$

ここで、 θ_1^{res} , θ_2^{res} , θ_3^{res} は 1, 2, 3 軸目に取り付けられているエンコーダから算出された各軸の角度情報である。このとき、協調把持物体の姿勢情報は (6.3) 式として推定される。

$$\theta_{\text{obj}}^{\text{est}} = \theta_{\text{all}} - \theta_{\text{diff}} \quad (6.3)$$

このように、ロボットの手先の角度情報と力センサ情報である反力値から算出される角度の差という既存のセンサ情報から協調把持物体の姿勢情報 $\theta_{\text{obj}}^{\text{est}}$ を推定することによって、協調把持物体と手先の接触箇所が操作者の所望とするところでもなくとも協調把持物体の姿勢を推定することが可能となる。また、本手法はカメラなどのビジョンを用いず、協調把持物体の座標を用いることなく推定することで計算が簡単なものになり、既存の力センサレス制御を行った場合にも有効な手段であると考えられる。さらに、前章で説明したマルチレートサンプリング制御にも支障を来さないため、加速度次元の制御帯域の広帯域化も容易に行え、推定を良好に行うことが可能である。

6.2 姿勢情報推定の実験

協調把持物体の姿勢推定の動作を確かめるため、図 6.2 に示される 2 体の 3 関節ロボット (根元から 1 番目の関節は使用しない) を用いて簡単な実験を行った。そのとき、指令は手先の位置として以下のように与える。

1. y_1, y_2 を同じ高さとし、手先を物体に接触させる
2. 物体を把持した状態から協調把持物体を約 -20 deg 傾ける

ここで、指令は手先の位置であるため物体と手先の接触箇所や把持する物体によって、協調把持物体の姿勢は -20 deg から変動してしまうことに注意する。

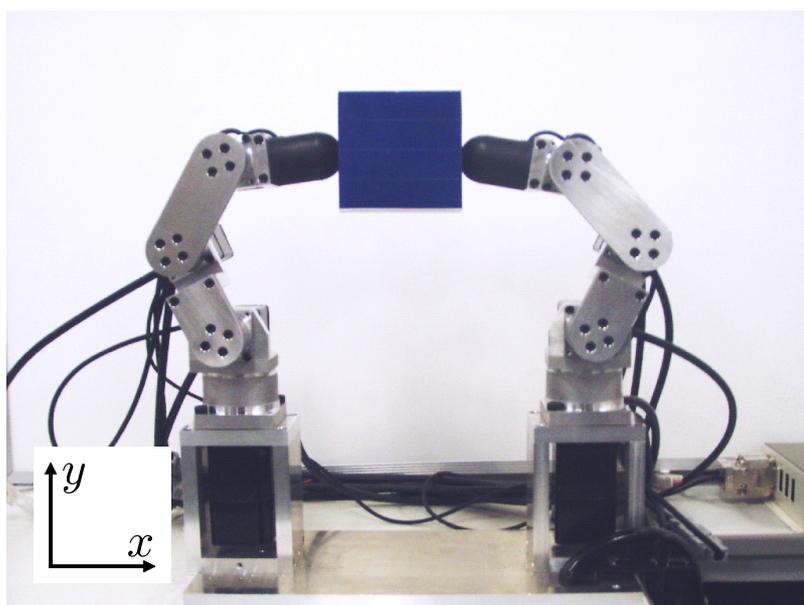
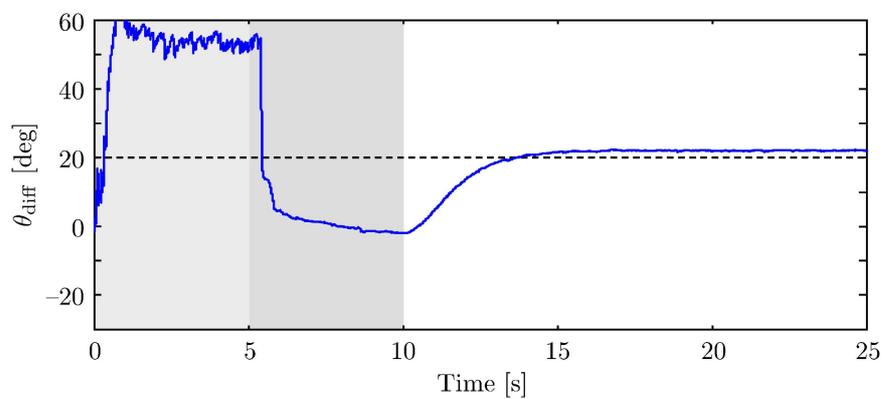
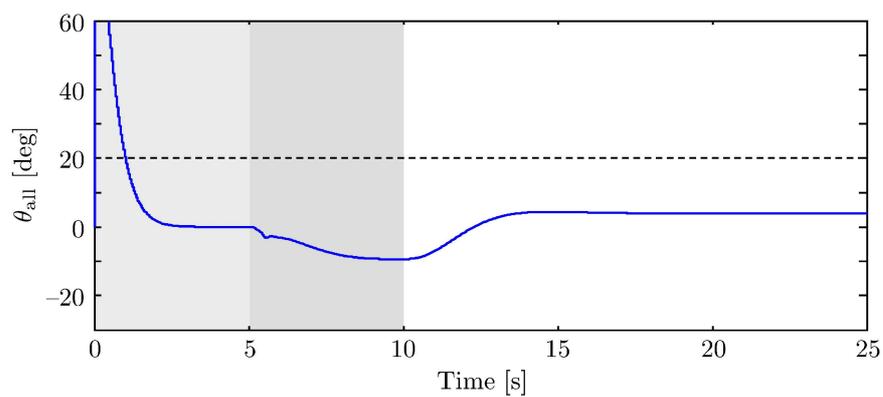


図 6.2: 実験機器

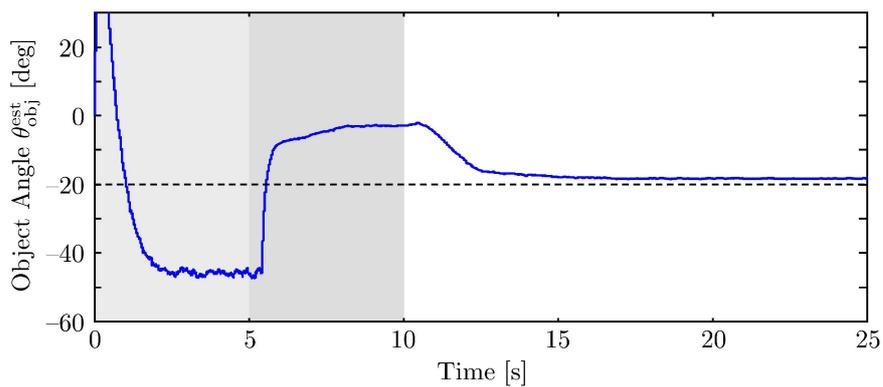
実験結果を図 6.3 に示す。実験結果より、協調把持物体を傾けないときは、ほぼ 0 deg と推定されており、約 -20 deg 傾けたときは、ほぼ -20 deg と推定されているため、カメラなどのビジョンを用いずに容易に協調把持物体の姿勢情報の推定が行えていることがわかる。そのため、本研究では既存のセンサから協調把持物体の姿勢情報を推定を行う手法を適用し、協調把持物体の姿勢制御システムを構築していく。



(a) 地面と手先のなす相対角度



(b) 手先と物体のなす相対角度



(c) 推定された物体の角度

図 6.3: 実験結果

6.3 姿勢制御システムの構築

複数体の構造可変型ロボットを用いた位置と力の協調制御システムに姿勢制御を構築することを考える。本稿では簡単のため、2次元平面における2体のロボットを用いた協調作業を実現する制御システムを扱うものとする。まず、第4章で説明したように、現在2体のロボットの手先位置 $\mathbf{x}_{r1} = [x_{r1} \ y_{r1}]^T$, $\mathbf{x}_{r2} = [x_{r2} \ y_{r2}]^T$ はそれぞれ自由度が2つつあるため、合計で4つの自由度が存在する。そのため、4つの機能を独立に制御することが可能となる。

ここで、従来まで行っていた制御において選択されていた機能について、「位置制御」と「位置と力の協調制御」の2つのタスクにおいて説明する。

位置制御

- 機能1: マニピュレータ1の手先位置 (x 軸方向) の制御
- 機能2: マニピュレータ1の手先位置 (y 軸方向) の制御
- 機能3: 各手先の中心位置 (x 軸方向) を制御
- 機能4: 各手先の中心位置 (y 軸方向) を制御

このように、ある中心位置に対して2体のロボットが対称な動作を行うとき、「物体の移動」は機能1, 3のように、1つのロボットの手先位置を制御し、2つのロボットの中心、つまり和の座標系を制御すればよいため、(6.4) 式という座標系で制御を行う。

$$\begin{aligned} \bullet_{f1} &= \bullet_{r1} \\ \bullet_{f2} &= \bullet_{r1} + \bullet_{r2} \end{aligned} \tag{6.4}$$

位置と力の協調制御

- 機能1: 手先の反力 (力センサ z 軸方向) を制御
- 機能2: マニピュレータ1の手先位置 (y 軸方向) の制御
- 機能3: 各手先の中心位置 (x 軸方向) を制御
- 機能4: 各手先の中心位置 (y 軸方向) を制御

このように、「物体の把持」は機能 1 のように、2 つのロボットの反力の差を制御し、「物体の移動」は位置制御と同じように和の座標系を用いるため、位置と力の協調制御では (6.5) 式という座標系で制御を行う。

$$\begin{aligned} \bullet_{f1} &= \bullet_{r2} - \bullet_{r1} \\ \bullet_{f2} &= \bullet_{r1} + \bullet_{r2} \end{aligned} \quad (6.5)$$

ここで、「姿勢制御」というタスクを達成させる機能について考える。その際に、「位置と力制御」を損なわないように機能を選択しなければいけないことに注意する。そこで、機能 2 のマニピュレータ 1 の手先位置の制御に姿勢制御を組み込むことを考える。つまり、4 つの機能は以下のように選択される。

位置、力及び姿勢の協調制御

- 機能 1: 手先の反力 (力センサ z 軸方向) を制御
- 機能 2: 把持物体の姿勢制御
- 機能 3: 各手先の中心位置 (x 軸方向) を制御
- 機能 4: 各手先の中心位置 (y 軸方向) を制御

ここで、姿勢制御は協調把持物体を水平もしくは傾けるという作業であるため、1 自由度方向の位置へ変換することで位置制御として扱うことが可能である。また、このときの機能 2 における姿勢制御機能は (6.6) 式のようになる。

$$y_1^{\text{res}} = -k_p(\theta_{\text{obj}}^{\text{cmd}} - \theta_{\text{obj}}^{\text{est,ave}}) \quad (6.6)$$

ここで、 k_p は比例ゲイン、 $\theta_{\text{obj}}^{\text{cmd}}$ は操作者が所望とする協調把持物体の姿勢、 $\theta_{\text{obj}}^{\text{est,ave}}$ は 2 つのロボットから推定した協調把持物体の姿勢情報の平均値である。このように、操作者が所望とする姿勢と推定値との差に P 制御器を通すことで、位置制御と置き換えることが可能となる。そして、本提案法を適用した制御システムの動作結果については、第 7 章で述べる。

第7章 シミュレーションと実機実験

本章では、提案する構造可変型ロボットに適した制御システムの有効性を確認するために以下のシミュレーションと実機実験を行う。

実験 1

第5章で提案したマルチレートサンプリング制御の有効性をシミュレーション上で検証する。構造可変型ロボットを模擬した3次元4関節ロボットアームに対して Sampling Period of the Local Intelligence(以下, SPLI と略す) と Sampling Period of the Central Intelligence(以下, SPCI と略す) を様々な関係のときに動作させ, シングルレートサンプリング制御とマルチレートサンプリング制御を適用したときの結果を比較する。

実験 2

第5章で提案したマルチレートサンプリング制御の有効性を実機実験にて検証する。構造可変型ロボットを模擬した実験機器に対して, SPLI と SPCI をある関係のときに位置及び力制御を行い, 位置応答値と反力値をシングルレートサンプリング制御とマルチレートサンプリング制御を適用したときの結果を比較する。

実験 3

第6章で提案した協調把持物体の姿勢制御の有効性をシミュレーション上で検証する。2体のロボットで協調把持物体を把持し, 傾けた後, 操作者が所望とする姿勢へ制御する。

実験 4

第6章で提案した協調把持物体の姿勢制御の有効性を実機実験にて検証する。また, 実験内容は実験3と同様の制御を行う。

7.1 実験 1(マルチレート化に関するシミュレーション)

5.3 節で提案した図 5.3 に示される制御システムの有効性を確認するため、手先に半径 0.01 m の楕円を描かせる位置制御を 3 次元空間における 1 体の構造可変型ロボットを模擬したモデルを用いてシミュレーションを行った。このとき、外乱オブザーバで用いるローパスフィルタのカットオフ周波数 C_{dob} や位置次元における制御帯域を比較することで有効性の検証を行う。また、SPLI と SPCI の関係は表 7.1 に示す。

表 7.1: サンプリング周期の関係 (1)

	SPLI	SPCI
Single-rate Sampling Control	1.0 ms	1.0 ms
Multi-rate Sampling Control	0.5 ms	1.0 ms
	0.1 ms	1.0 ms

このとき、SPLI と SPCI の関係を表 7.1 の上から case1, case2, case3 とする。

表 7.2: シミュレーション結果 (1)

	C_{dob}	Control Bandwidth
Single-rate Sampling Control case1	790 rad/s	12.0 rad/s
Multi-rate Sampling Control	case2 1510 rad/s	22.1 rad/s
	case3 7650 rad/s	32.7 rad/s

シミュレーション結果を表 7.2 に示す。ここで、case1 はシングルレートサンプリング制御であり、case2, 3 はマルチレートサンプリング制御である。また、今回加速度次元での性能向上を目的としているため作業空間における変数を変更せずに、手先の位置応答が振動し始めるときの外乱オブザーバのカットオフ周波数 C_{dob} を測定値とした。

シミュレーション結果より、シングルレートサンプリング制御に比べマルチレートサンプリング制御を行うことで外乱オブザーバのカットオフ周波数 C_{dob} や位置次元における制御帯域が広がることが検証できた。つまり、マルチレートサンプリング制御を適用することで、加速度次元の情報の遅れが低減されたため、外乱抑圧特性とロバスト性が向上し、位置次元においても制御帯域が広帯域化したことがわかる。以上から、シミュレーション上で提案法の有効性を検証できた。

7.2 実験 2(マルチレート化に関する実験)

表 7.3: サーボモータ仕様

Number of Axis	1	2,3,4
Servomotor Type	SGMAS-A5ACA21	SGMMJ-A2BAB21
Encoder Incremental	2048P/R	2048P/R
Rated Output	50 W	20 W
Rated Torque	0.159 N·m	0.0638 N·m
Rated Current	0.66 Arms	0.66 Arms
Instantaneous Peak Torque	2.1 N·m	0.191 N·m
Rated Speed	3000 min ⁻¹	3000 min ⁻¹
Max. Rotation Speed	6000 min ⁻¹	5000 min ⁻¹
Moment of Inertia	0.0242 kg·m/10 ⁻⁴	0.00548 kg·m/10 ⁻⁴
Rated Angular Acceleration	6.58 × 10 ⁴ rad/s ²	1.16 × 10 ⁵ rad/s ²

表 7.4: 減速機仕様

Number of Axis	1	2,3,4
Reduction Gears Type	CSF-14-50-2XH-F	CSF-8-50-2XH-F-SP
Gear Ratio	50	50
Rated Torque (200 min ⁻¹)	5.4 N·m	1.8 N·m
Instantaneous Peak Torque	35 N·m	6.6 N·m
Peak Torque (Start and Stop)	18 N·m	3.3 N·m

5.3 節で提案した図 5.3 に示される制御システムの有効性を確認するため実機実験を行った。ここで、実験機器は提案する制御システムの有効性を確認するために構造可変型ロボットを模擬したものであり、実際には第 2 章で述べられた無接触伝送は用いられていない。また、実験内容は 3 次元 4 関節ロボットを 1 体用いて位置制御を行ったときの位置応答値及び外乱オブザーバで用いるローパスフィルタのカットオフ周波数 C_{dob} 、エンコーダから得られた情報を通すローパスフィルタのカットオフ周波数 C_{enc} を比較するものを case1、手先を壁に接触させ力制御を行ったときの反力値を比較するものを case2 とする。そして、実機実験における SPLI と SPCI の関係は表 7.5 とする。また、そのときの実験結果を表 7.6、図 7.1、7.2 に示す。

表 7.5: サンプリング周期の関係 (2)

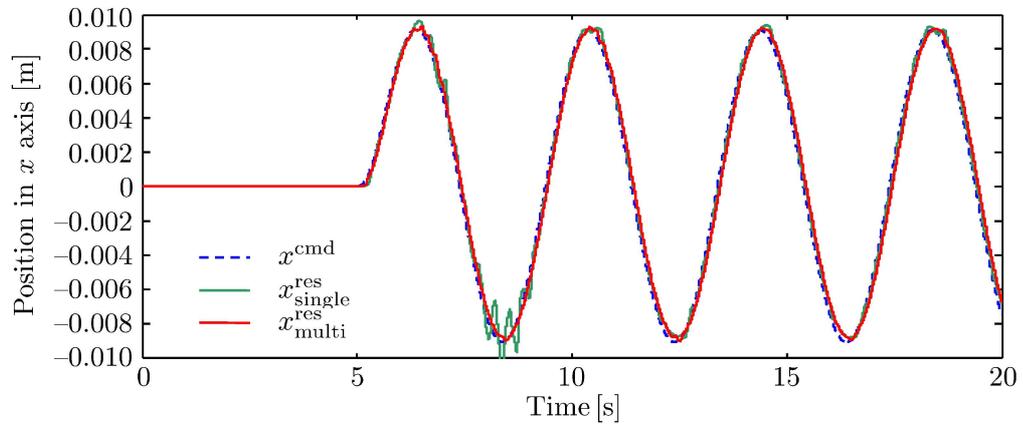
	SPLI	SPCI
Single-rate Sampling Control	1.0 ms	1.0 ms
Multi-rate Sampling Control	0.25 ms	1.0 ms

表 7.6 から，マルチレートサンプリング制御を適用することによって，エンコーダから得られた情報を通すローパスフィルタのカットオフ周波数 C_{enc} と，外乱オブザーバで用いるローパスフィルタのカットオフ周波数 C_{dob} 共に，大きな値に設定でき，位置次元における制御帯域も約 2 倍に広がることが検証できた。さらに，外乱抑圧特性とロバスト性が向上したため，図 7.1 から手先の指令に対して良好に追従した結果が得られた。今回，シングルレートサンプリング制御を適用した際に，このような振動が発生した理由として，1 周期目は角度制御から位置制御への切り替わるところであるため誤差が大きいという点とシングルレートサンプリング制御では誤差を補償しきれず速度偏差が大きいまま分散知能から出力してしまうので，次のクロックで多大な参照入力を生成してしまう点が考えられる。しかし，マルチレートサンプリング制御では分散知能から出力するまでに今回であれば 4 回フィードバック制御を行うこととなり，速度偏差を軽減し指令に対して良好に追従が行えたと考えられる。また，力制御においても図 7.2 より反力の振動が軽減される結果となった。

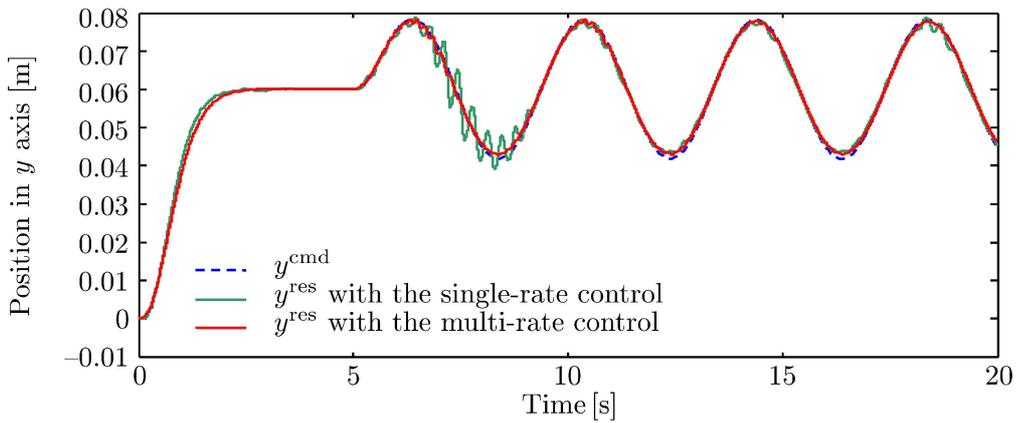
以上から，マルチレートサンプリング制御の有効性を検証できた。

表 7.6: 実験結果 (マルチレートサンプリング制御)

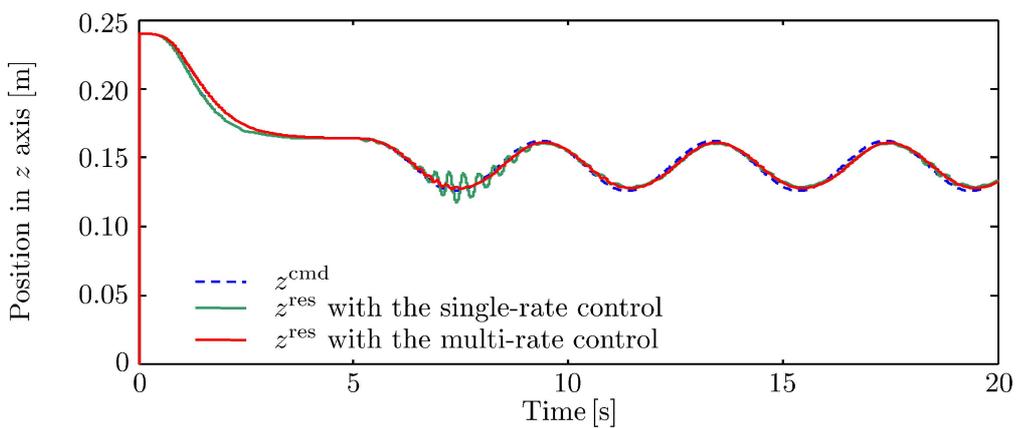
	C_{app}	C_{dob}	Control Bandwidth
Single-rate Sampling Control	100 rad/s	50 rad/s	12.0 rad/s
Multi-rate Sampling Control	120 rad/s	150 rad/s	22.1 rad/s



(a) 位置応答結果 (x 軸)



(b) 位置応答結果 (y 軸)



(c) 位置応答結果 (z 軸)

図 7.1: 位置応答結果 (マルチレートサンプリング制御)

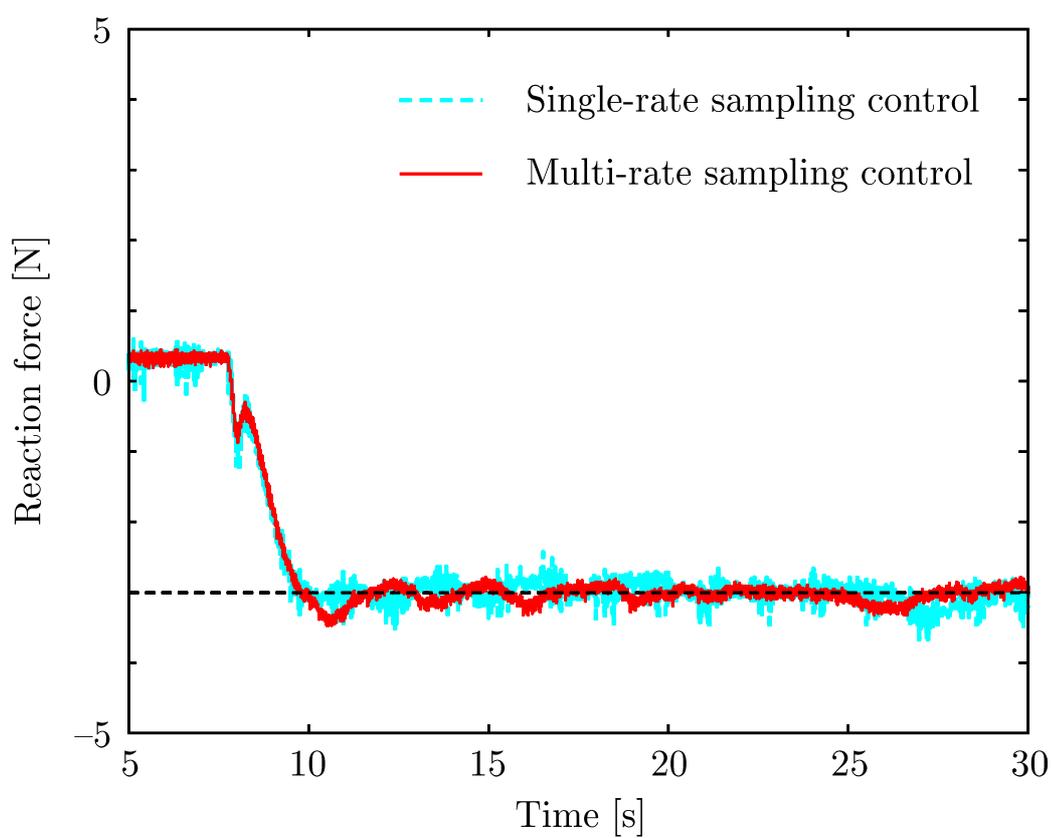


図 7.2: 反力結果 (マルチレートサンプリング制御)

7.3 実験 3(姿勢制御に関するシミュレーション)

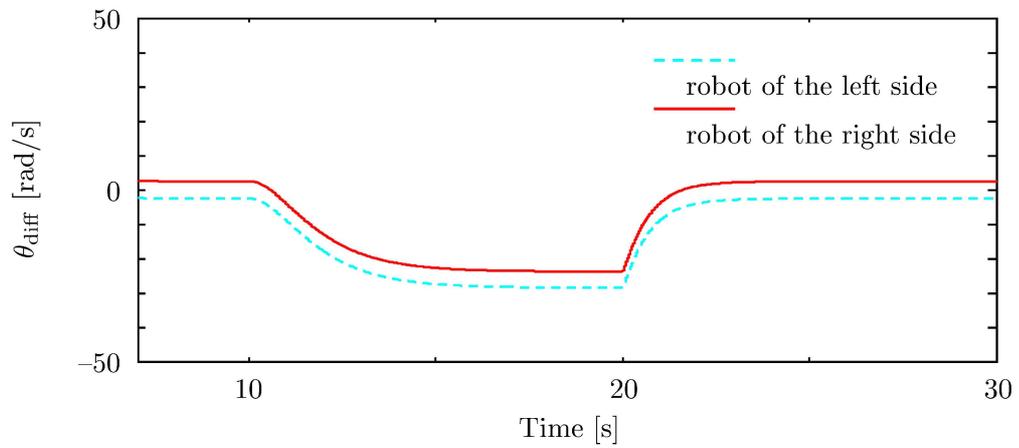
第 6 章で提案した制御システムの有効性を確認するため、前節と同様の構造可変型ロボットを模擬したモデルを用いてシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、2 体のロボットを用いて協調作業を行わせる。そして、手先の作業に関しては物体への接近作業 (機能に基づく制御器 1, 2 はロボット単体の手先位置 x_{r1}^{res} を物体へ接近させ、残りの機能に基づく制御器 3, 4 は $\frac{1}{2}(x_{r1}^{\text{res}} + x_{r2}^{\text{res}}) = 0$, $\frac{1}{2}(y_{r1}^{\text{res}} + y_{r2}^{\text{res}}) = 0.18$ という手先の中心位置を制御する)。次に、物体と接触してからの物体の把持作業 (ロボット単体の x 軸における手先位置 x_{r1}^{res} を制御する機能に基づく制御器 1 を、差の座標系における反力 $f_{-}^{\text{res}} = \frac{1}{2}(f_{r2}^{\text{res}} - f_{r1}^{\text{res}})$ を 6 N に制御するものに組み替え、他の機能に基づく制御器は物体への接近作業に用いた機能の組み合わせを用いる)。次に、物体を把持したまま物体を 20 deg 傾ける作業 (手先の位置を制御する機能に基づく制御器 2 の指令値 y_{r1}^{cmd} を 20 deg になる位置へ変更し、他の機能に基づく制御器は把持作業と同じ機能の組み合わせを用いる)。そして最後に傾けた物体を操作者が所望とする姿勢 (0 deg) へ傾ける作業 (手先の位置を制御する機能に基づく制御器 2 を (6.6) 式で示されるものへと変更し、他の機能に基づく制御器は把持作業と同じ機能の組み合わせを用いる) という 4 つの作業を想定する。

得られた結果を図 7.3 に示す。図 7.3 の結果より、各軸のエンコーダから得た角度情報と手先から得られる反力値から得られる角度情報の差である協調把持物体の姿勢情報が 20 deg に収束し、その後 0 deg に収束していることがわかる。すなわち、提案法により協調把持物体の姿勢情報の推定が行え、姿勢制御が行えた。以上から、提案法の有効性がシミュレーション上で検証できた。

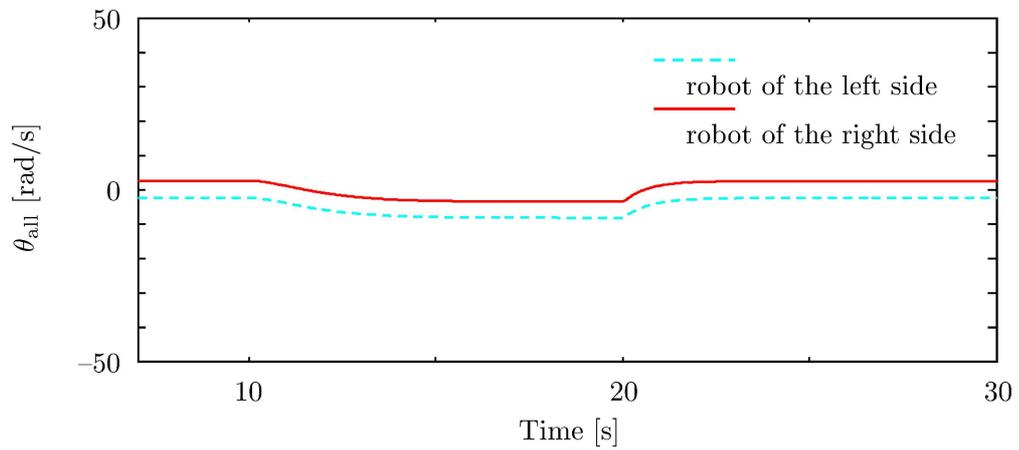
7.4 実験 4(姿勢制御に関する実験)

第 6 章で提案した制御システムの有効性を確認するため、実験 2 と同様の構造可変型ロボットを模擬した実験機器を 2 体用いて実験を行った。この実験では、前節と同じ作業を行わせることで有効性の検証をする。

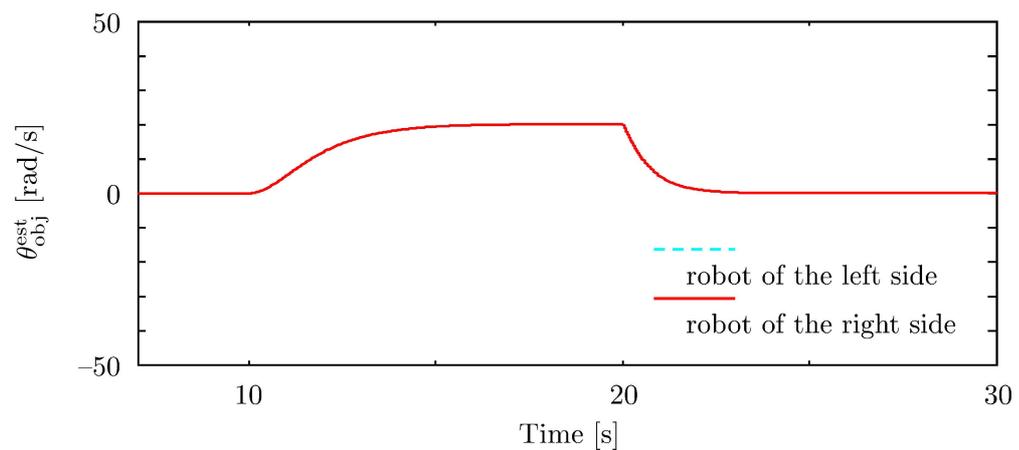
得られた結果を図 7.4 に示す。図 7.4 の結果より、シミュレーション同様に各軸のエンコーダから得た角度情報と手先から得られる反力値から得られる角度情報の差である協調把持物体の姿勢情報が 20 deg に収束し、その後 0 deg に収束していることがわかる。すなわち、提案法により実機実験を通して協調把持物体の姿勢情報の推定が行え、姿勢制御が行えた。以上から、提案法の有効性が検証できた。



(a) 手先と物体のなす相対角度



(b) 地面と手先のなす相対角度



(c) 物体のなす角度

図 7.3: 姿勢推定結果 (シミュレーション)

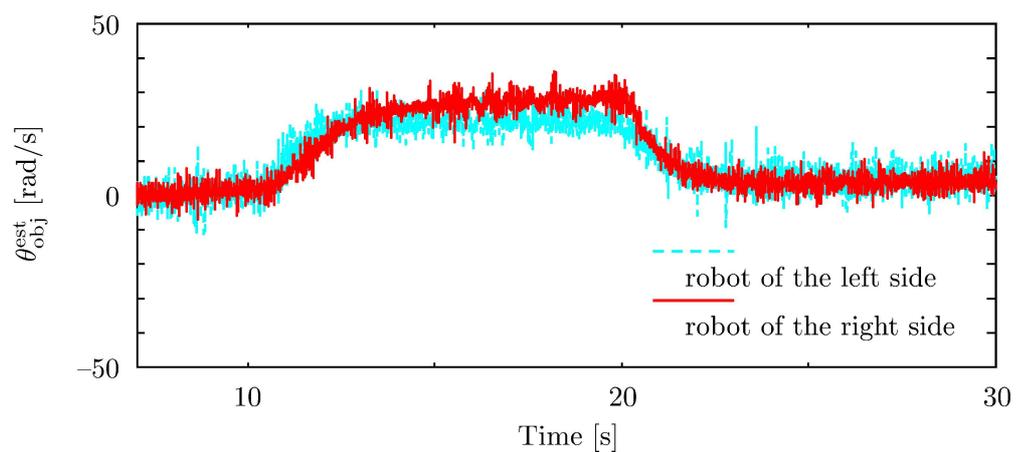
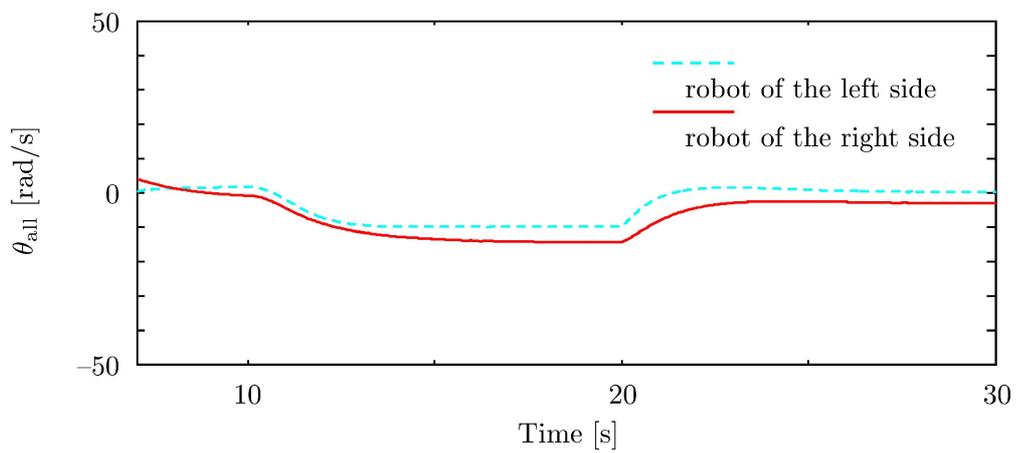
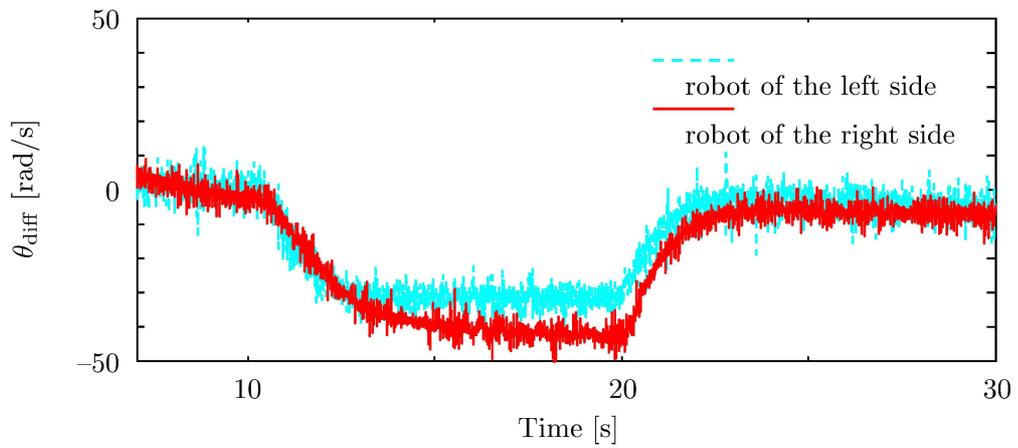


図 7.4: 姿勢推定結果 (実機実験)

第8章 まとめと今後の課題

8.1 まとめ

本研究では、構造可変型ロボットに適した制御システムの構築を目的とした。先行研究では、構造の組み替えに適した分散制御システム(中央制御部,分散知能)を提案しており、複雑な演算を回避することで構造の組み替えに簡単に対応可能な制御システムを提案している。そして、その制御システムによって、単体のロボットの手先の位置制御、および力制御を可能とし、複数体のロボットに対しても機能に応じて作業を組み合わせる機能性に基づく分散制御システムを提案しており、それらは実機実験により有効性を確認している。

これらを背景に、本研究では、上記の制御システムをさらに発展させるため、様々な作業や環境へ対応するために加速度次元における広帯域化と、機能性に基づく分散制御システムのさらなる付加価値として協調把持物体の姿勢制御の2点を主眼として研究を進めた。

まず、1点目に関しては、分散制御システムの利点を活かして構造可変型ロボットにマルチレートサンプリング制御を適用することを提案した。この制御システムは、従来制御で設定していたサンプリング周期を各分散知能だけ短くする、つまり各分散知能と中央制御部をそれぞれ異なるサンプリング周期で制御することで、加速度次元における制御帯域の広帯域化と外乱に対する速応性とロバスト性の向上が図れる。また、各モジュールによりサンプリング周期は異なって設定でき、中央制御部のサンプリング周期と同期するときのみ中央制御部から情報を送受信することで可能である。そのため、操作者が構造の変更の際に新たに制御システムを構築する手間がなく、ロボットの構造に依存しなくなる。このことから、提案する制御システムは、構造や作業の変更に対して柔軟に対応可能であり、加速度次元における制御帯域の広帯域化や外乱に対する速応性とロバスト性の向上が図れる制御システムであるといえる。本研究では、構造可変型ロボットを模擬した実機システムを用いた実験において、その制御システムによる位置・力制御を行うことで、提案する制御システムの有効性を示した。

そして、2点目に関して本研究では、生産物を扱う上で非常に重要となる協調把持物

体の姿勢制御システムの構築を目指した。協調把持物体の姿勢情報をビジョンなど新たなセンサを用いず、各モータに取り付けてあるエンコーダと力センサから得られる反力という、既存のセンサから推定を行う簡便な姿勢推定法を提案した。また、姿勢制御を行う際に自由度の増加を行わず、先行研究で提案された機能性に基づく分散制御システムの位置制御に姿勢制御組み込むことで姿勢制御を達成した。本研究では、提案する協調把持物体の姿勢制御システムの有効性を、2体のロボットで協調把持物体を傾け、水平に戻すタスクを制御する実験によって検証した。

8.2 今後の課題

現在姿勢制御は、手先に取り付けられている力センサからの情報を用いて行っている。力センサは高価であり壊れやすいため産業システムにおいては好まれていないため、1つ目の課題として、力センサレス制御を用いて協調把持物体の姿勢制御へ拡張することが必須である。

2つ目の課題として、分散知能の演算能力を積極的に利用する付加価値をつけることが挙げられる。その一例として、制御器パラメータのオンライン推定が挙げられる。現在、分散知能では外乱オブザーバによって制御対象をノミナル化できているという仮定のもと係数関法で制御器パラメータを決定している。しかし、現状では、制御対象のノミナル化が行えておらず、分散知能の伝達関数が教師モデルからずれるほど制御性能は劣化する。そのため、この問題の一解決策として、制御器パラメータのオンラインで推定である。分散知能は各関節レベルで制御ループをもつため、各関節の制御器パラメータを制御中の制御入力と実際の応答から、逐次その関節の最適な制御器パラメータを計算することができる。オンライン推定することで分散知能の伝達関数を教師モデルへ近付けることができ、構造可変型ロボットの性能向上にもつながる。

3つ目の課題として、VVTAを直動関節に対応可能なものへと拡張することが挙げられる。現状として、VVTAは回転関節においては有効性が検証されているものの、直動関節においては操作者が望む指令を生成できていない。産業システムにおいても直動関節を付加した産業ロボットは広く用いられているため、直動関節に対応可能なものへと拡張することが必須である。

参考文献

- [1] Cem Unsal, Han Kiliccote, Pradeep Khosla: “A Modular Self-Reconfigurable Bipartite Robotic System: Implementation and Motion Planning”, *Autonomous Robots* 10, 23-40, 2001
- [2] 植山 剛, 福田 敏男, 新井 史人, 加藤 雄平, 松村 司朗, 上杉 武弘: 「動的再編成可能ロボットシステムに関する研究 (第 10 報, CEBOT の群構造に対するネットワーク・エネルギー評価を用いた組織の分散制御構造化)」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.58, No.549, pp.132-139, (1992)
- [3] A.Kawamura, K.Ishioka, J. Hirai: “Wireless Transmission of Power and Information through One High Frequency Resonant AC Link Inverter for Robot Manipulator Applications”, *IEEE Trans. on I.A.*, Vol.32, No.3, May/June, 1996
- [4] Toshiaki Tsuji, Kouhei Ohnishi: “A Controller Design Method Based on Functionality”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(6), pp.3335-3343, 2007-12
- [5] T.Tsuji, K.Ohnishi and A. Sabanovic : “A Controller Design Method Based on Functionality”, *Proc. of 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control* (2006)
- [6] Seiichiro Katsura, Kouhei Ohnishi: “Quarry of Modal Information from Environment for Advanced Motion Control”, *IEEJ Trans. IA*, Vol.126, No.4, (2006)
- [7] 桂 誠一郎: 「マルチラテラル力覚フィードバック制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.4, pp.396-399, (2009)
- [8] 真鍋 舜直: 「拡張 PID 制御 (係数図法) によるモーションコントロール」, 計測と制御, Vol.39, No.10, pp.627-630 (2001)

第 8 章 まとめと今後の課題

- [9] N.Miwa, K.Yubai and J.Hirai: “A Fundamental Study on Reconfigurable Robot System Construction with Central- and Local Intelligence”, *Proc. of 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Vol.1, pp.90-93 (2006)
- [10] 上村 章仁, 弓場井 一裕, 平井 淳之: 「構造可変型ロボットに対する機能性に基づいた分散制御システムによる協調作業の実現」, *電気学会論文誌 D*, Vol.129, No.10, pp.995-1003, (2009)
- [11] M. Mizuochi, T. Tsuji, H. Nishi and K. Ohnishi: “Realization of Acceleration Control Using Multirate Sampling Method”, *Proc. of IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp.1378–1385, (2005)
- [12] 井上 貴浩, 平井 慎一: 「柔軟指による把持物体の姿勢制御」, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.75, No.757, pp.2537-2546, (2009)
- [13] 津田 雄一, 中須賀 真一: 「制御量制約を考慮した高速タンブリング物体の実時間姿勢制御法」, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol.50, No.584, pp.343-350, (2002)
- [14] 河村 晃宏, 田原 健二, 倉爪 亮, 長谷川 勉: 「多指ハンドを有するハンドアームシステムを用いた動的多面体把持」, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2A2-A16(1)-2A2-A16(4), (2009)
- [15] 小林 尚登 他, *ロボット制御の実際*, 社団法人 計測自動制御学会, (1997)
- [16] 松日楽 信人, 大明 準治, *ロボットシステムの入門*, オーム社, (2010)

謝辞

本論文は、筆者の三重大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻在学中における研究活動の成果を纏めたものであります。

本研究の遂行ならびに修士学位論文の作成にあたって、熱心なご指導とご鞭撻を賜りました、三重大学教授工学博士 平井 淳之先生、同大学准教授 駒田 諭先生、同大学准教授 弓場井 一裕先生に深く感謝いたします。また、多くの助力をいただいた、技術職員 中村 勝氏に深く感謝いたします。

また、電機システム研究室と制御システム研究室の合同検討会において、貴重なご意見をいただきました同大学教授 石田 宗秋先生、千葉大学准教授 残間 忠直先生に深く感謝いたします。

本論文の作成にあたり、査読頂き貴重な御意見を頂きました同大学准教授 池浦 良淳先生に深く感謝いたします。

構造可変型ロボット研究グループの先輩として、親身なご指導を頂きました三重大学院卒業生、上村 章仁氏に深く感謝いたします。また、本研究の遂行にあたり、制御理論グループの先輩として親身な御指導を頂きました同大学院卒業生 宇佐見 秀徳氏、藤井 宏樹氏、水谷 彰孝氏に感謝いたします。先輩方には私事においても御指導頂き、深く感謝いたします。そして、実験機器製作にあたり親身なご指導を頂きました同大学院卒業生 木下 弘輔氏に深く感謝いたします。

同研究グループの同期として、共に研究を遂行した同大学院修士2年 北村 政仁君に感謝いたします。そして同じ研究グループとして共に研究を進め、貴重な経験を頂いた修士1年 荻田 拓君、4年生 濱田 翔平君に感謝いたします。両君の今後の躍進を心より期待しております。

電機システム研究室の同期として、時には切磋琢磨し合い、時には互いを励まし合いながら研究を遂行してきた近藤 啓介君、近藤 秀映君、寺田 真也君、長坂 太郎君、丹羽 弘樹君、森 翔太君、山本 真資君には、共に研究室での生活が楽しく有意義に過ごすことができたことに深く感謝いたします。

そして、同じ制御理論グループの一員として、日頃から共に研究に励んだ石 将崇君、西口 佳孝君、岩田 強志君、榊原 健君、千賀 一輝君、田村 健太郎君、土井 章弘

第 8 章 　まとめと今後の課題

君，松尾 亮太君に感謝いたします。

　また，何かと至らない自分を受け入れ，多くのご協力を頂き，学部から大学院までの三年間の研究生生活を充実したものにしてくれた電機システム研究室の皆さんに深く感謝いたします。電機システム研究室の更なる発展を心より願っております。

論文目録

- (1) 川北，弓場井，平井：「構造可変型ロボットに適した逆運動学の三次元拡張と環境からのモード情報の切り出し」，平成 22 年度 電気学会産業応用部門大会 YPC, Y-74 (2010.8) (YPC 優秀発表賞 受賞)
- (2) 川北，弓場井，平井：「構造可変型ロボットに対するマルチレートサンプリング制御の適用」，平成 23 年度 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-L04 (2011.5)
- (3) M.Kawakita, K.Yubai, J.Hirai: “The Multi-rate Sampling Control for A Reconfigurable Robot”, ICCAS 2011, WE03-4 (2011.10)
- (4) M.Kawakita, K.Yubai, J.Hirai: “The Multi-rate Sampling Control for A Reconfigurable Robot”, The 1st International Symposium for Sustainability by Engineering at MIU, AO-2 (2011.12)
- (5) 川北，弓場井，平井：「構造可変型ロボットにおける協調把持物体の姿勢制御の向上に関する研究」，平成 23 年度 産業計測制御研究会論文集 (2012.3 発表予定)