先端に弾性部を有する複数のマニピュレータの協調制御

大隅　久

1

博士論文

先端に弾性部を有する複数のマニピュレータの協調制御

大隅　久

《目次》

1．序論 …………………………………………………… 1
1．1 序……………………………………………………… 3
1．2 協調制御技術の概要………………………………… 10
1．3 研究の目的…………………………………………… 14
1．4 論文の構成…………………………………………… 15

2．協調制御系の運動学 ………………………………… 17
2．1 はじめに……………………………………………… 19
2．2 剛性行列に基づいた剛体空間、弾性体空間への分離……………… 21
2．2．1 剛体空間、弾性体空間への分離の必要性……………… 21
2．2．2 2つの座標系間の剛性行列の関係……………………… 23
2．2．3 剛体空間、弾性体空間の算出……………………… 25
2．2．4 等価関節の導入……………………………………… 28
2．2．5 剛体空間、弾性体空間への射影行列………………… 30
2．3 協調系の運動学……………………………………… 31
2．3．1 協調系の運動学……………………………………… 31
2．3．2 幾何的拘束条件の導出……………………………… 33
2．3．3 力学的拘束条件の導出……………………………… 35
2．3．4 関節角空間内の可動空間…………………………… 37
2．3．5 対象物座標系の可動空間…………………………… 39
2．3．6 運動学計算例………………………………………… 42
2．4 協調系の逆運動学…………………………………… 44
2．5 まとめ………………………………………………… 47

3．動力学を考慮した協調制御系の設計 ……………………… 48
3．1 はじめに……………………………………………… 50
3．2 協調制御手法の考察………………………………… 53
3．2．1 閉ループ機構とオープンループ機構………………… 53
3．2．2 協調制御手法の考察………………………………… 55
3．3 対象物の目標軌道…………………………………… 61
3．3．1 対象物の位置、姿勢の表現………………………… 61
3．3．2 マニピュレータの目標軌道の算出…………………… 64
3．3．3 対象物の運動に必要な力…………………………… 65
3．4 各マニピュレータへの力の配分……………………… 67
3．4．1 力の配分法…………………………………………… 67
3．4．2 異なる特性を有する機構間の力配分法の考察……………… 69
3．5 剛体マニピュレータにおける協調制御系……………… 73
3．6 剛性行列を考慮したマニピュレータの協調制御系の設計………… 77
3．6．1 マニピュレータ目標軌道の算出……………………… 77
3．6．2 協調制御の設計……………………………………… 80
3．7 剛性行列を考慮したマニピュレータの協調制御シミュレーション…… 83
3．7．1 マニピュレータの動力学…………………………… 83

3．7．2 搬送軌道の設計……87
3．7．3 シミュレーション……90
3．8 まとめ……107

4．低剛性アーム協調制御実験……108
4．1 はじめに……110
4．2 低剛性アーム協調モデルの設定……111
4．3 対象物の運動に必要な力と拘束条件……112
4．4 協調制御系の設計……115
4．5 実験システム……118
4．5．1 実験システムの概要……118
4．5．2 システムの構成と各部の特性……120
4．6 制御実験……134
4．6．1 フィードバックゲインの決定……135
4．6．2 振動制御……137
4．6．3 搬送制御実験……140
4．6．4 挿入実験……146
4．7 まとめ……150

5．産業用ロボットを利用した協調制御系の構成法……151
5．1 はじめに……153
5．2 協調システムの構成法……155
5．3 位置制御コントローラを利用した制御手法……158
5．4 まとめ……163

6．クレーンとロボットの協調制御システム……164
6．1 はじめに……166
6．2 クレーン、ロボット協調システムの構成……168
6．3 クレーンとロボットの協調制御による搬送……170
6．3．1 クレーン・ロボット協調制御系の機構的特性……171
6．3．2 制御系の設計……175
6．3．3 制振、搬送制御実験……178
6．4 懸垂物の姿勢制御実験……189
6．4．1 ワイヤ懸垂機構の剛性マトリックス……189
6．4．2 クレーン、ロボット協調系の逆運動学……192
6．4．3 姿勢制御実験……196
6．5 まとめ……208

7．結論と今後の展望……209
7．1 結論……211
7．2 今後の展望……214

謝辞……215
参考文献……218
研究業績書……235

第 1 章

序論

第１章　序論

目次

１．１　序

１．２　協調制御技術の概要

１．３　研究の目的

１．４　論文の構成

1．1 序

製造業におけるロボットはほぼ普及しつくした感があり、最近では、建設など製造業以外の業種への普及が試みられている。しかしこのような現状とは裏腹に、工場の生産ラインにおいて用いられている産業用ロボットは、単なる汎用位置決め機としての印象が強く、人間の代替機構としての知的なイメージとはほど遠い。建設ロボットとして近年盛んに宣伝されている床磨きロボット、ビルの外壁の検査ロボットなども、それぞれの作業専用の自動機械に過ぎない。

ロボットの知能化には、外界から入力された情報を処理し、行動を決定する人工知能の研究が重要であるが、これと同時に、決定された行動を実現するための器用な腕、手先が必要であり、このための制御技術は知能開発にも増して不可欠な技術要素である。現状のロボットは、空間内を単独で動く機能に関してはほぼ十分な性能を有しているといえるが、環境との干渉がある場合、更には他のロボットと共同で対象物をハンドリングするといった、ロボット先端に発生する力を考慮する必要のある作業にはほとんど利用されていない。これらの作業を実現するため、ロボット先端での力制御、撃力回避問題など様々な研究が行なわれているが、ロボットのインテリジェント化を考えるうえで、複数のロボットで1つの対象物をハンドリングするといった協調制御技術は、とりわけその進歩が期待されている。

人間は2つの腕をうまく利用することにより、片方の腕だけでは持上げることのできない重い荷物を持上げる、片手では持ちにくいものを両手で持上げる、ビンの蓋を開ける、物を持替える、といったさまざまな作業を行なう。複数のロボットも、人間の左右の腕のように共同で作業を行なうことにより、

(1) 可搬重量の小さいロボットでも複数台利用することで重量物ハンドリングが可能となる、
(2) 1台のロボットではハンドリングのしにくい大型の対象物のハンドリングが可能となる、
(3) 組立作業において、組付け対象と部品をそれぞれのロボットが予め把持すること、あるいは対象物の持替えを行なうことで、組立ラインの周辺装置を大幅に削減することができる、

などが期待される。人間のように2腕を有するロボットは、最近では宇宙、海底等におけるロボットとしても注目されている。

更に、それぞれのロボットが同等な場合に限らず、タイプの全く異なるロボット間への協調制御が実現可能となれば、例えば現在人間が補助機構を利用して行なっている様々な作業を人間に代ってロボットに実行させることが可能となる。例えば、自動化の要求が極めて高いにも拘らず、研究の進んでいない分野に重量物組立て作業がある。これは非常に危険な作業であるが、例えば10tonもあるような重量物を自動ハンドリングするロボットを導入することはほとんど不可能である。しかし、人間に代る小型ロボットを導入し、クレーンとロボットという特性の全く異なる機構間の協調制

御が実現できれば、自動化が達成できる。

現在行なわれている協調制御研究を見ると、ほとんど全てといって良いほど、同等な機構を有するマニピュレータ同士を対象としている。しかし、上にも述べたように、特性の全くことなる機構においても協調制御技術が適用できれば、ロボットの応用範囲を更に拡大することができる。しかし、特性の全く異なる機構間の協調制御に関する研究は、クレーンとロボットの協調制御[Arai 1988],[Arai 1990]等に見られるに過ぎない。協調制御系の制御則の決定には、それぞれのマニピュレータの機構的特性、例えば、可動範囲、可搬重量等を考慮しなくてはならず、そのなかでも特に機構の剛性の考慮が必要となる。これは、可搬重量、可動範囲等が制御則の適用範囲を限定するのに対して、剛性の考慮は制御対象モデル自身を決定する要因だからである。剛性の考慮は、同等なマニピュレータ同士の協調制御においても手先の力センサの挙動を考える上で必要であることが指摘されているが[Arimoto 1987]、これを制御系モデルに陽に組込んだ研究は非常に少なく、理論的な解析も不十分である。

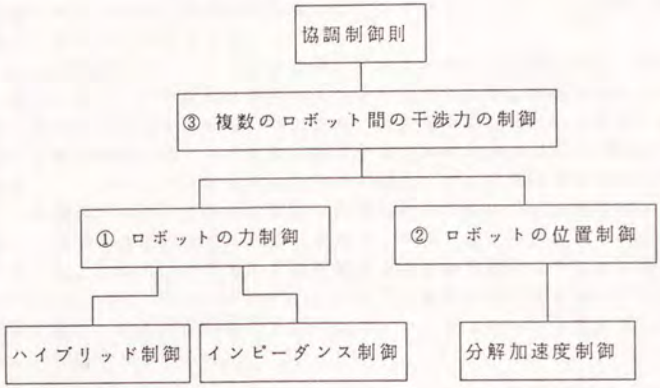
さて、協調制御において最も基本となる問題は、『幾何的拘束を保ったまま、対象物との間に作用する力を制御するためには、ロボットをどのように動かせば良いか』という点である。幾何的拘束は、ハンドリング対象物、あるいはロボットの協調相手の機構により与えられる。また、ロボットの手先と対象物との間に発生する力は、ロボットアクチュエータの発生するトルクとロボットの動力学特性、更に対象物の運動により決定される。環境が不動の場合の剛体マニピュレータの制御においては、トルクと先端の力の関係がロボットアームの動力学特性とヤコビ行列のみによって関係付けられる。ところが環境が動く場合、つまり対象物が加速度運動を行なっている場合には、対象物の運動を考慮した制御系が必要で、このためには更に協調相手と対象物に作用する力の情報も必要となる。即ち協調制御は、

① ロボットと対象物との間に作用する力の制御技術、
② 動力学を考慮したロボットの位置制御技術、

といった技術を基本要素とし、①、②を利用して

③ 複数のロボット間の干渉力の制御、

を行うことが必要となる(Fig.1.1)。以下に①、②に関する現状を示す。



[Mason 1981]
[Raibert 1981]
[Khatib 1986]
[West 1987]
[吉川 1986(a)]
[Zhang 1985]

[Salisbury 1980]
[Hogan(a)～(c) 1985]
[平林 1986]
[浅川 1987]
[小菅 1988]

[Luh 1980]

Fig.1.1 協調制御の基礎技術

①：力制御技術の現状

対象物とロボットの間に働く力の制御に関する理論的な解析や制御系設計については、[Salisbury 1980],[Hogan 1985(a)～(c)],[Khatib 1985]をはじめ非常に多くの研究成果がある。これらは大きく、ハイブリッド制御、インピーダンス制御に分類することができる(Table.1.1)。ハイブリッド制御は、ロボットが環境と接触を保ちながら作業を行なう際、幾何的拘束を受け動くことのできない空間へは力制御を、動くことのできる空間へは位置制御を適用するものと定義づけることができる。この手法は、環境との間に作用する力が力フィードバックにより正確に制御できるが、位置制御、力制御を行なう空間が環境の幾何的変化等に応じて変更される場合の制御モード切替時にチャタリング等を起こす可能性がある。また、力制御はロボットが環境と接触した状態でしか用いることができず、接触時のモード切替が最大の問題となる。インピーダンス制御の最も基本的な研究は[Hogan 1985(b)]である。[Hogan 1985(b)]のインピーダンス制御は、外力に対するロボット先端の挙動をバネ・マス・ダンパ系として振舞うよう制御をかけるもので、制御則はＰＤ制御に力フィードバックを加えたものである。従って、インピーダンス制御におけるロボットへの目標指令は、先端で発生すべき力ではなく目標位置である。このため力を制御するには、目標位置の変更、あるいはインピーダンスの動的な変更が必要となる。インピーダンスの動的な変化に

対する制御系の安定性に関する条件は[宇野 1989]に示されている。インピーダンス制御はロボットの位置制御を基本としているので、ロボットが環境と接触しているか否かに拘らず、利用できる。

以上に説明したハイブリッド制御、インピーダンス制御の長所、短所をTable.1.1に示す。これらの理論はほぼ完成したといってよいが、実際にはマニピュレータの弾性、接触時に発生する衝撃力等により、制御系が不安定となったり、接触点において微小振動を繰返すといった現象が発生する([Eppinger 1987])。即ち、ハイブリッド制御、インピーダンス制御には共通の欠点として、接触時の制御系の安定性の劣化という問題点がある。これらの問題は制御時にモデルに組込まれなかったアーム自身の弾性や関節の静止摩擦力に起因しており、マニピュレータ先端に弾性部を導入することにより、これらの現象をある程度抑えることが可能となることが報告されている([Whitney 1987],[Roberts 1986])。しかし、先端に弾性部を導入することは、同時に振動の発生、位置精度の低下も招くため、マニピュレータ先端に導入した弾性部を考慮した制御が必要となる。

Table.1.1 ハイブリッド制御とインピーダンス制御の比較

	ハイブリッド制御	インピーダンス制御
制御法	力制御＋位置制御（ＰＩＤ制御）	位置制御（ＰＤ制御）
長所	・力フィードバックの存在により 力の制御性が良い	・環境との接触の有無に拘らず 同じ制御則が適用できる
短所	・作業座標系の指定が繁雑 ・制御モード切替時のチャタリング	・力の制御特性が悪い ・環境との接触時の安定性

ロボットアーム自身の剛性の、力制御系の安定性に対する影響の考察は[Eppinger 1986,1987,1988]においてなされている。この他にも、このようなリンク自体を弾性体としてモデル化した研究はフレキシブルアームの制御として近年非常に盛んに行なわれた。フレキシブルアームに関する研究は宇宙ステーション組立のための研究として1970年代アメリカで始まり([Book 1975,1979],[Sunada 1983],[Cannon 1983])、日本においても1980年代中頃から盛んに行なわれ([Sakawa 1985],[福田 1985],[小松 1990],[内山 1989(a)])、単リンクのアームの１自由度振動の理論的解析、制御系設計は完成している。しかし、フレキシブルアームは分布定数としてモデル化されるため、一般にモデルの次数が高く、制御を実現することが難しい。このため、一般の多リンクマニピュレータの剛性を考慮した研究は行われていない。

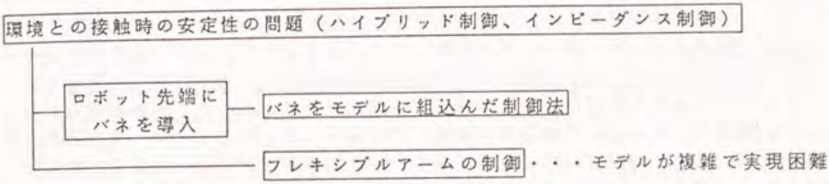


Fig.1.2 環境との接触時の制御系の安定化手法

従って、ロボットの力制御における接触時の撃力回避、安定性の確保には、ロボット先端に低剛性部を導入し、この低剛性部をモデルに組込んだ制御則を考えるのが現実的であると言える。協調制御を行うマニピュレータにおいても、それぞれのマニピュレータが対象物を把持する際に全く同じ問題が生じ、このため多指ハンドの研究では通常指先にラバーなどが低剛性部として導入されている。このように弾性部の導入された機構を協調制御に利用し、しかも対象物の運動中に振動を発生したり対象物を落下させないためには、弾性部を考慮した制御系の設計が必須である。

② 動力学を考慮したロボットの位置制御技術

動力学を考慮したマニピュレータの位置制御手法としては、[Luh 1980]の分解加速度制御が一般的である。これはマニピュレータを目標軌道に沿って運動させるためのフィードフォワードトルクと、位置、速度誤差のフィードバックトルクを指令トルクとして利用するもので、マニピュレータの位置、速度誤差の収束が示されている。[Luh 1980]では関節角空間における位置、速度誤差がフィードバックに利用されているが、マニピュレータ先端の作業座標における誤差をフィードバックに利用することもできる。作業座標における誤差の利用により、マニピュレータ先端の挙動が分りやすくなるが、マニピュレータの特異点近傍では関節に過大なトルクが指令されるといった現象が生じるため、マニピュレータの目標軌道が特異点近傍を通過する場合には注意が必要となる。但しこれらはいずれも剛体マニピュレータを前提としており、機構に弾性部が存在する場合には、マニピュレータ先端に把持された対象物に発生する振動、あるいはたわみ等を考慮した新たな制御則が必要となる。

以上、①、②のそれぞれについての概要を説明した。次にこれらの技術がどのように協調制御に適用されているかを述べる。協調制御には、対象物を目標軌道に沿って搬送しながら、しかも対象物に対して目標力を加え続けることが要求される。①に示したハイブリッド制御系では、力制御方向への位置の管理が行なわれないため、対象物を加速度運動させる場合にそのままの形で利用することができない。これに対してインピーダンス制御は、ロボットの目標位置を目標力に応じて変更することにより、位置制御を行なう方向に対する力の制御も可能である。②に示した分解加速度制御に

はインピーダンスを制御するといった概念はないが、分解加速度制御を作業座標系において定式化すると、そのフィードバックゲインは[Hogan 1985(b)]のインピーダンス制御におけるバネ、ダンパときわめて近い意味を持つ。従って、分解加速度制御系におけるフィードバックゲインの適当な設計と、目標力のフィードフォワードトルクにより、目標軌道とマニピュレータ先端の力の制御がともに実現できると考えられ、多くの研究が、フィードフォワードトルクと先端での目標力の和によって制御指令トルクを算出するといった制御系を構成している。[中村 1986]では、このように位置指令のフィードフォワードトルクに、目標力を発生するためのトルクを足し込んだ制御系を、位置制御系の特殊な形態と位置付けている。しかし、フィードバックゲインの決定とマニピュレータ先端の挙動の関係を示した研究はない。この挙動を調べるためには協調系における誤差システムとフィードバックゲインの関係が是非とも必要となる。

①、②がロボット単体の制御技術であるのに対して、③の複数のロボットの干渉力をどのように制御するかが、協調制御本来の研究課題である。これは対象物に加えるべき目標力の各マニピュレータへの配分問題、それぞれのロボットにどのような制御形態をとらせれば、系全体の挙動を安定に制御できるかといった制御系設計の問題からなる。これについては1．2に詳述する。但し、1．2で示す手法は両腕が同等の機構を有する剛体マニピュレータを想定したものであり、マニピュレータ先端に剛性の低い力センサ等が付加されている場合、あるいは機構的特性、制御特性が異なる機構間の協調制御には、新たな協調制御手法を確立する必要がある。

以上の①～③では、トルク制御を前提とし動力学を考慮した基礎的な理論と、協調制御への適用について示した。しかし、産業用ロボットの現状をながめると、そのほとんどがロボット単体を制御対象とし、PID制御を用いた位置制御系を有している。ロボットが環境と接触していない場合には、位置精度を向上させるためI制御は有効であるが、壁など固定された環境との接触がある場合には適用できない。このため、ロボットと固定された環境との干渉力を制御する場合、ロボット先端にたわみの発生し得る部分を導入し、このたわみを目標量とする制御法が利用されており、通常は力センサがたわみの発生部となっている。一方、これとは別に、市販のロボットコントローラには、制御サンプリングが長い(数10ms)という欠点がある。このため、先端に付加される力センサの剛性が高いと、応答の遅れによりロボットに過大な力が発生する恐れがある。従って、ロボットの遅れが生じてもロボットに過大な力が作用しない程度に剛性の低い力センサ、あるいは低剛性部の導入が必要となる。

産業用ロボットの協調制御への利用を考える場合にも、I制御の存在、サンプリング時間の問題を解決する必要がある。協調制御においては、壁との干渉力を制御する場合と異なり、ロボット先端に与えられる環境からの拘束が協調相手と対象物によって与えられる。つまり、環境自身が運動を行い、しかもある固さを有するバネで支持されていると考えることができる。このバネは、一般にある方向には固いが、また別

の方向には柔らかい。従って、協調相手のバネの固い方向にのみロボット先端に低剛性部を導入すれば、過大な内力の発生を防ぐことができる。ロボットに弾性部を導入すること自体は、ロボット先端に振動を発生する、あるいはロボットの精度を下げるといった点から好ましいこととはされていないが、協調相手となる機構が固い方向にのみ弾性部を導入することにより、これらの問題点は解決されると考えられる。

このように、産業用ロボットの協調制御への適用を考える場合にも、力制御の場合と同じように先端への弾性部の導入が必要となり、ロボット先端の弾性を考慮した制御法の確立が必要となることが分る。

本節では、剛性を考慮した協調制御の必要性を示した。今後、本論文では機構の剛性を剛性行列として表現し、解析、設計を行なうこととする。このように剛性行列の解析を基にした協調制御研究はこれまで例がない。

１．２においては、剛体マニピュレータ同士を対象として行なわれてきたこれまでの協調制御研究を整理する。１．３では本研究の目的を、１．４では論文の構成を示す。

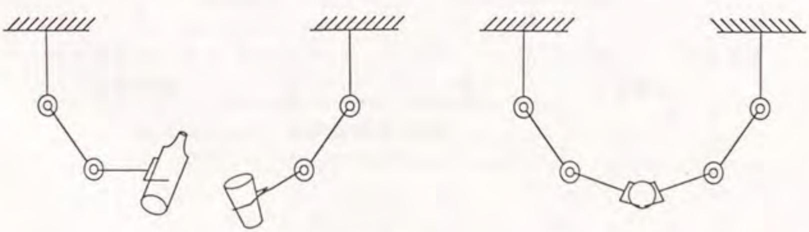
1．2 協調制御研究の概要

前節では、協調制御を実現するための基礎的なロボット制御技術を示した。また、弾性を考慮した制御系の解析と設計、更に位置制御コントローラで実現が可能な制御手法の必要性を述べた。しかし、これまでの研究のほとんどは剛体マニピュレータ同士を対象としており、弾性を考慮した制御は非常に少ない[Arimoto 1987],[Ahmad 1988]。本節では、これまで主に剛体マニピュレータ同士を対象に行なわれてきた協調制御研究の概要を示す。

複数のマニピュレータの協調作業は、その制御形態から以下の２つに分類することができる(Fig.1.3)。

1) 共有の可動領域を有する複数のマニピュレータがそれぞれ独立に行う作業
2) 複数のマニピュレータが１つの対象物をハンドリングする作業

1)の作業では、それぞれのマニピュレータの制御が独立に行われるが、マニピュレータ間の障害物回避が考慮されねばならない。マニピュレータの静止障害物の回避に関しては多くの研究がなされているが([Lozano-Perez 1981]等)、マニピュレータ間の障害物回避に関しての研究は非常に少なく、[Freund 1984]、[Freund 1985]、[Freund 1986]や、最近進められている移動ロボット間の相互衝突回避が見られるだけである[Arai 1989]。Freundの研究では、それぞれのマニピュレータに優先順位が付けられ、優先順位の低いマニピュレータは常に衝突チェックを行いながら動作し、衝突可能性が生じると自分の目標軌道を補正するという階層構造を有する制御系が提案されている。制御系は、マニピュレータを非線形フィードバックにより線形化し、任意の極を設定する下位のブロックと、このブロックに目標指令を与える上位ブロックからなる。各マニピュレータへの目標軌道、障害物回避のための補正量などは、上位のブロックで算出され、下位のブロックへ指令される。本作業は協調といいながらも、力の干渉はなく、制御の立場から見ると、実現は容易である。



(a) 各マニピュレータが独立に動作を行なう協調例　　(b) 各マニピュレータが同一の対象物をハンドリングする協調例

Fig.1.3 協調作業の例

2)が協調制御研究の主流である。複数のマニピュレータが１つの対象物を把持すると、機構的な閉ループが構成される。従って、各マニピュレータはこの閉ループによって生じる幾何学的な拘束を満足しながら、しかも対象物に加わる力を制御しなくてはならない。これに関する研究は

2)-[1] 幾何学的な拘束関係のマニピュレータ関節角空間への変換
2)-[2] 対象物の位置と内力が同時に制御可能な制御系の設計問題
2)-[3] 対象物の運動に必要な力の各マニピュレータへの配分問題

に分類することができる(Fig.1.4)。

2)-[1]に関する研究は機構学的な観点からの研究と考えてよい。[Lim 1985]では、対象物をrigidに把持した２腕に対して、対象物の目標移動量から２腕の各関節の移動量を算出する手順が述べられている。[Alford 1984]は、２つのマニピュレータをリーダ、フォロワとし、リーダの関節角は予め対象物の目標軌道から算出し、フォロワの目標軌道はリーダの関節角からリアルタイムで算出するという制御系を構成している。[Zheng 1986]では、リーダ/フォロワの２両腕が、プライヤ、球面ジョイント等を把持した場合のフォロワの関節角目標値の算出法を示している。これらの手法に対して、[Tarn 1987]、[Dauchez 1987(a),(b)]は、複数のマニピュレータを閉ループ機構を有する１つのマニピュレータとみたて、関節角の算出を行っている。[Tarn 1987]では、閉ループ機構のリンク数、関節数と機構の持つ自由度の関係を基に、閉ループ系の運動を記述するための基準となる関節を選択し、残りの関節値を基準の関節値から算出することで、系全体の運動方程式を算出している。[Dauchez 1987(b)]では、対象物が剛体である場合のみならず、例えば２腕でビンの蓋を閉めるといった両腕の相対位置の制御が必要な場合についての手法を提案している。２つのマニピュレ

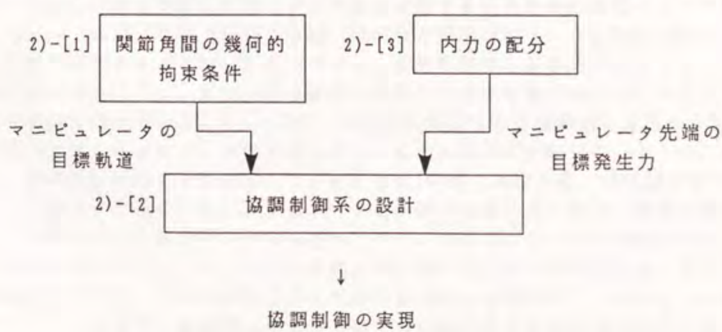


Fig.1.4 協調制御研究の関連

ータを１つの機構と考え、２腕の相対位置の微小変化量と２腕の全ての関節の微小移動量間のヤコビ行列を提案している。[Alford 1984]を除き、これらの研究はいずれも得られた目標値から必要な駆動トルクの算出を行っているが、制御系の設計については触れていない。

2)-[2]に関しては、[Nakano 1974],[黒野 1975],[Ishida 1977],[Mason 1981],[Arimoto 1987],[Hayati 1986],[Uchiyama 1987],[Tao 1987],[古田 1987]等、非常に多くの研究がある。これらの制御手法の分類には、多くの場合リーダ/フォロワという言葉が使われる。リーダ/フォロワの制御形態は、運動学を中心に制御系を構成した研究においては、片方のマニピュレータの関節角目標値が、もう一方のマニピュレータの関節角の関数として決定される制御系構成を表し、動力学を考慮した制御系設計においては、リーダのマニピュレータが対象物の運動を決定し、もう一方のフォロワマニピュレータが重力のみ半分受持ちながらリーダに追従するといった制御形態を表す。リーダ、フォロワを利用したものには[Nakano 1974],[Ishida 1977],[Mason 1981],[Arimoto 1987],[Tao 1987]等がある。これに対して、リーダ、フォロワの区別をせずに両腕を同等に制御したものに[黒野 1975],[Hayati 1986],[Uchiyama 1987],[古田 1987]等がある。また、これらの形態とは別に、利用されている制御系から分類すると、位置制御をベースとしたもの([Nakano 1974],[黒野 1975],[Tao 1987],[古田 1987]等)とトルク制御をベースとしたもの([Ishida 1977],[Mason 1981],[Arimoto 1987],[Hayati 1986],[Uchiyama 1987]等)となる。位置制御をベースとしたものは現状の産業用ロボットへの適用を意識したものが多くなっている。また、[Uchiyama 1987]は静的な釣合のみを協調の対象としている点、[Hayati 1986]は複数のマニピュレータにより対象物のハイブリッド制御を行っている点が他と異なる。

2)-[3]の力の配分問題は多指ハンドの操りに関する研究の中心課題の１つであり、[Salisbury 1982],[中村 1986],[中村 1990]などに示されている。[Salisbury 1982]では指先で発生することのできる力ベクトルと対象物重心座標系に及ぼす力とモーメントの関係を定式化し、冗長空間の基底を利用して実現可能な指先の力ベクトルを算出する手法を述べている。また[中村 1986]では対象物を目標軌道に追従させながら、各指先に課せられる力の２乗和を最小とし、しかもすべりが生じないような力ベクトルを、非線形計画法により算出している。また[中村 1990]では、評価関数を２乗和ではなく重み付の線形和とし、摩擦コーンを多面体近似することで、線形計画法の問題として指先の力を決定する手法を述べている。マニピュレータが対象物をしっかりと把持している場合は、ハンドと対象物の間に働く力に対する拘束条件、例えば接触力が正となる条件、すべりが生じないための条件等は必要なく、マニピュレータに必要となるエネルギなど評価関数のみが考慮された配分法などが提案されている([Orin 1981],[Zheng 1986])。[Orin 1981]は複数のマニピュレータ先端が対象物に接している状態(rigidな把持ではない)、あるいは歩行機構を想定し、各関節のトルク限界、接触力に付加される拘束条件、消費エネルギ最小等の拘束下における解の算出を線形計画法により行っている。この手法は非常に一般性があるが、計算に要する時間が非

常に長くリアルタイムでの制御には適用できない。このため[Zheng 1986]では、リアルタイム性を重視したトルク配分法として、2腕が同等の機構である場合にはそれぞれの腕が対象物に必要な力の1/2ずつを受持つことが好ましいとの主張を行っている。

以上に2つの作業形態に対する研究現状を示したが、1)と2)の作業形態を同時に含む作業として、対象物の持替えがある。この問題は[Zapata 1987]により扱われている。この研究では、対象物のどこを把持することができるか、何度持替えれば好ましい把持姿勢となるか、好ましい把持姿勢を取り得ることができるか、等を、交換行列という行列とグラフ探索アルゴリズムを利用して求めている。持替えの他にも、両腕の把持した2つの部品を組合せるといった作業が1)と2)の形態を同時に含む作業に該当する。これらの作業では、[Zapata 1987]にも指摘されているように、2つのマニピュレータが対象物を介してお互に接触する直前までの位置制御モードと、接触直後の力制御モードのモード切替が問題となる。この問題を2腕協調において扱った論文はないが、ロボットが環境と接触する際の撃力回避問題として、安定性の解析と共に近年研究が盛んになってきている([Whitney 1987],[Roberts 1985],[Eppinger 1987],[北垣 1989])。

以上の研究は全て剛体マニピュレータに関する制御を対象としているが、マニピュレータの弾性をも考慮した研究はほとんど見当らず[Ahmad 1988],[Arimoto 1987]が存在する程度である。[Ahmad 1988]では2台の産業用マニピュレータの弾性部をそれぞれ1自由度のバネとしてモデル化し、位置決め点における振動制御を行なっている。また、[Arimoto 1987]ではマニピュレータ手先のラバーで構成された力センサを6x6剛性行列としてモデル化した制御則を示し、制御系の安定性をリアプノフ関数により示している。しかし、制御則の定式化という点からは[Ahmad 1988]のような1自由度バネとしてのモデル化は応用範囲が極めて限られる。また、[Arimoto 1987]では、制御系の安定がリアプノフ関数を用いることにより証明されているが、その収束の過程における挙動は明らかではない。

本論文では、剛性行列で表現される機構が剛体マニピュレータの先端に付加されたモデルを基に、2)-[1]、2)-[2]を扱う。動力学を考慮した制御系の構成は[Arimoto 1987]と類似したものとなるが、誤差システムとフィードバックゲインの関係を明らかにすることで、対象物のコンプライアンスが陽に指定できることを示す。

上述の手法の中でトルク制御をベースとした手法は最も理論的な特性が良いが、現実の産業用ロボットの特性を考慮すると適用可能なものがほとんどない。ロボットにより制御を実現しているのは[Uchiyama 1987],[Alford 1984]等非常にわずかであり、しかもこれらの研究は動力学を考慮していない。そこで、本論文では機構の剛性行列を考慮した運動学的な解析を行い、その結果を用いて、産業用ロボットにより実現可能な協調制御システムの構成法について示す。

1．3 研究の目的

本論文は、

先端に弾性部の付加された複数のマニピュレータが１つの対象物を ハンドリングするための協調系の機構的な解析と制御手法の確立

を目的とする。

具体的には

1) 先端に付加された弾性部の特性を剛性行列により表現し、運動学、逆運動学計算法を示す。また、トルク制御を利用した協調制御系の設計を行ない、２つの１自由度機構を用いた実験によりその正当性を検証する。

2) 運動学計算の際の機構的な解析結果を用いて、現状の産業用ロボットを利用した協調制御システムの構成法を明らかにし、クレーンとロボットの協調制御いよる重量物ハンドリングに適用し、その実用性を証明する。

を扱う。1)において、先端に力センサ等の弾性部が付加されたマニピュレータの制御理論を展開する。2)では、産業用ロボットの協調制御を念頭におき、ロボット先端に弾性部を導入するという手法を用い、速度コントローラを前提とした協調制御系を設計する。

本論文では、マニピュレータを剛体とみなし、マニピュレータ先端に付加された力センサ等の機構の剛性のみを考慮した解析、設計を行なう。これは、マニピュレータ先端に力センサ等の弾性部が導入された場合を想定している。現実には、マニピュレータ各関節、リンク等の剛性が剛体とみなせない場合も多い。このような系の弾性部全てをモデル化することは制御モデルの複雑さから現状では不可能であり、本研究の対象とはしない。なお、本論文では今後、剛性行列の与えられた機構の付加されたマニピュレータを弾性マニピュレータと呼ぶ。

1．4 論文の構成

2章以降の論文の構成、各章の関連をTable.1.2、Fig.1.5に示す。

Table.1.2 論文の構成

	対象	内容	利用モデル
2章	運動学(理論)	運動学計算	剛体、弾性体空間分離モデル
3章	動力学(理論)	制御系設計	剛性行列
4章	動力学(理論)	実験	剛性行列
5章	運動学(応用)	システム設計	剛体、弾性体空間分離モデル
6章	運動学(応用)	クレーン、ロボットの協調システム開発	剛体、弾性体空間分離モデル

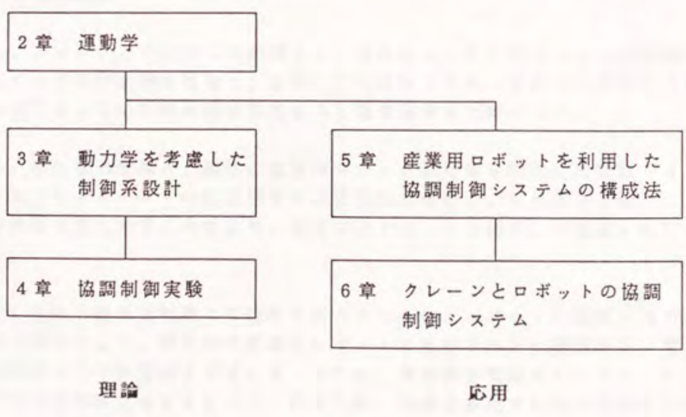


Fig.1.5 各章の関連

なお、利用モデルの剛体、弾性体空間分離モデルは第2章において定義される。

第1章では、協調制御の必要性とロボット制御技術、協調制御技術の現状、弾性を考慮した制御系設計の必要性を述べた。

第2章から第4章では理論を、第5章、第6章では実システムへの応用を扱う。

第2章においては、剛性行列でモデル化された機構を有する2つのマニピュレータが対象物を把持した場合の運動学、逆運動学手法について述べる。2つのマニピュレータが1つの対象物を把持すると、機構的に閉ループ系が構成され、幾何学的な拘束条件の考慮が必要となる。与えられた6x6剛性行列は機構中にバネとして存在するが、その大きさには一般に方向性があり、大きなたわみが発生する方向と、ほとんどたわみが発生しない方向が存在すると考えられる。そこで、剛性行列の定義された6次元空間を、マニピュレータの発生可能なトルクによりある一定基準以上のたわみが発生する空間（弾性体空間）と、基準以上のたわみが発生しない空間（剛体空間）に分離する。弾性体空間方向のたわみには力学的な釣合が付加される。その際、得られた弾性体空間におけるたわみを等価関節に置き換えることにより、関節角空間内で幾何的拘束、力学的拘束を適用できるので、解析が非常に簡略化できる。

第3章においては、動力学を考慮した複数のマニピュレータの協調制御系の構成を示す。これまで一般に研究のされてきた剛体同士の協調制御則を、剛性行列で表される機構を有するマニピュレータに拡張する。なお3章では、2章と異なり剛性行列を2つの空間に分離しない。2章においては、機構がたわみ得るか否かが問題となったのに対して、制御では目標力が伝達されれば良く、機構が固いか柔らかいかは問題とはならないからである。

第4章では、3章において設計した制御系を1自由度のバネを有する2つの機構に適用し、実機による検証実験を行なう。本章では対象物を挟みつけにより把持するため、対象物を落下させないため軌道に付加される拘束条件も同時に示す。

第5章では、第2章の結果と、現状の産業用ロボットの特徴を考慮した協調システムの構成法を論じる。ロボットの協調相手の剛性行列を解析し、その結果を利用してロボットに弾性部を導入することにより、位置コントローラを利用した協調システムが実現できる。

第6章では、5章の結果を利用して設計されたクレーンとロボットの協調システムを用いた制御実験を行なう。懸垂物の質量とロボットの発生トルクの関係から、考えられる2つの強調システム構成を示す。6．3では、懸垂物を質点モデルとし、5．3で示した制御法を利用することにより、搬送作業、位置決め点での振動制御を行ない、システムの有効性を検証する。6．4では、重量物を含むワイヤ懸垂機構の運動特性を剛性行列と慣性行列でモデル化し、手先に弾性部の導入されたロボットとの協調制御により、懸垂物の位置決めを行なう。

第7章では、結論、今後の展望を述べる。

第 2 章

協調系の運動学

第２章　協調制御系の運動学

目次

２．１　はじめに

２．２　剛性行列に基づいた剛体空間、弾性体空間への分離
　２．２．１　剛体空間、弾性体空間への分離の必要性
　２．２．２　２つの座標系間の剛性行列の関係
　２．２．３　剛体空間、弾性体空間の算出
　２．２．４　等価関節の導入
　２．２．５　剛体空間、弾性体空間への射影行列

２．３　協調系の運動学
　２．３．１　協調系の運動学
　２．３．２　幾何的拘束条件の導出
　２．３．３　力学的拘束条件の導出
　２．３．４　関節角空間内の可動空間
　２．３．５　対象物座標系の可動空間
　２．３．６　運動学計算例

２．４　協調系の逆運動学

２．５　まとめ

2．1 はじめに

本章では、弾性部を有する2つのマニピュレータが1つの対象物をハンドリングする場合の運動学について論じる。通常の開ループ機構のマニピュレータにおける運動学は、『各関節の値を定めた時の手先の位置、姿勢の算出』を指す。しかし、協調制御系においては、複数のマニピュレータが先端で1つの対象物を把持すると、閉ループが構成されるために、全ての関節が任意の値をとることはできなくなる。従って運動学計算を行う前に、機構の姿勢を一意に決定するために必要な関節数と、それらの関節の選び方を明らかにしなくてはならない。m個の関節角値を決定することにより閉ループ系の姿勢を一意に決定することができるとき、このm個の関節を本論文では機構を代表する関節と呼ぶ。

閉ループ系に弾性部が導入されると、弾性部のたわみ量も関節変数と同じように機構的自由度として扱う必要があるが、ループ中に弾性部が複数存在する場合、それぞれの弾性部のたわみは力学的釣合条件を満足するようにしか発生し得ない。つまり、閉ループ機構を代表する関節を選択するためには、力学的釣合まで含めた解析が必要となる。

本章においては、まず2．2において、機構の剛性行列を基に、剛性行列の定義された座標系の6次元空間を、弾性体空間と、剛体空間に分離する手法を述べる。但し弾性体空間とは、機構のたわみを機構的な自由度とみなすことのできる空間、また、剛体空間とはたわみを機構的な自由度とはみなせない空間を意味する。更に弾性体空間におけるたわみを等価関節でモデル化する。また、2．3において利用する射影行列についての基礎的な性質を示す。

2．3においては、弾性部を含む閉ループ系における自由度の数の算出を行なう。剛体リンクのみからなる閉ループ機構の運動学計算においては、機構を代表する特定の関節角の値が決定されると、対象物の位置、姿勢は一意に定まる。これに対して機構に弾性部が存在する場合には、関節角とは別にたわみが発生するため、このたわみも機構的な自由度として取扱う必要がある。このために2．2において求めた等価関節を利用する。等価関節は力学的な拘束関係を満たすようにしか決定できないため、任意の値を取ることができない。従って機構の自由度の算出においては等価関節を含めた機構的自由度の幾何的拘束と力学的拘束の両方を考慮する。これら2つの拘束条件の下に、任意の移動を行うことのできる関節の選択法を述べる。また、この結果と、関節角空間と対象物座標系間のヤコビ行列を利用することにより、マニピュレータ先端に設定された対象物座標系の可動空間を考察する。

2．4では逆運動学を示す。弾性部を内部に含む閉ループ系は冗長自由度系となる場合が多く、冗長自由度マニピュレータの逆運動学として行われている研究の結果がそのまま適用できる。本節ではヤコビ行列を利用した収束演算、[Chang 1986]の非線形連立方程式を解き逆運動学の大域的な最適解を算出する手法を示す。

Fig.2.1に運動学、逆運動学の手順を示す。なお、図中に記載されていない項は、その節における予備知識を説明した項である。

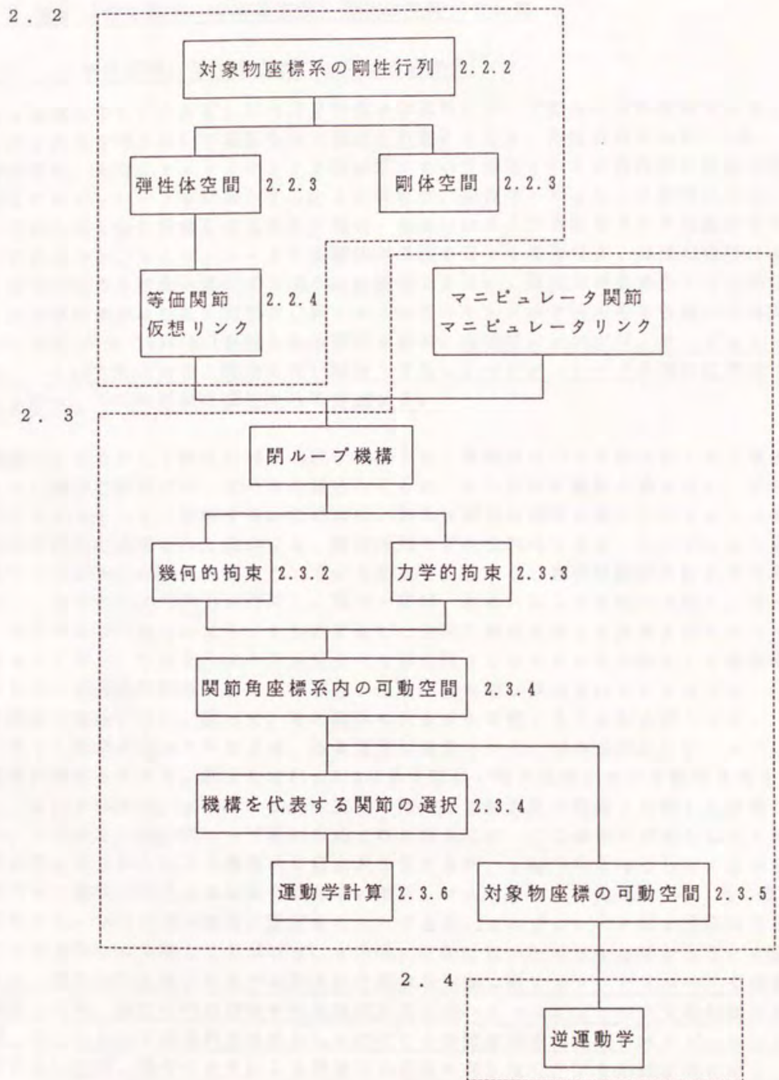


Fig.2.1 本章における運動学、逆運動学計算の手順

2．2 剛性行列に基づいた剛体空間、弾性体空間への分離

2．2．1 剛体空間、弾性体空間への分離の必要性

ある機構が与えられると、その任意の点と座標系に対して剛性行列が定義できる。例えば３次元空間において運動を行う機構を対象とすると、剛性行列が6x6となる。本研究では、先端のエンドイフェクタ座標系において表現される剛性行列が定数行列となるマニピュレータを対象とする。この仮定は、剛体マニピュレータ先端に力センサなど弾性部を含む機構が付加された場合、あるいはワイヤで懸垂された対象物等において成立つが、マニピュレータの各関節が弾性を有する場合など、機構の姿勢によって剛性行列の各要素が変化する場合には適用できない。弾性部が姿勢によって変化する場合の制御系は極めて複雑で、多リンクのフレキシブルアームを２台用いた協調制御の研究[内山 1989(b)]が観られる程度である。本研究においては、マニピュレータのリンクはたわみの全く発生しない剛体とみなし、マニピュレータ先端に取り付けられる力センサ等の機構の弾性のみを考慮する。

機構のモデルとして剛性行列を利用することは、機構中にバネを組込むことと等価である。運動学解析においてバネを組込むことは、その方向に機構が動き得る、即ち自由度を有することを意味する。このため、例えば剛性が非常に高いマニピュレータの先端が環境に固定された場合にも、剛性行列モデルを利用すると、マニピュレータの全ての関節が自由に動き得るということになる。しかし、現実に関節を動かそうとすると、すぐに過大な内力が作用し、機構の破損、あるいはトルク飽和を招く。従って、剛性行列が与えられても、６自由度全ての方向に弾性を有する機構と捉えることは望ましくない。このような６自由度全てを弾性体としたモデルを前提として運動学解析を行い逆運動学計算に利用した場合、達成不能な解が算出されることになり、運動学解析の意味がない。従って、その剛性の大きさも考慮することが必要となる。

ロボット先端の力センサなどは、ある方向には柔らかく、別の方向には固いといった機構的特性を有する。例としてFig.2.2に示す細長い棒の先端における剛性を考えると、x，y軸方向、ϕ、θ、ϕ回転方向の剛性はz軸方向の剛性と比較して非常に低い。このような棒が閉ループ系に組込まれた場合には、この棒のモデルとしてz軸方向以外にはたわみによる機構的な自由度を有するが、z軸方向にはたわみによる自由度がない機構と考えるのが妥当である。即ち、マニピュレータ先端にFig.2.2の棒が付加され、棒の先端が環境に固定されたとすると、マニピュレータはz方向以外の５自由度方向にのみ動くことができ、z方向には動けないとみなす必要がある。本論文では、剛性行列を用いてモデル化された機構を先端に有するマニピュレータを環境に固定した時、剛性行列の定義された座標系内においてマニピュレータ先端が動ける空間、即ちたわみが機構的自由度として存在する空間を弾性体空間、マニピュレータが動けない空間、即ちたわみによる機構的自由度を有しない空間を剛体空間と呼ぶ。更に、たわみは弾性体空間のみに生じ剛体空間には発生しないと考える。現実には、弾性体空間と比較して微小なたわみが剛体空間にも発生するが、弾性体空間に発生す

るたわみの大きさと比較して非常に小さいと考え無視する。

まず、２．２．２において、ある座標系において定義された剛性行列が別の座標系においてどのように変換されるかを示す。この関係を利用することにより、対象物を把持したマニピュレータの剛性行列を対象物重心座標系における剛性行列に変換することが可能となるので、マニピュレータ先端の剛性行列を対象物重心座標系において定義された剛性行列とみなして定式化することができる。２．２．３では、剛体空間、弾性体空間を定義し、与えられた剛性行列を基に、剛性行列の定義された座標系の６次元空間を剛体空間、弾性体空間に分離する手法を示す。なお、本章における空間の分離は主に運動学を意識したものであり、３章に示す動力学を考慮した協調制御系の設計においては剛性行列がそのまま利用される。２．２．４では分離された弾性体空間のたわみを表現するための変数として等価関節モデルを導入することを提案する。２．２．５では、それぞれの空間への直交射影行列を示す。これは２．３において必要となる力の釣合を考える際用いられる。これらの関係をFig.2.3に示す。

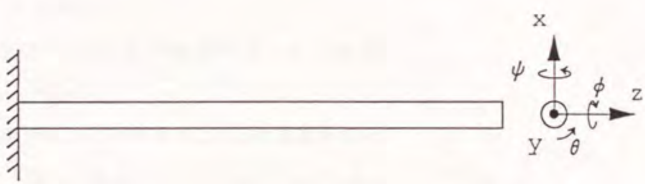


Fig.2.2 固い方向と柔らかい方向を有する機構例

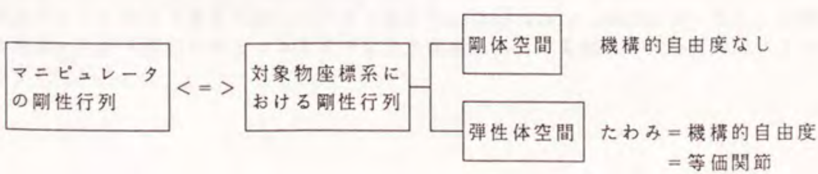


Fig.2.3 剛性行列の解析

2．2．2　2つの座標系間の剛性行列の関係

複数のマニピュレータが同一の対象物をある加速度軌道に沿って搬送したり、位置決めを行う場合、対象物に必要となる力は対象物の重心に原点を持つ対象物座標系で記述するするのが便利である。これに合せて、それぞれのマニピュレータ先端の機構の剛性も対象物座標系で表現しておくと都合が良い。本項では、ハンドが対象物をしっかりと把持しており、ハンドと対象物の相対位置、姿勢が固定されるものとし（このような把持形態を本論文ではrigidな把握と呼ぶ）、ある座標系において定義された剛性行列を別の座標系で表現するための変換式の導出手順を示す。

マニピュレータのハンド座標系Σ_hにおける剛性行列をK_hとし、対象物重心に原点を持つ対象物座標系をΣ_oとする。Σ_hにおける微小移動ベクトル${}^h\Delta x_h$に対するΣ_oの微小移動ベクトル${}^o\Delta x_o$のヤコビ行列をJ_hとする(Fig.2.4)。但し上付添字hはΣ_hによる表記を、oはΣ_oによる表記をそれぞれ意味する。ハンドが対象物をrigidに把持しているので、このJ_hはロボットの姿勢によらず定数行列となる。この時Σ_hの基準座標系における位置、姿勢の微小変位をΔx_h、これに付随してΣ_oに発生する微小変位をΔx_oとする。これら2つの間には

$$ {}^h\Delta x_h = J_h\,{}^o\Delta x_o \qquad (2\text{-}1) $$

の関係が成立つ。${}^h\Delta x_h$の変位によってΣ_hには

$$ {}^hF_h = K_h\,{}^h\Delta x_h $$

の力が発生する。この力をΣ_oにより表現すると

$$ {}^oF_h = J_h^TK_h\,{}^h\Delta x_h = (J_h^TK_hJ_h)\,{}^o\Delta x_o = K\,{}^o\Delta x_o \qquad (2\text{-}2) $$

$$ K = J_h^TK_hJ_h $$

となる。式(2-2)から、Σ_hにおける剛性行列K_hは、この座標系とヤコビ行列がJ_hの関係にあるΣ_oにおいては$J_h^TK_hJ_h$として表現される。これをKとおくと、Kもやはり対称行列となる。即ち、ハンド座標系の剛性がK_hであるマニピュレータが対象物をrigidに把持した場合、マニピュレータが対象物重心を剛性行列Kで把持しているとみなすことができる。従って今後、単にマニピュレータは対象物座標系において剛性行列Kを有するとして定式化を進める。なお、式(2-2)の結果は、ヤコビ行列が定義できるいかなる座標系間においても成立ち、[Salisbery 1981]においては、関節角空間における剛性行列とエンドイフェクタ座標系における剛性行列の変換式として示されている。

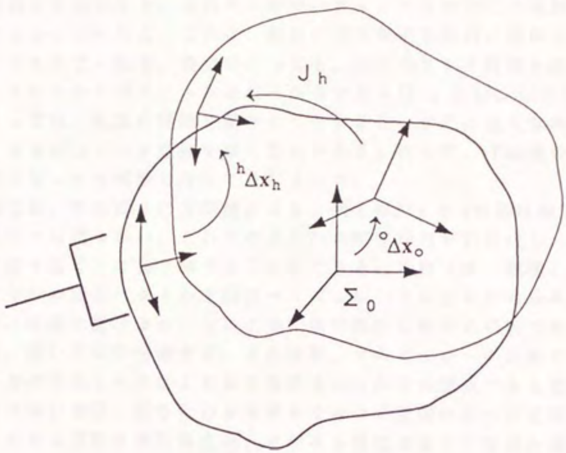


Fig.2.4 対象物座標系とマニピュレータハンド座標系の関係

2．2．3 剛体空間、弾性体空間の算出

機構のモデルとして剛性行列を利用することは、機構中にバネを組込むことと等価である。運動学解析においてバネを組込むことは、その方向に機構が動き得る、即ちたわみによる機構的自由度を有することを意味する。このため、２つのマニピュレータが同一の対象物を把持した場合でも、どちらかのマニピュレータ先端に剛性行列で表現された機構が存在すると、それぞれのマニピュレータの全ての関節は任意の値を取ることができることになる。これは、剛性行列を有する機構の両側に存在するリンク機構がそれぞれ独立に位置、姿勢をとっても、２つのリンク機構先端の位置、姿勢の偏差だけバネがたわみ得るとみなされるからである(Fig.2.5)。しかし、剛性行列の大きさによっては、現実に関節を動かそうとすると、すぐに過大な内力が作用し、機構の破損、あるいはトルク飽和を招く恐れがある。従って、『機構の固さ』に応じて動けるか動けないかを判断しなくてはならない。

一般の機構では、その固さに方向性がある。例えばFig.2.2の棒は軸方向に固く、それ以外の方向には柔らかい。これは与えられた剛性行列を対角化し、固有値と固有ベクトルを利用することにより調べることができる。本節では、機構の先端を環境に固定し、それぞれの固有ベクトル方向にマニピュレータをある決められた量だけ動かそうとした時、実際に動けるか、トルク飽和等が発生し実現不可能であるかによって、柔らかい方向、固い方向を分離する。この結果、マニピュレータが動ける空間、即ちマニピュレータの発生トルクによりある基準量のたわみを発生できる空間と、マニピュレータが動けない空間、即ちたわみを発生できない空間の２つの空間が得られる。たわみを発生できる空間が弾性体空間、たわみを発生できない空間が剛体空間である。

以下に、剛性行列の定義された座標系の６次元空間を、それぞれの空間に分離する手法を示す。

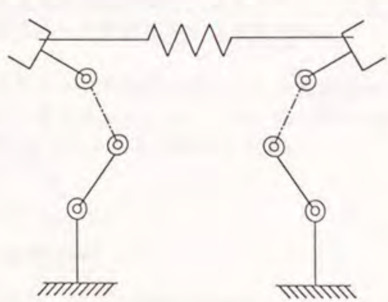


Fig.2.5 剛性行列としてモデル化された機構を含む閉ループ系

剛性行列は対称行列となるので、線形代数の知識により、直交行列により対角化することができる。

$$K' = U^{-1} K U \tag{2-3}$$

但し

$$K' = \mathrm{diag}(\lambda_1\ \lambda_2\ \lambda_3\ \lambda_4\ \lambda_5\ \lambda_6)$$
$$U = [\ \mathbf{u}_1\ \mathbf{u}_2\ \mathbf{u}_3\ \mathbf{u}_4\ \mathbf{u}_5\ \mathbf{u}_6\ ]$$

とする。λ_iは行列Kの固有値で、$\mathbf{u}_i$はλ_iに対応した固有ベクトルである。Uは直交行列なので、全ての固有ベクトルの大きさは1である。

この機構に力**F**が加わると、これによって生じるたわみΔ**d**は

$$\Delta \mathbf{d} = K^{-1} \mathbf{F} \tag{2-4}$$

となる。ここで

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{d} &= U \mathbf{z} \\ \mathbf{F} &= U \mathbf{f} \end{aligned} \tag{2-5}$$

と置くと

$$\mathbf{z} = U^{-1} K^{-1} U \mathbf{f} = K'^{-1} \mathbf{f} \tag{2-6}$$
$$K'^{-1} = \mathrm{diag}(\ 1/\lambda_1\ 1/\lambda_2\ \cdot\cdot\cdot\ 1/\lambda_6\ )$$

となる。Δ**d**をUの張る6つの正規直交基底により表現したものが**z**であり、**f**も**F**を同様の基底で表現したものである(Fig.2.6)。式(2-6)のK'^{-1}は対角行列であるから、剛性行列Kで表される機構は変換Uにより、6つの正規直交基底$\mathbf{u}_1$～$\mathbf{u}_6$の方向にそれぞれ独立のバネを持つ機構として表現されたことになる。固有値λ_iはそれぞれの固有ベクトル方向へのバネの固さを表しているので、それぞれの固有ベクトル方向にマニピュレータをある決められた量だけ動かそうとした時、動けるか動けないかは、固有値の大きさを基準として決定することができる。

6つの基底中、剛体方向とみなさなければならない基底がm(m≦6)個あったとし、m個を添字の小さい方から新たに$\mathbf{v}_1$、$\mathbf{v}_2$、…、$\mathbf{v}_m$、残りの6-m個のベクトルを$\mathbf{v}_{m+1}$、$\mathbf{v}_{m+2}$、…、$\mathbf{v}_6$として、式(2-7)のように行列Vを作る。

$$\begin{aligned} V_r &= [\ \mathbf{v}_1\ \cdots\ \mathbf{v}_m\ ] \\ V_f &= [\ \mathbf{v}_{m+1}\ \cdots\ \mathbf{v}_6\ ] \end{aligned} \tag{2-7}$$

$$V_r \in R^{6\times m},\ V_f \in R^{6\times(6-m)}$$

ここでV_rの張る空間をS(V_r)、V_fの張る空間をS(V_f)とすると、剛体空間、弾性体空間はそれぞれS(V_r)、S(V_f)として求まる。

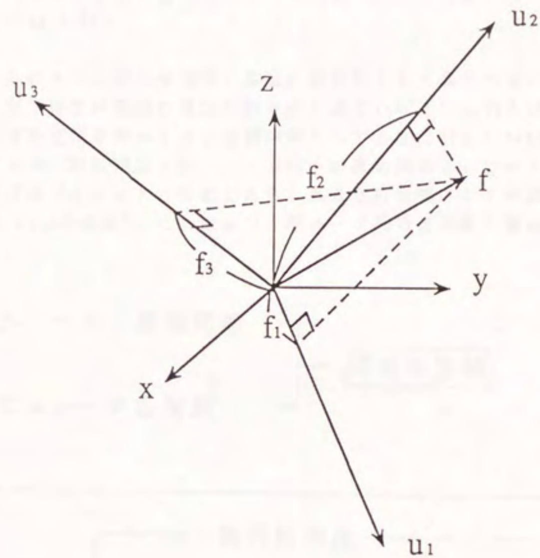


Fig.2.6 剛性行列の基底と剛性

２．２．４ 等価関節の導入

本項では、弾性体空間のたわみを等価関節としてモデル化する手法を提案する。閉ループ系では、幾何的拘束条件と力学的拘束条件の２つが課せられる。たわみを等価関節でモデル化し、他の関節と同じ関節角空間の基底としておくことで、この２つの拘束条件を関節角空間で同時に扱うことが可能となるため、可動空間の解析が非常に分りやすくなる(Fig.2.7)。

弾性体空間のたわみは、弾性体空間の基底の線形和として表される。従って、導入する等価関節の数は弾性体空間の基底の数と同じとすればよい。例えば、Fig.2.8(a)では、ｘ方向に可動空間を持つ１つの直動関節として、またFig.2.8(b)においてはｘ，ｙ，ｚ軸回りの３つの回転関節と、ｘ，ｙ方向への直動関節としてモデル化する。３つの回転関節は球面ジョイントと等価であり、長さ０の仮想リンクが導入されていると考える(Fig.2.8(b)の点線)。これにより、閉ループ系の自由度の算出に式(2-11)が適用可能となる。

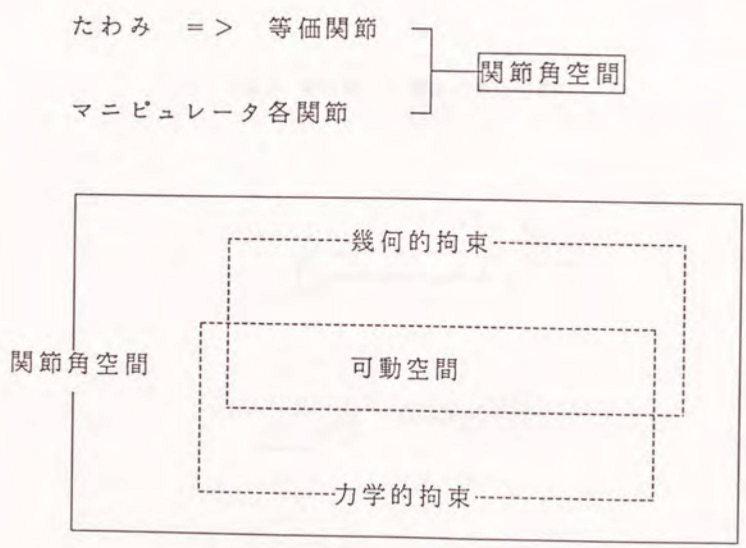
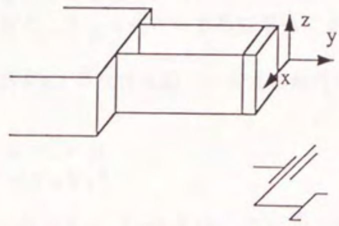
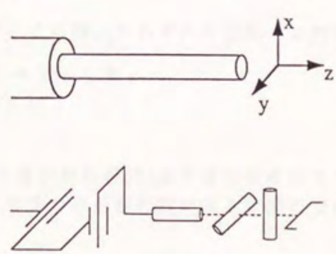


Fig.2.7 関節角空間における幾何的拘束条件と力学的拘束条件

２．３では、この等価関節を利用して閉ループ系を解析する。



（ａ） 平行板バネ機構の等価関節



（ｂ） 弾性アームの等価関節

Fig.2.8 等価関節モデル

2．2．5 剛体空間、弾性体空間への射影行列

本項では、2．2．3で求めたそれぞれの空間への、直交射影行列と射影行列間の関係を示す。2．3に示す運動学においては、対象物座標系からみたそれぞれのマニピュレータ先端の剛性行列が共に弾性体空間となる方向に、力の釣合条件が付加される。その際、それぞれの機構のたわみによって発生する力のうち、弾性体空間に作用する力の成分のみを取り出すことが必要である。これは、力ベクトルに、以下に示す射影行列による1次変換をほどこすことにより容易に実現できる。

剛体空間への直交射影行列Pr、弾性体空間への直交射影行列Pfはそれぞれ射影行列の基礎的な知識から

$$P_r = V_r(V_r^T V_r)^{-1} V_r^T = V_r V_r^T$$
$$P_f = V_f(V_f^T V_f)^{-1} V_f^T = V_f V_f^T \qquad (2\text{-}8)$$

として求めることができる。但しV_r、V_fは式(2-7)の行列である。射影行列は、その性質から

$$P_r^2 = P_r$$
$$P_f^2 = P_f$$

となる。$S(V_r)$、$S(V_f)$は直交補空間の関係であるから、剛性行列の定義された座標空間$S(R^6)$は

$$S(R^6) = S(V_r) \dot{+} S(V_f)$$

となる。但し$\dot{+}$は直和を表す。この時、それぞれの空間への射影行列の関係は

$$P_r P_f = P_f P_r = 0, \quad I - P_r = P_f$$

となる。

また、同じ空間内に2つの直交射影行列(直交補空間の関係である必要はない)P_1、P_2が定義されていると、この2つの射影行列の張る空間の交わりの空間への直交射影行列P_{12}は

$$P_{12} = 2P_1(P_1 + P^2)^+ P_2 \qquad (2\text{-}9)$$

として求まる。

これらの射影行列を用いることにより、それぞれの弾性体空間のたわみにより対象物重心に作用する力の、両方の機構が弾性体空間となる空間における釣合条件が求まる。これについては2．3に詳しく述べる。

2．3 協調系の運動学

本節では、2つのマニピュレータにより構成される閉ループ機構の姿勢の決定法について説明する。

2．3．1 協調系の運動学

2．1でも述べたように、閉ループ機構においては全ての関節が任意の値をとれるわけではない。そこで、幾つの関節を固定すれば全ての関節角が一意に決定できるかを調べる。簡単のためm自由度とn自由度の2つのマニピュレータが対象物を把持した場合について示す(Fig.2.9)。但しそれぞれのマニピュレータに導入された等価関節の数をそれぞれm_f, n_f（$m_f, n_f \leqq 6$）とする。これにより、幾何的にはそれぞれのマニピュレータの自由度は$m+m_f$、$n+n_f$となる(Fig.2.10)。まず、等価関節が任意の値をとることができると考え、幾何的な自由度を求める。閉ループ系の自由度dの一般的な算出は式(2-10)で与えられる。

$$d = 6(D_l - 1) - 5D_j \tag{2-10}$$

但しD_lは閉ループ系を構成するリンク数、D_jは関節数である。Fig.2.10の機構に式(2-10)を適用すると、

$$d = 6(m + m_f + n + n_f - 1) - 5(m + m_f + n + n_f)$$

となる。それぞれのマニピュレータ先端は対象物をrigidに把持しているので、2つのマニピュレータの先端リンクと対象物を合せて1本のリンクとみなす。

しかし本研究における閉ループ系は関節中に等価関節としてバネのたわみが含まれており、等価関節は力の釣合条件を満たした値しかとることができない。釣合方程式の数は、両方のマニピュレータが共に弾性体空間となる空間の次元と同じである。従ってこの次元をp_fとすると、閉ループ系の自由度は

$$d = 6(m + m_f + n + n_f - 1) - 5(m + m_f + n + n_f) - p_f \tag{2-11}$$

となる。これが弾性部を含む閉ループ系の自由度である。p_fは式(2-9)を使って得られる2つの弾性体空間の交わりの空間への直交射影行列のランクとして算出できる。

式(2-11)は自由度の算出には便利であるが、本機構は力の拘束が付加された等価関節を含んでいるため、d個を任意に選ぶことができない。ところが式(2-11)からではd個の関節の選び方が不明である。また、式(2-11)は関節が平面リンク機構となるよう配置された場合にも利用できない。そこで、本章ではヤコビ行列と射影行列を利用して、機構の自由度、対象物可動空間等の解析を行なう。本手法は『<u>閉ループ系が構成された状態において幾つの関節を自由に動かすことができるか</u>』を調べることにより、逆に『<u>動けなくするためには幾つの関節を固定すればよいか</u>』を決定することにより、機構の自由度を算出するものである。

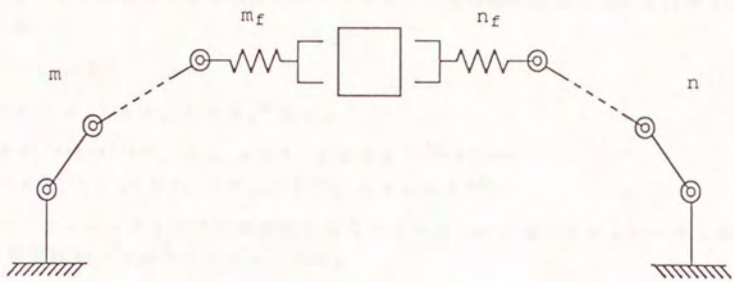


Fig.2.9 2つのマニピュレータの協調系

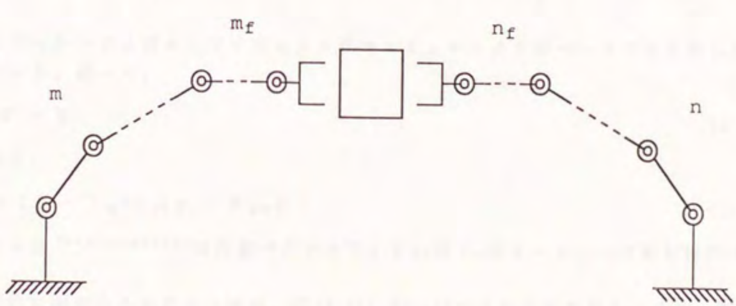


Fig.2.10 等価関節を含む閉ループ機構

2．3．2 幾何的拘束条件の導出

2つのマニピュレータにより構成される閉ループ機構においては、幾何学的拘束と力学的拘束が付加される。この2つの拘束により決定される空間の次元が求める自由度である。まず、マニピュレータ1のベースをベース、マニピュレータ2のベースをエンドイフェクタとみなした1つのマニピュレータAを想定する(Fig.2.11)。このマニピュレータAの関節角座標系とエンドイフェクタ座標系との間にヤコビ行列 J_e を定義する。

$$\Delta x_e = J_e \Delta \theta \qquad (2\text{-}12)$$

$$\Delta \theta = [\ \Delta \theta_1^T\ \Delta \theta_{f1}^T\ \Delta \theta_2^T\ \Delta \theta_{f2}^T\ ]^T$$

$$J_e \in R^{6\times(m+n+mf+nf)},\ \Delta x_e \in R^6,\ \Delta \theta \in R^{(m+n+mf+nf)}$$

$$\Delta \theta_1 \in R^m,\ \Delta \theta_2 \in R^n,\ \Delta \theta_{f1} \in R^{mf},\ \Delta \theta_{f2} \in R^{nf}$$

θ_i はマニピュレータ i の各関節値からなるベクトル、θ_{fi} はマニピュレータ i の弾性部の等価関節からなるベクトルである。

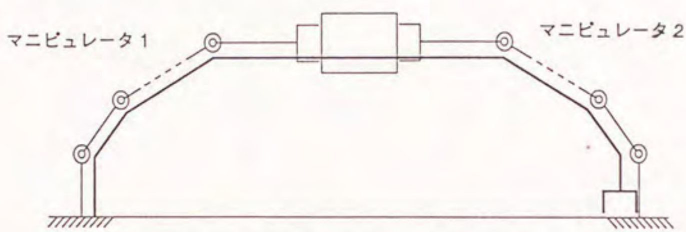


Fig.2.11 閉ループ系のマニピュレータモデル

マニピュレータAのエンドイフェクタはマニピュレータ2のベースであるから固定されている。従って、

$$J_e \Delta \theta = 0 \qquad (2\text{-}13)$$

これより、

$$\Delta \theta = (I - J_e^+ J_e)\, y = P_{ne}\, y \qquad (2\text{-}14)$$

但し $y \in R^{(m+n+mf+nf)\times 1}$ は任意ベクトルで、P_{ne} は J_e のカーネルへの射影行列である。

幾何的な拘束のみを考えた場合、式(2-13),(2-14)などからもわかるように、閉ループ系の解析は冗長自由度マニピュレータの冗長度の考察と全く同じものとなる。つまり、閉ループ系において機構の自由度を考えることは、冗長自由度マニピュレータの手先に目標速度0を与えた場合の冗長自由度空間の次元を考えることと等価である。

幾何的な自由度のみであればP$_{no}$のランクを算出することで求めることができるが、弾性部に導入された等価関節は力学的拘束を満たすものでなければならない。即ち、2つのマニピュレータが共に弾性体として存在する空間においては、それぞれのマニピュレータのたわみは力の釣合を満足しなければならない。次項ではこのための条件を示す。

2．3．3 力学的拘束条件の導出

力学的拘束条件を求める。2．2．2に示したように、マニピュレータの剛性行列が対象物座標系において定義されているとする。2つのマニピュレータの剛性行列をそれぞれK_1、K_2とし、それぞれの剛性行列を対角化し剛体空間と弾性体空間に分離する。この結果得られる弾性体空間への直交射影行列をP_{fi}(i=1,2)とする。但しこの射影行列も対象物座標系において定義されている。

対象物座標系において、弾性体空間のたわみが発生する力を求める。マニピュレータiの発生するたわみ$\Delta\theta_{fi}$の各要素は、対象物座標系からみると式(2-7)のV_{fi}のそれぞれの縦ベクトル方向に発生している。従って、$\Delta\theta_{fi}$によって対象物座標系に発生しているたわみは$V_{fi}\Delta\theta_{fi}$となる。対象物座標系で表現された剛性行列はK_iであるから、マニピュレータiのたわみにより、対象物座標系に発生する力は$K_i V_{fi}\Delta\theta_{fi}$となる。

力の釣合は、2つのマニピュレータが共に弾性を有する方向でのみ考えれば良い(Fig.2.12)。この空間への直交射影行列P_{12}は式(2-15)として求まる。

$$P_{12} = 2P_{f1}(P_{f1} + P_{f2})^{+}P_{f2} \tag{2-15}$$

この射影行列を用いることにより、力の釣合条件は式(2-16)として求まる。

$$P_{12}(K_1 V_{f1}\Delta\theta_{f1} + K_2 V_{f2}\Delta\theta_{f2}) = P_{12} m \mathbf{g}' \tag{2-16}$$

mは対象物の質量である。$\mathbf{g}'$は対象物座標系から見た重力加速度ベクトルであり、厳密には$\Delta\theta_{f1}$、あるいは$\Delta\theta_{f2}$が算出された後でないと決定することができない。しかし、それぞれのたわみにより発生する対象物の姿勢変化量を微小とすると、残りのマニピュレータの関節角を利用することにより予め近似値として求めておくことができる。ここで式(2-16)を式(2-17)のように書き直す。

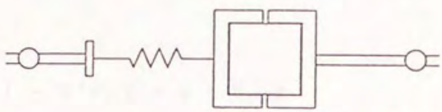
$$H\Delta\theta = P_{12} m \mathbf{g}' \tag{2-17}$$

但し

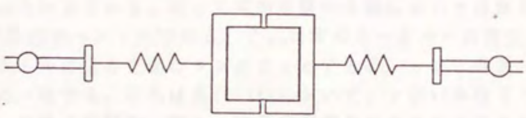
$$H = [\ 0 \quad P_{12}K_1V_{f1} \quad 0 \quad P_{12}K_2V_{f2}\ ]$$

とする。これにより、力学的拘束条件を関節角ベクトルで表現することができた。従って、幾何的拘束条件と組合せることにより、関節角空間内の部分空間として、可動空間が算出できる。

力学的拘束条件



片方のマニピュレータのみがバネとして存在する場合



$$H\Delta\theta = P_{12}m g', \quad H = [\ 0 \quad P_{12}K_1V_{f1} \quad 0 \quad P_{12}K_2V_{f2}\ ]$$

両方のマニピュレータがバネとして存在する場合

Fig.2.12 力学的拘束条件

２．３．４ 関節角空間内の可動空間

幾何的拘束条件、力の釣合条件を用いることにより、マニピュレータの可動空間が算出できる。この結果、マニピュレータのいくつの関節を任意に動かせるかが明らかとなる。

式(2-13)と式(2-17)を合せると

$$W\Delta\theta = \begin{bmatrix} 0 \\ P_{12} m \mathbf{g}' \end{bmatrix} \tag{2-18}$$

が得られる。但し

$$W = \begin{bmatrix} J_e \\ H \end{bmatrix}$$

これより

$$\Delta\theta = \mathbf{c} + (I - W^{+}W)\mathbf{y} = \mathbf{c} + P_{nw}\mathbf{y} \tag{2-19}$$

$$P_{nw} = I - W^{+}W$$

$$\mathbf{c} = W^{+}\begin{bmatrix} 0 \\ P_{12} m \mathbf{g}' \end{bmatrix}$$

として機構の各関節の可動空間が算出できる。$\mathbf{c}$は定数ベクトルで、物理的には重力による弾性部のたわみである。従って可動空間の考察においては無視して良い。$\mathbf{y} \in R^{(m+n+mf+nf)}$は任意ベクトルである。$P_{nw}$はWのカーネルへの直交射影行列で、行列$P_{nw}$の縦ベクトルの張る空間のランクをsとすると、sは、自由に動かすことのできる関節の数と一致する。これは式(2-19)において、$\mathbf{y}$がいかなるベクトルであっても、$\Delta\theta$はP_{nw}の張る空間内、即ちs次元空間内のベクトルとなるからである。

次に、自由に動かすことのできる関節の選択法を示す。まず、式(2-19)の連立方程式の中から適当なs個を取り出し、これを新たに

$$\Delta\theta_s = A\mathbf{y} + \mathbf{c}_s \tag{2-20}$$

と置く。但し$\mathbf{c}_s$は定数ベクトルであり、$A \in R^{s\times(m+n+mf+nf)}$となる。この時Aのランクがsであれば任意の$\Delta\theta_s$に対応した$\mathbf{y}$が必ず存在する。従って、Aのランクがsとなるように選ばれた$\Delta\theta_s$の要素は任意に動かすことが可能である。また、残りの$m+n+m_f+n_f-s$個の関節については、以下のように算出できる。式(2-19)式から式(2-20)を除いた$m+n+m_f+n_f-s$個の連立方程式の係数をみると、これは行列Aの横ベクトルの線形和として表される。従って、$\Delta\theta_s$の各要素の線形和で$\Delta\theta$の残りの関節角値が求まる。

このことから、ある姿勢が与えられた時、式(2-20)のAがフルランクとなるように

固定する関節を予め選んでおけば、$\Delta\theta_s=0$とした時、$\Delta\theta$の全ての要素も0となり、完全に機構が固定されたことになる。つまり、式(2-20)のAをフルランクとするθ_sを機構を代表する関節として選ぶことができる。

式(2-20)では、予め初期姿勢が与えられた場合において、機構を代表するs個の関節の数とその選択法を示した。初期姿勢が与えられていない場合のs個の関節の選び方に関しては、もはや一般的な決定法はない。しかし、閉ループ機構が退化状態にない、即ちWがランク落ちしていない初期姿勢においてθ_sが決定されていれば、Wのランク落ちのない閉ループ系の姿勢はθ_sの設定により一意に決定できる。Wのランク落ちは、例えば2つの6自由度マニピュレータの協調において、片方のマニピュレータが退化状態となった時などに生じるが、本論文ではマニピュレータが特異姿勢となったり通過したりすることは想定せず、θ_sの決定により閉ループ系の姿勢が一意に決定できる場合のみを扱うこととする。この前提により、s個の関節値が与えられるとこれに応じて残りの関節値が決定される。即ち

$$\theta = \theta(\theta_s) \tag{2-21}$$

となる。式(2-21)により機構の全ての関節値が決定されるので、これにより閉ループ中に定義された対象物座標系への座標変換行列が求まり、対象物座標系の位置、姿勢が決定される。

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\theta)$$

この手法については、DH記法を用いた手法が代表的なものであり、[Paul 1981]などに詳しい解説があるので本論では省略する。

2．3．5 対象物座標系の可動空間

本項では、2つのマニピュレータ先端で把持された対象物を、6自由度方向に動かすための機構的条件についての考察を行う。2．4の逆運動学計算は、この可動空間内に誤差ベクトルが存在することが前提となる。

対象物位置、姿勢の微小変位と関節角ベクトルの微小変位の関係を表すヤコビ行列J_oを定義する。

$$\Delta x = J_o \Delta \theta \tag{2-22}$$

これに式(2-19)を代入すると

$$\Delta x = J_o \mathbf{c} + J_o P_{nw} \mathbf{y} \tag{2-23}$$

を得る。式(2-23)の右辺第1項は、可動空間の算出を行うに当っては定数ベクトルとみなしてよい。従って、右辺第2項のみに着目する。任意ベクトル$\mathbf{y}$により作りだすことができるベクトル$J_o P_{nw} \mathbf{y}$は、行列$J_o P_{nw}$の縦ベクトルの張る空間の要素となるので、対象物を6自由度方向に動かすことのできる条件は、$J_o P_{nw}$のランクが6となることである(Fig. 2.13)。

$J_o P_{nw}$のランクが6であるには、J_oのランクが6、P_{nw}のランクが6以上となることが必要である。J_oのランクが6となることは、それぞれのマニピュレータが各々等価関節を含めて先端で6次元方向の機構的自由度を持つことを意味しており、P_{nw}のランクが6以上であることは、概念的には6つ以上の関節の値を任意に設定することが可能であることを意味する。2．3．4で述べた機構を代表する関節として、少なくとも片方のマニピュレータの6自由度を選択することが可能であれば、これら2つの条件を満たすことができる。従って、式(2-19)の中の片方のマニピュレータの6関節に対応した行を利用して生成した式(2-20)の行列Aのランクが6となることが、対象物を6自由度方向に動かすことのできる条件となる。

この条件を基に、先端の対象物座標系が6自由度を有するための最低限の条件、即ち等価関節を含めた機構の自由度が12の場合の条件を求める。この条件は、例えば5章において2台の産業用ロボットの協調を実現する際に利用できる。

等価関節を含まない自由度がm、n $(m, n \leq 6)$の2つのマニピュレータを例にとり考察する。まず、それぞれのマニピュレータ先端における自由度が6であることが必要となるので、①それぞれのマニピュレータ先端には、最低6－m，6－n個の等価関節で表されるバネが付加され、更にm個の関節と6－m個の等価関節、n個の関節とn－6個の等価関節からなるそれぞれのマニピュレータのヤコビ行列のランクが6であることが必要となる(Fig. 2.14)。この6－m個のバネと6－n個のバネが共通の弾性体空間を有すると、式(2-11)からもわかるように、共有される弾性空間の次元の数だけ自由度が低下するため、閉ループ系の自由度が6よりも小さくなってしまう。従って、②それぞれのマニピュレータ先端のバネは共通の弾性空間を持たないように配

置されていなければならない。逆に、①、②が共に満たされていれば、片方のマニピュレータの6自由度を指定した時、残りのマニピュレータの位置、姿勢が一意に決定されるので、対象物座標系の可動空間は6となる。これより、それぞれのマニピュレータが等価関節を合せてそれぞれ6自由度ずつを有している場合には、条件①、②が必要十分条件となる。

また、これらの条件から、2つのマニピュレータの等価関節を除いた関節数の和は6以上必要であることが分かる。これは、関節数が6より少ない場合、等価関節の数が6よりも大きくなり、必然的に共有の弾性空間が発生してしまうことから明らかである。しかし、これらの等価関節を除いたそれぞれのマニピュレータの対象物座標における可動空間の和は6自由度全てを覆っている必要はない。このことは、両方のマニピュレータが共に同じ平面内の水平多関節型マニピュレータのような場合にも、上記の条件①、②を満たしていれば対象物を6自由度方向に動かすことができることを表している。

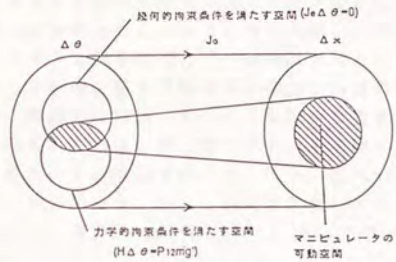


Fig.2.13 対象物座標系における可動空間

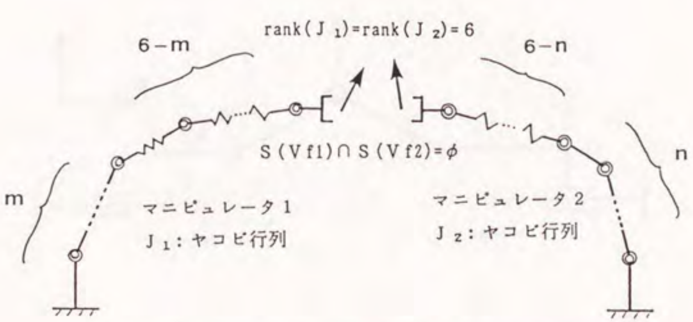


Fig.2.14 対象物の可動空間が6となるための条件

例えばFig.2.15の2次元平面の場合、それぞれのマニピュレータは共にx方向にしか自由度を有していないが、マニピュレータ先端はy方向へも動かすことができる。この理由は、お互いのマニピュレータの弾性体空間同士が作業座標空間内では補空間の関係にあっても（Fig.2.15の例では、それぞれのマニピュレータの弾性体空間はマニピュレータ先端リンクに対して垂直方向となっており、2つの弾性体空間が一次独立となっていることを意味する）、それぞれのマニピュレータが先端で6自由度を有するための等価関節以外の関節の張る空間の基底は同じとなる場合があり得る（Fig.2.15では、それぞれのマニピュレータが2自由度を有するための条件として、それぞれの等価関節に対する補空間として、両方のマニピュレータ共にx方向をとることが可能であることを意味する）からである。

次に、弾性部を含む一般の閉ループ機構における条件を考察する。
まず、それぞれのマニピュレータの弾性体空間が共通の空間を持たず、しかもどちらかの、あるいは両方のマニピュレータの自由度が6よりも大きくなった場合を考える。この場合には、幾つかの関節を固定して上の条件①、②を満たすことが可能であれば、対象物の可動空間の次元が6となる。等価関節以外の関節が増加した場合には、基本的には制御は行いやすくなるので、この結果は当然といえる。
バネの次元が増加した場合、即ち等価関節が増加し共通の弾性体空間が発生した場合の関係については、直感的には幾つかのバネを除いた結果が条件①、②を満たしていればよいと考えられる。これは、もし幾つかのバネを除いた状態で条件①、②が満たされれば、この状態でバネが追加されたとしても、式(2-11)から閉ループ系の自由度は低下は低下しないからである。但し、追加されたバネによって、関節角空間内の可動空間は変化するので、厳密には式(2-23)のJ_oP_{nw}のランクが6となるかどうかを調べる必要がある。

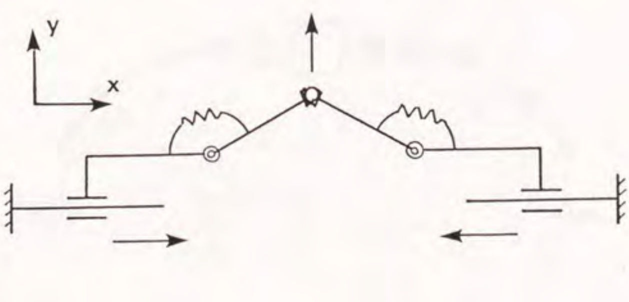


Fig.2.15 両方のマニピュレータが弾性空間を共有する場合

2．3．6 運動学計算例

次に、先端にそれぞれ6次元のバネを有する2つの6自由度マニピュレータが物体を把持している場合の運動学計算例を示す。この時の閉ループ系の自由度は、両方のマニピュレータが共に退化状態でなければ12となる。この12の関節として、片方のマニピュレータの6関節と6つのバネのたわみが指定された場合と、両方のマニピュレータの6関節ずつが指定された場合について、以下に計算例を示す。

計算例1（片方のマニピュレータの関節角とバネのたわみが指定された場合）

2つのマニピュレータ1、2のうち、マニピュレータ1の6つの関節θ_{11}〜θ_{16}とθ_{1f1}〜θ_{1f6}が指定されると(Fig.2.16)、対象物の位置、姿勢は単独のマニピュレータと同様の手順で算出できる。但し関節角の添字の左側数字はマニピュレータの番号を表し、右側は関節の番号を表す。またfは等価関節であることを表す。

$$x = f(\theta_1, \theta_{f1})$$

$$\theta_1 = [\ \theta_{11}\ \theta_{12}\ \theta_{13}\ \theta_{14}\ \theta_{15}\ \theta_{16}\ ]^T$$
$$\theta_{f1} = [\ \theta_{1f1}\ \theta_{1f2}\ \theta_{1f3}\ \theta_{1f4}\ \theta_{1f5}\ \theta_{1f6}\ ]^T$$

残りの12の関節に関しては、まず、式(2-16)から

$$\theta_{f2} = K_2^{-1} K_1 (m g' - \theta_{f1})$$

としてθ_{f2}が算出される。但し$P_{12}=I$、$V_{f1}=I$、$V_{f2}=I$である。これにより、マニピュレータ2の6つの関節に対する手先の位置、姿勢が求まるので、単独のマニピュレータの場合と同様の手順でθ_2が決定される。

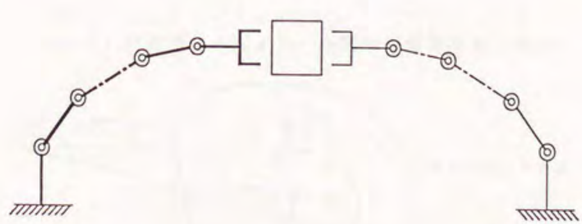


Fig.2.16 片方のマニピュレータの関節とバネのたわみが指定された場合

計算例２（両方のマニピュレータの関節が指定された場合）

２つのマニピュレータの関節角値θ_1、θ_2が指定された場合(Fig.2.17)を考える。

対象物座標系をΣ$_0$とし、それぞれの機構の弾性部にたわみが全くない場合のマニピュレータエンドイフェクタ座標系Σ$_1$、Σ$_2$をΣ$_0$と同じとなるように設定する。また、たわみが生じている時のマニピュレータエンドイフェクタ座標系をΣ$_1'$、Σ$_2'$とする(Fig.2.18)。Σ$_1'$とΣ$_2'$の相対的な位置、姿勢の変位は、２つのマニピュレータのそれぞれの６関節が与えられれば計算することができる。Σ$_2'$からΣ$_1'$への微小変位をΣ$_0$において表示したものをθ_fとする。但し、θ_fの各成分は微小とする。この時、θ_fとθ_{f1}、θ_{f2}の関係は

$$\theta_{f1} - \theta_{f2} = \theta_f$$

である。これと、式(2-16)の力の釣合条件式を連立することにより

$$\theta_{f1} = (K_1 + K_2)^{-1}(m g' - K_2 \theta_f)$$
$$\theta_{f2} = (K_1 + K_2)^{-1}(m g' - K_1 \theta_f)$$

が得られる。対象物座標系は、θ_1、θ_{f1}と同時変換行列を利用することで算出できる。

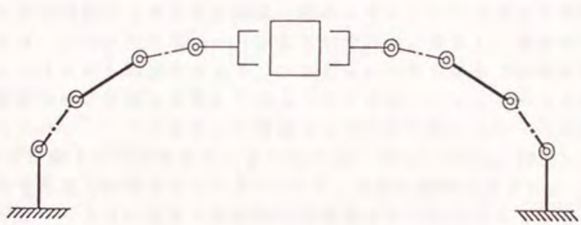


Fig.2.17 両方のマニピュレータ関節が指定された場合

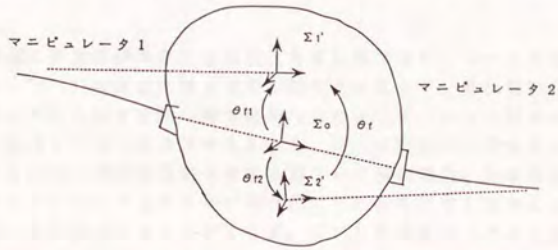


Fig.2.18 ２つのマニピュレータ先端の座標系

2．4 協調系の逆運動学

本節では、閉ループ系中に存在する対象物座標系の達成可能な目標位置、姿勢が与えられた場合を想定し、逆運動学計算法について示す。

対象物に目標位置、姿勢が与えられた時の各関節値は、機構が冗長自由度とならなければ

$$\theta_{sd} = f^{-1}(x_d) \qquad (2\text{-}24)$$

$$\theta_d = g(\theta_{sd}) \qquad (2\text{-}25)$$

によって一意に算出できる。但し、x_dは対象物の目標位置、姿勢、θ_{sd}は閉ループ機構を代表する関節角を要素とするベクトルでx_dを達成することのできる解を、θ_dは閉ループ系の全ての関節角を要素とするベクトルでx_dを達成できる解をそれぞれ表す。これらの式を解析的に解くことができるかどうかは、マニピュレータの関節配置、機構を代表する関節の選び方に依存している。一般のマニピュレータでは、逆に解析解を得ることができるよう関節配置の設計を行うことが好ましいとされているが、本論文が対象とするような力学的拘束が付加されるような機構においては、一般に収束演算が必要となる。

さて、これまで行われてきた６自由度の剛体マニピュレータ同士の協調制御系においては、例えば、２つのマニピュレータをそれぞれＡ，Ｂとし、機構を代表する関節をマニピュレータＡの６関節とすると、マニピュレータＢの６つの関節角がマニピュレータＡの関節角値の関数となる。このように片方のマニピュレータの目標関節角をもう１方のマニピュレータの関節角の関数として求めておくといった形態が、リーダ/フォロワ型の形態として研究されてきた[Alford 1984],[Zheng 1986],[Tao 1987]（但し動力学を考慮した場合のリーダ/フォロワは別の意味を表す）。[Alford 1984]では、マニピュレータＢの位置を対象物の目標値からでなくマニピュレータＡの現在の関節角からリアル・タイムで算出することにより、マニピュレータＡの基準座標系における誤差に影響されずにマニピュレータＡとの相対位置、姿勢を目標値に保つことができ、対象物に過大な内力が加わることを防ぐことができることが主張されている。

しかし、機構に弾性部が存在する場合、あるいはマニピュレータが冗長自由度を有する場合には、(2-16)の逆変換はもはや１対１とはならず、解は無数に存在する。このような場合に考えられる手法の最も簡単なものとして、６つの関節のみを利用し、残りの関節は固定しておく方法が考えられる。例えば両方の６自由度マニピュレータＡ，Ｂが共に６次元の弾性体空間を有する閉ループ系の場合、冗長自由度が６となるので、予めマニピュレータＡの６つの弾性部のたわみを決定しておくことにより、逆運動学の解を一意に決定することができる。これを利用することにより、できるだけマニピュレータ先端に力がかからないような解、あるいは対象物に加えるべき目標内力を達成することのできる解を得ることができる。この考え方は３章の動力学を考慮

した制御系設計において用いられている。

一般に冗長自由度マニピュレータの逆運動学では、評価関数とヤコビ行列の擬似逆行列を用いた収束演算法[Klein 1983]が用いられている。この手法は分りやすいが、得られる逆運動学解は収束演算の初期値に大きく依存しており、逆運動学解の最適性という点ではほとんど意味がない。このため、大域的な逆運動学の最適解を得る手法として非線形連立方程式[Chang 1986]が提案されている。以下にこの２つの手法を簡単に説明する。

1）擬似逆行列を用いた逆運動学計算

対象物の目標位置、姿勢と現在位置、姿勢の変位$\Delta \mathbf{x}$は常に実現が可能、即ち対象物の可動内に存在することを前提とし、収束演算を行なう。対象物の目標位置、姿勢を$\mathbf{x}_d$、現在位置、姿勢を$\mathbf{x}$とすると、現在位置、姿勢を目標に近づけるための関節角変位は式(2-22)より

$$\Delta \theta = J_o^+(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) + (I - J_o^+ J_o)\mathbf{y} \tag{2-26}$$

として得ることができる。ここで$\mathbf{y}$は任意ベクトルであり、これを用いることにより局所的な最適解を得ることができる。極大化したい評価関数を$PI(\theta)$とすると

$$\mathbf{y} = k\frac{\partial PI}{\partial \theta} \tag{2-27}$$

但しkは正定数、として$\mathbf{y}$を決定することにより最適な微小移動量が決定される。これにより得られる$\Delta\theta$を用いてθを更新し、運動学計算により新たな対象物位置、姿勢を求め、目標値との誤差が許容範囲内に入るまで計算を繰返すことにより、逆運動学解が得られる。しかし、評価関数に対する最適解を得るには、手先位置が目標位置、姿勢を達成した後も、マニピュレータの姿勢が収束するまで演算を繰返す必要がある。

2）非線形連立方程式による解法

[Chang 1986]では、どんな冗長自由度ロボットにも適用できる逆運動学の最適解の算出法を提案している。まず、手先の達成すべき位置、姿勢ベクトルを x とし

$$F(\theta) = \mathbf{f}(\theta) - \mathbf{x} = 0 \qquad (2\text{-}28)$$

とおき、更に最小化したい評価関数を $H(\theta)$（但し、これは姿勢のみの関数として表せるものとする）とおく。また、ラグランジェ関数を

$$L(\theta) = \boldsymbol{\lambda}^T F(\theta) + H(\theta) \qquad (2\text{-}29)$$

とする。L が最小化される点では

$$\partial L/\partial \theta = \boldsymbol{\lambda}^T \partial F/\partial \theta + \partial H/\partial \theta = 0 \qquad (2\text{-}30)$$

が成立つ。ここで右辺第一項の $\partial F/\partial \theta$ はヤコビ行列 J を表している。J は $J \in R^{n \times m}$で、n はマニピュレータの関節数、m は位置、姿勢の目標ベクトルの次元である。$\mathbf{h} = [\partial H/\partial \theta_1 \cdots \partial H/\partial \theta_n]^T$とおくと式(2-30)は、

$$J^T \boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{h} \qquad (2\text{-}31)$$

となる。ここで、$\boldsymbol{\lambda} \in R^m$、$m < n$ であるから、J^Tから、m 個の一次独立な行を取り出し、これにより新たに正方行列 J_mを作ると、

$$\boldsymbol{\lambda} = -J_m^{-1} \mathbf{h}_m \qquad (2\text{-}32)$$

として、$\boldsymbol{\lambda}$を求めることができる。但し $\mathbf{h}_m$は、J_mを取り出した行に対応する $\mathbf{h}$ の m 個の要素からなるベクトルである。ここで J の残りの n-m 個の行からなるベクトルを J_{n-m}とし、式(2-31)に代入し、整理すると

$$J_{n-m} J_m^{-1} \mathbf{h}_m - \mathbf{h}_{n-m} = 0 \qquad (2\text{-}33)$$

が得られる。$\mathbf{h}_{n-m}$は、J_{n-m}に対応したベクトルである。

式(2-28)からは m 個の式が、式(2-33)からは n − m 個の式が得られるため、n 個の関節角を全て決定することができる。本手法は、マニピュレータの機構、自由度の数によらずに適用できるため、手法としては一般性を持つ。

2．5 まとめ

本節では、弾性部を含む2つの機構が1つの対象物を先端で把持した場合における機構の運動学、逆運動学手法を示した。

2．2では剛性行列により表現される機構を弾性体空間と剛体空間に分離することが必要であることを述べ、剛性行列の対角化手法を利用して分離を行なった。更に弾性体空間には、たわみに対応して、その次元の数の等価関節を導入することを提案した。

2．3の運動学においては、機構が閉ループ系を構成することから、まず機構の有する自由度について考察し、機構を代表する関節の選び方を示した。弾性部を内部に含む閉ループ機構に等価関節モデルを利用することで、幾何的拘束条件を単純に表現することが可能となった。これに力の釣合条件を加えることにより、機構の自由度、関節の選び方を示した。また、対象物座標系の可動空間が6次元となるための条件についての考察を行った。

それぞれのマニピュレータ先端の弾性体空間が交わりの空間を有すると、目標となる対象物座標系に対して機構が冗長自由度となる。これに対する手法として、いくつかの関節を予め固定しておく方法、ヤコビ行列を用いた収束演算手法[Klein 1983]、非線形連立方程式による解法[Chang 1986]を示した。冗長自由度を積極的に利用する必要がない場合には、予め冗長自由度とならないよう、いくつかの関節値を固定しておく方法が簡単であるが、最適化を図る場合には評価関数を用いた収束演算、あるいは非線形連立方程式解法が必要となる。

3章以降の制御系設計においてはマニピュレータ先端で目標力を発生するようマニピュレータの目標位置、姿勢を決定している。これは逆運動学計算において弾性部のたわみを指定する手法となっている。

第 3 章

動力学を考慮した協調制御系の設計

第３章　動力学を考慮した協調制御系の設計

３．１　はじめに

３．２　協調制御手法の考察
　３．２．１　閉ループ機構とオープンループ機構
　３．２．２　協調制御手法の考察

３．３　対象物の目標軌道
　３．３．１　対象物の位置、姿勢の表現
　３．３．２　マニピュレータの目標軌道の算出
　３．３．３　対象物の運動に必要な力

３．４　各マニピュレータへの力の配分
　３．４．１　力の配分法
　３．４．２　異なる特性を有する機構間の力配分法の考察

３．５　剛体マニピュレータにおける協調制御系

３．６　剛性行列を考慮したマニピュレータの協調制御系の設計
　３．６．１　マニピュレータ目標軌道の算出
　３．６．２　協調制御の設計

３．７　剛性行列を考慮したマニピュレータの協調制御シミュレーション
　３．７．１　マニピュレータの動力学
　３．７．２　搬送軌道の設計
　３．７．３　シミュレーション

３．８　まとめ

3．1 はじめに

本章では、剛性行列でモデル化されたマニピュレータの動力学を考慮した搬送制御のための協調制御系の設計を行ない、その正当性をシミュレーションにより検証する。なお、剛性行列の考慮されたマニピュレータを弾性マニピュレータと呼ぶ。

本章では、剛性行列を弾性空間と剛体空間に分離することはしない。運動学においては、機構がある一定量動けるか否かが問題となったため、その剛性の大きさが重要となった。しかし制御においては、目標力の発生ができるかどうかが問題であり、これには剛性の大きさは影響しない。従って、本章では、マニピュレータ先端に6次元のバネが付加されたモデルを対象に制御系の設計を行なうこととする。

まず3．2において、剛体マニピュレータにおける幾つかの制御手法を紹介し、それぞれの特徴を述べ、剛性行列を考慮した制御手法にどの制御形態を利用するかを決定する。3．3～3．5において、これまで行なわれてきた剛体マニピュレータの設計手順を示す。

3．3では対象物に対する目標軌道をどのように指定するか、また目標軌道を実現するために必要となる力の算出を行なう。

3．4では、3．3の結果得られる力を各マニピュレータに配分するための手法に関して、これまでの研究を紹介する。これまでの手法はある評価関数の基に力の最適な配分を行なうものであったが、本節では更に6次元空間の各方向毎に力の配分を行なうという手法を提案する。この手法はそれぞれの方向に対するそれぞれのマニピュレータの役割が明確な場合に非常に便利である。

なお3．3、3．4の内容は、剛性行列を考慮した弾性マニピュレータの協調制御においてもそのまま適用される。

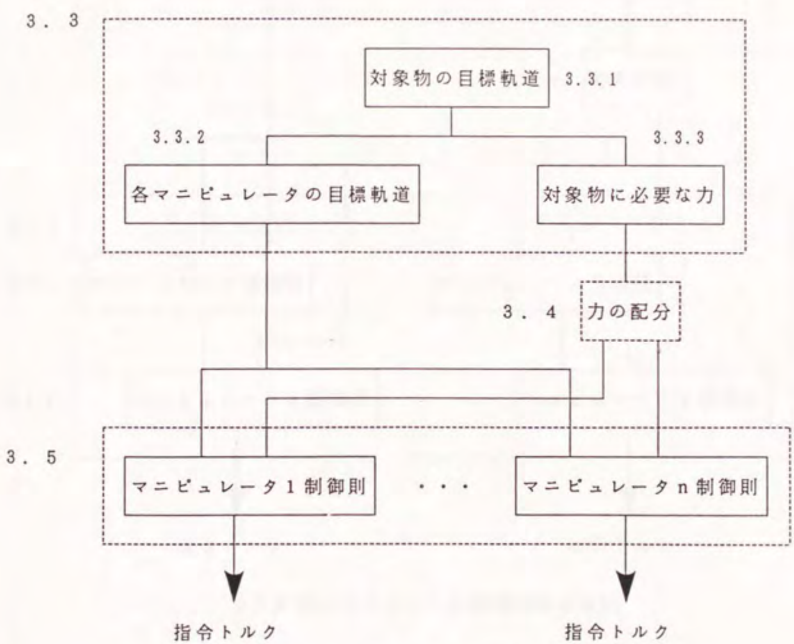
3．5では、剛体マニピュレータ同士の協調制御系の設計を行ない、フィードバックゲインと誤差の収束の関係を求める。動力学を考慮した協調制御系を提案した研究例は非常に多いが、系の安定性を示したものは[Arimoto 1987]が観られる程度であり、フィードバックゲインと誤差収束の様子との関係を示した研究はみあたらない。3．5節では、制御則中のフィードバックゲインと誤差システムの関係を明らかにし、フィードバックゲインをリアルタイムで変更することにより、誤差システムの線形化、極配置を行なう。

3．6では3．5の結果を弾性マニピュレータ同士の協調制御に拡張する。制御系の基本的な構成は3．5と非常に類似しているが、マニピュレータの目標位置、姿勢の算出法が異なる。剛体マニピュレータにおいては関節で発生したトルクがそのままマニピュレータ先端の力として伝達されるが、弾性マニピュレータでは弾性部のたわみを介してしか伝達されないからである。このため、先端で発生することのできる力にも新たな拘束条件が付加される。

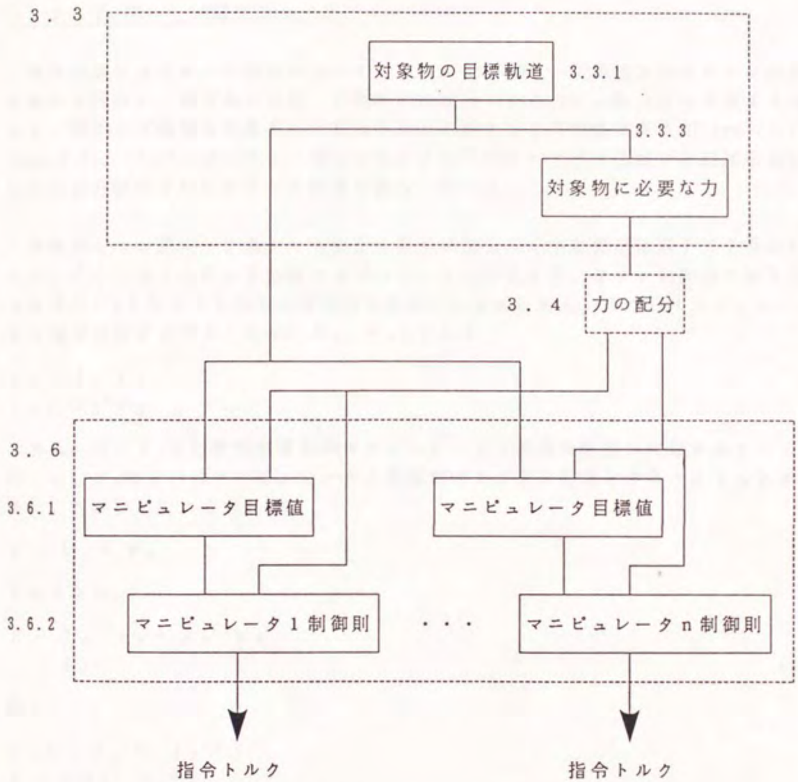
3．7では3．6に示した協調制御則を用いて、2台の3自由度水平多関節型マニピュレータを用いた協調制御シミュレーションを行ない、制御則の妥当性を検証する。

２章の運動学では２本のマニピュレータを想定したが、本章で設計される制御系は一般のｎ本の６自由度マニピュレータにおいても適用できる。なお、マニピュレータは特異点を通らず、ヤコビ行列の逆行列が常に存在するものとする。

なお、本章の構成と協調制御系設計手順との関係はFig.3.1(a),(b)の通りである。剛体マニピュレータと弾性マニピュレータの場合でマニピュレータ目標軌道の算出が若干異なっている。



（ａ）剛体マニピュレータの協調制御系設計



（b）弾性マニピュレータ協調制御系設計

Fig.3.1 協調制御系設計手順

3．2 協調制御手法の考察

3．2．1 閉ループ機構とオープンループ機構

協調制御系は閉ループ機構を構成する。2章では閉ループ機構を対象とした運動学の解析を行ない、機構の自由度、可動空間の算出法を述べた。動力学を考慮する場合にも、閉ループ機構を対象とした制御系設計を行うことが可能である([Tarn 1987])(Fig.3.2)。[Tarn 1987]では一般化座標系として閉ループ系を代表する関節を選び、Lagrange方程式を用いてトルク計算を行なっている。

機構を1つの閉ループ系として捉えた場合の指令トルクの算出は以下のように行われる。ここでは2つの6自由度マニピュレータを想定する。まず、対象物に加えるべき目標力$\mathbf{F}_d$を発生するための各関節の目標トルクを求める。2つのマニピュレータが先端で発生する力をそれぞれ$\mathbf{F}_1$、$\mathbf{F}_2$とすると

$$\tau_1 = J_1^T \mathbf{F}_1$$
$$\tau_2 = J_2^T \mathbf{F}_2$$

である。但しJ_iは対象物座標系のマニピュレータi関節角座標系に対するヤコビ行列、τ_1、τ_2は2つのマニピュレータの各関節のトルクを要素とするベクトルとする。また、対象物に加わる力$\mathbf{F}$は

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

であるから、

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= J_1^{-T}\tau_1 + J_2^{-T}\tau_2 \\ &= J_f \tau \end{aligned} \tag{3-1}$$

但し

$$J_f = [\ J_1^{-T} \quad J_2^{-T}\ ]$$
$$\tau = [\ \tau_1^T \ \ \tau_2^T\ ]^T$$

となる。$J_f \in R^{6\times12}$となるので、対象物への目標力$\mathbf{F}_d$が与えられた時、式(3-1)から得られるトルクτは

$$\tau = J_f^+ \mathbf{F}_d + (I - J_f^+ J_f)\mathbf{y} \tag{3-2}$$

となる。但しJ_f^+はJ_fの擬似逆行列で、$\mathbf{y}$は任意ベクトルである。冗長自由度系においては、ある評価関数が最適となるよう$\mathbf{y}$を決定し、τを算出するのが一般的である。以上が閉ループ系として機構を捉えた場合のトルク算出手順である。

しかし、協調制御系においては、この冗長自由度項を利用して対象物に加える内力を陽に指定したい場合が非常に多い。更に多指ハンドによる対象物の操り、あるいは多足の歩行ロボット等においては、対象物の合力のみではなく$\mathbf{F}_1$、$\mathbf{F}_2$にも拘束条件

が付加される。これに対して式(3-2)のyと内力の関係は、式(3-2)からは明らかではない。つまり、式(3-1)を基にした設計では、協調制御において非常に重要な役割を担う内力の指定が陽に行ない難いという欠点がある。

協調系の運動学においては、機構を代表する関節が存在し、2つのマニピュレータの全ての関節角値はこれらの関節によって表現することができた。この特性は、機構を閉ループ系とみなすことにより明らかとなり、2つのマニピュレータに分断して独立に考えるという意味はない。これに対して制御系設計では、対象物の目標軌道を達成すると同時に対象物に加わる内力も制御する必要がある。式(3-2)を基にした閉ループ機構を対象とした設計は、対象物の運動の実現のみを目的とした場合には利用可能であるが、目標内力を達成するためのトルク計算には不向きである。従って内力の制御が必要な協調制御系の設計においては、2つのマニピュレータが独立に対象物に力を加える、といった捉え方が適当である(Fig.3.3)。

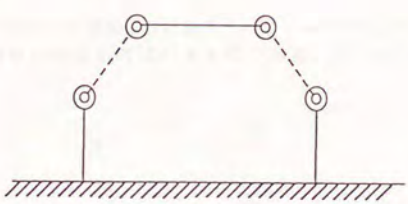


Fig.3.2 閉ループ機構としての捉え方

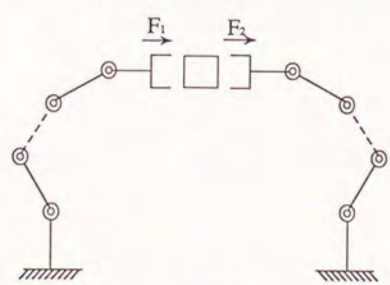


Fig.3.3 2つのオープンループ機構としての制御対象

本章では、機構をこのように2つの独立したマニピュレータから構成されるという捉え方に立ち、制御系の設計指針を示す。

3．2．2 協調制御手法の考察

本節では、トルク制御を前提とし、これまで剛体マニピュレータ同士に対して行なわれてきたいくつかの協調手法を取り上げ、それぞれの手法の比較を行なう。

剛体機構では、マニピュレータのアクチュエータに発生する力がそのまま先端に伝達される。従って2つのマニピュレータを共に高いサーボ剛性で位置制御すると、対象物に過大な内力が生じてしまう。過大な内力を発生せず対象物の位置決めが可能な協調制御形態として、これまで提案されたものを分類すると、次の3つの手法に大別できる。

(1) 両腕の制御系にサーボ剛性の低いＰＤ制御を利用し、両腕を位置制御する。
(2) 片方のマニピュレータを高いサーボ剛性で位置制御し、もう一方のマニピュレータを、内力が過大とならないよう力制御する。
(3) 両方のマニピュレータを、対象物に対する目標内力、位置決めが達成されるよう位置制御する。

(1)は仮想目標値法と呼ばれる手法、(2)はリーダ/フォロワと呼ばれるもの、(3)は近年最も一般的な両者同等の制御と呼ばれるものである。以下のこの3つの手法を説明する。

(1) 仮想目標値法

(1)の両腕のサーボ剛性を下げ、両腕を位置制御するという手法は、[黒野 1975]に利用された手法であり、協調制御のはしりであった。この論文では、例として片手では把持することのできない大きさを持つ円柱を、2腕で搬送する作業が説明されている。両方の腕の目標値を円柱の中央に設定することにより、それぞれのロボットアームには円柱の半径に相当する位置偏差が常に生じるため、両腕がそれぞれの円柱を押す(Fig.3.4)。これにより、両腕による把握が達成される。この目標値を移動させることにより、円柱を把握したままの搬送作業が達成される。この手法の利点としては、両腕ともに位置制御が利用可能なので、実現が比較的容易であることが上げられる。また、欠点としては、外乱によって対象物が落下する恐れがある、対象物、マニピュレータの動特性を考慮していないため、運動中に目標軌道から遅れを生じる、対象物の外力に対する剛性を高めることができない点などが上げられる。本手法は協調制御研究の非常に初期のものであるが、コンピュータの発達で演算時間に対する制約がなくなりつつある今日では、これを利用した研究はない。

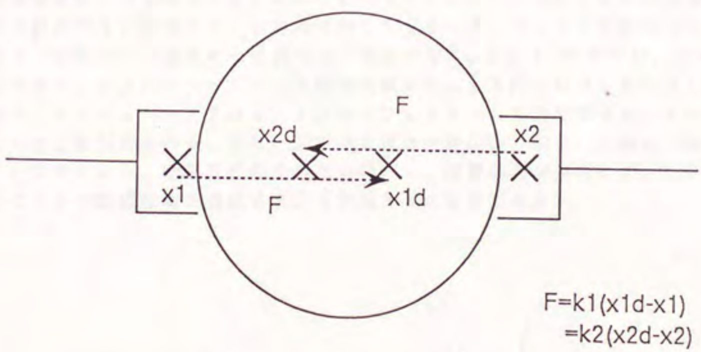


Fig.3.4 仮想目標値法による協調制御

(2) リーダ/フォロワ

この手法は[Nakano 1974], [Ishida 1977]などに採用された手法である。対象物を把持した2つのマニピュレータの片方をリーダ、もう一方のマニピュレータをフォロワとする。まず、対象物の目標位置、姿勢を達成するためリーダのマニピュレータを位置制御する。リーダの動作によりフォロワとリーダの間に位置偏差が生じ、内力が変動する。この内力が目標値となるよう、フォロワの位置を補正することにより、対象物の搬送と目標内力が実現される。ここで説明した手法は、それぞれのマニピュレータに対してリーダ/フォロワのどちらか一方の役割が割当てられているが、この役割をより一般化した手法として、ハイブリッド制御を利用した[Mason 1982]の研究がある。この手法は、それぞれのマニピュレータに対して、上述のリーダ/フォロワの役割を作業座標系の各軸方向毎に割当てるというものである。リーダには位置制御が、フォロワには力制御が割当てられる。

例としてFig.3.5を考える。2つのマニピュレータが対象物をrigidに把持し、搬送を行うとする。また、簡単のため対象物を質点とし並進の3自由度のみの自由度を考える。まずx方向について、どちらかのマニピュレータをリーダ、もう一方をフォロワと決定する。例えばマニピュレータ1をリーダとすれば、マニピュレータ1のx方向に位置制御モードを割当てる。これに応じてマニピュレータ2のx方向には力制御モードを割当てる。同様にy、z方向に対してもリーダ、フォロワを割当てていくことにより、対象物の位置決めと目標内力が実現できる。Fig.3.5の例では、マニピュレータ1はx, z方向にリーダとして位置制御され、y方向にはフォロワとして力制御される。マニピュレータ2はx, z方向にフォロワとして力制御され、y方向にリーダとして位置制御される。但し、図中の実線は位置制御方向を、点線は力制御方向を表す。これにより、直交基底の全方向に対して、位置制御が競合せず、しかも必ず機構のどれかが目標位置を達成する系を実現することができる。

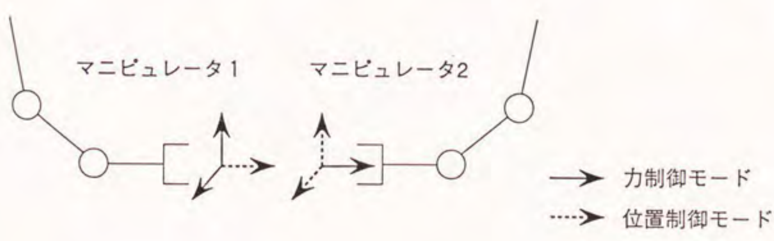


Fig.3.5 ハイブリッド制御を応用した協調制御

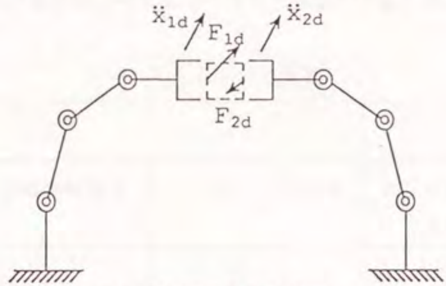
この手法において、片方のマニピュレータが全ての方向に位置制御され、残りのマニピュレータが全ての方向に対して力制御されるのがリーダ/フォロワ型と呼ばれる制御形態であり、ここで示した手法は、リーダ/フォロワの概念を方向毎に割付けたものである。

対象物の外力に対する剛性は位置制御されるマニピュレータのサーボ剛性により決定される。もし、この位置制御にＰＤ制御を利用し、しかも０以外の内力を指定する場合には、対象物が目標位置、姿勢からずれた場所で位置決めされてしまうことが指摘されている[Kim 1990]。このため、正確な位置決めを行なおうとすると、位置制御側コントローラの位置制御にPID制御を利用するか、ＰＤ制御の指令に内力を打消すための指令を加える必要がある。本手法は対象物を高剛性で保持することができ、しかも内力の目標値が陽に記述できる。しかし、動力学の考慮はなされておらず、対象物を運動させた場合、内力の変動が大きくなる可能性がある。[Ishida 1977]では、この手法において位置制御されるマニピュレータに動力学補償を加えた制御系をリーダ/フォロワ型の協調制御形態と定義している。なお、フォロワにも目標値を与え動力学補償を行うという手法は３．２．３に示す制御形態の力配分を極端に設定したものと等価となる。

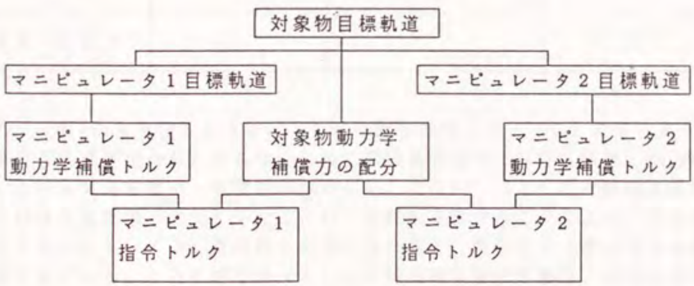
(3) 両者同等の制御

本手法が近年の研究では最も一般的なもので、それぞれのマニピュレータが対象物の目標位置を達成しながら、目標内力を発生すべく制御される形態である。

まず、対象物の加速度軌道実現に必要な力を、それぞれのマニピュレータに配分する。それぞれのマニピュレータは、対象物の目標軌道から計算される自分自身の目標軌道を達成するためのトルクと、配分された力を発生するためのトルクの和により制御される(Fig.3.6)。



（a）両腕同等の制御手法



（b）制御系の構成

Fig.3.6 両腕同等の協調制御

この手法では対象物の動力学が補償され、しかも目標内力と、外力に対する対象物の剛性を独立に設定することが可能となる。このため、多指ハンドなどにおいては、固く把握して柔らかく挿入する、あるいは柔らかく保持して外力に対しては高剛性を実現することができる。近年の協調制御研究はこの形態の制御系を利用したものが主流である[内山 1983],[古田 1987],[Zheng 1988]。本手法の詳しい制御系設計手順は３．４～３．５に示されている。

(1)～(3)の手法の特徴をTable.3.1に示す。動作中の精度では、外乱のない時、対象物の搬送時における目標軌道からのずれが理論的に生じないものを○、加速、減速時にずれが生じるがフィードバックのかかるものを△、フィードバックがいっさいかからないものを×としている。目標内力の実現に関しても、理論的にずれが生じないものを○、ずれが生じるとフィードバックのかかるものを△、ずれが補正されないものを×とした。実現のし易さに関しては、○は現状の演算能力で十分実現が可能なものを、×は実現の難しいものを、△は実現可能ではあるが動作速度を極端に遅くする必要がある、あるいは作業座標系の次元を下げれば実現が可能と思われるものを表している。

Table.3.1 各手法の比較

	(1)	(2)	(3)
制御系	PD位置制御系	ハイブリッド制御系	PD位置制御系 ＋目標力
動作中の精度	×	△	○
内力の変動	×	△	○
実現のし易さ	○	△	×

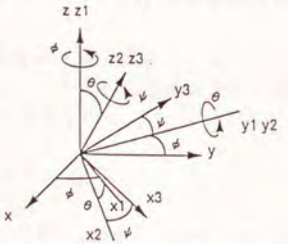
Table 3.1からも分るように、（1）の仮想目標値法、（2）のリーダ/フォロワでは動力学補償が完全に行われないため、搬送軌道実現における誤差、内力の変動が大きいという欠点を持つ。実現性の点からは、（1）、（2）共に動作速度を遅くする、あるいは作業座標の次元を下げるといった制約を設けることにより、ある程度可能となると思われる。しかし理論的な制御特性は低く、将来的には動力学を考慮した制御手法が望まれる。これに対して（3）の両腕同等な制御形態は、両腕の動力学補償が同時に行われ、しかも内力の制御にも両腕が用いられるので、制御特性は非常に高く、対象物が加速度運動を行う場合の誤差、内力の変動は理論的には生じない。現状の技術では、ロボットの動力学補償によるトルク制御自体難しく、（3）の協調手法の実現は非常に困難であると思われるが、理論的な制御手法の確立は是非とも必要である。従って、本研究における剛性行列を考慮した制御系設計では、（3）の両腕同等の制御法を拡張する。

3．3 対象物の目標軌道

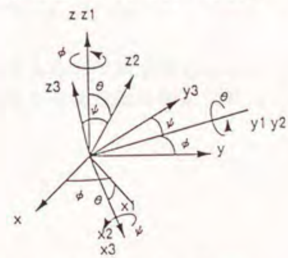
本節では、動力学を考慮した制御系の設計を行なうための準備として、対象物、各マニピュレータハンド座標系の位置、姿勢の表現、対象物の目標加速度軌道とそれに必要な力ベクトルを簡単に説明する。

3．3．1 対象物の位置、姿勢の表現

3次元空間における剛体の位置、姿勢の指定として最も一般的に用いられている手法は、基準座標系から対象物重心に固定された対象物座標系への同次変換行列を指定する方法である。同次変換行列は4x4であるが、その中で独立なパラメータは位置、姿勢の6成分である。位置の3成分については基準座標系における(x，y，z)座標を与えればよいが、姿勢のパラメータの指定については様々な方法が提案されている。姿勢の3成分を表すパラメータとして、オイラー角(Fig.3.7(a))、ロール・ピッチ・ヨー(Fig.3.7(b))がある。これらのパラメータは、基準座標系における姿勢を一意に指定することができるが、実現される軌道がどのようなものかを予め予測しづらいという欠点がある。これに対して[Paul 1979]では、2軸回転法と呼ばれる手法を提案している。これは、対象物の初期姿勢と最終の目標姿勢の間の姿勢の変化を、それぞれのz軸の共通法線に垂直な面内でz軸のなす角、z軸回りの回転の2つの角と、z軸の共通法線ベクトルにより表現するものである。この表現はオイラー角のパラメータと単純な関係にある(Fig.3.8)。2軸回転法は対象物の搬送中の姿勢が予測し易いという特徴を持つが、異なる2軸に同時に角加速度が生じるとお互いが干渉しあうという指摘がある([Taylor 1979])。[Taylor 1979]では、等価回転軸を用いた軌道生成法を提案している(Fig.3.9)。これは、2つの座標系間の相対変位を、原点間の並進成分と、1軸回りの回転のみで姿勢を一致させるための回転軸と回転角によって表現するというものである。これらのいずれの手法により姿勢を表した場合にも、モーメントの算出には各時刻における慣性主軸回りの角速度、あるいは対象物座標系原点を持ち基準座標系と同じ姿勢を有する絶対重心座標系座標軸回りの角速度が必要となる。



（a） オイラー角



（b） ロール・ピッチ・ヨー

Fig.3.7 姿勢表現のパラメータ

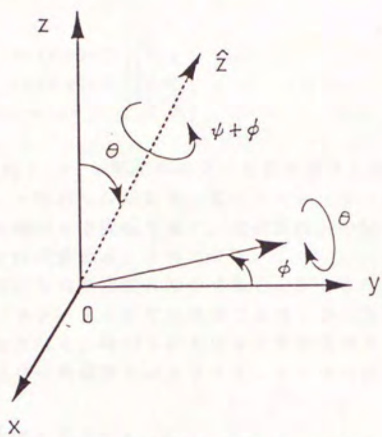


Fig.3.8 2軸回転法([Paul 1979])

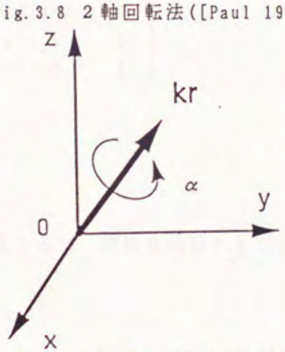


Fig.3.9 等価回転軸と等価回転角([Talor 1979])

例えばロール・ピッチ・ヨー、オイラー角で軌道が与えられている場合には、それぞれのパラメータの速度成分と、絶対重心座標系各軸回りの角速度の関係は式(3-3),(3-4)となる。

1) オイラー角

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos\phi & \sin\phi\sin\theta \\ 0 & \sin\phi & -\sin\phi\cos\theta \\ 1 & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\theta \\ \delta\phi \end{bmatrix} \tag{3-3}$$

2) ロール・ピッチ・ヨー

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 1 & 0 & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\theta \\ \delta\phi \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}4)$$

$\delta x, \delta y, \delta z$はそれぞれx，y，z軸回りの微小回転を表す。オイラー角のϕ、θ、ϕはそれぞれz軸、x軸、z軸回りの回転を、またロール・ピッチ・ヨーのϕ、θ、ϕはそれぞれz軸、y軸、x軸回りの回転を表す。加速度成分の関係は式(3-3)、(3-4)の両辺を更に時間で微分すれば求めることができる。

絶対重心座標系各軸回りの角速度は積分することができないパラメータであり、姿勢を表現するためのパラメータとしては利用できないが、同次変換行列と併用することにより、利用が可能となる。時刻tにおける対象物座標系への同次変換行列をT(t)とし、この時の各軸回りの角速度を$\boldsymbol{\omega}$とすると、Δt後の座標系への微小回転行列は

$$\Delta T = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta t\,\omega_z & \Delta t\,\omega_y & 0 \\ \Delta t\,\omega_z & 1 & -\Delta t\,\omega_x & 0 \\ -\Delta t\,\omega_y & \Delta t\,\omega_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となる。従って

$$T(t+\Delta t) = T(t) * \Delta T \qquad (3\text{-}5)$$

と同次変換行列を更新することで、姿勢を積分することができる。

3．3．2 マニピュレータ目標軌道の算出

対象物座標系に対して目標軌道が与えられた時、協調制御に用いられるそれぞれのマニピュレータハンド座標系の目標軌道の算出法を示す。各マニピュレータは対象物をrigidに把握しているので、マニピュレータの目標軌道は対象物の目標軌道から一意に決定することができる。以下に運動学を基にした目標軌道算出法を簡単に説明する。

まず、対象物の目標軌道をx_d, $\dot{x}_d$, $\ddot{x}_d$とする。また、基準座標系から対象物座標系への同次変換行列をT_o、対象物座標系から、対象物をrigidに把持したマニピュレータハンド座標系への同次変換行列を${}^oT_h$とすると(Fig.3.10)、基準座標系からハンド座標系への同次変換行列は

$$T_h = T_o {}^oT_h$$

となる。${}^oT_h$はrigidな把持であることから定数行列となるので、T_o、即ち対象物の位置、姿勢を表す同次変換行列からハンド座標系の位置、姿勢x_{hd}が算出できる。また、ハンド座標系の対象物座標系に対するヤコビ行列をJ_hとすると、J_hは定数行列であるから

$$\dot{x}_{hd} = J_h \dot{x}_d \tag{3-6}$$
$$\ddot{x}_{hd} = J_h \ddot{x}_d \tag{3-7}$$

としてハンド座標系の目標速度、加速度が算出できる。

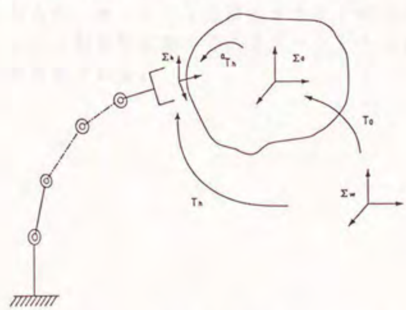


Fig.3.10 マニピュレータハンド座標系と対象物座標系

剛性行列を考慮した協調制御においてはこの値に更にバネのたわみを考慮する必要がある。これについては3．6に示す。

3．3．3 対象物の運動に必要な力

対象物の運動に必要な力は、Newton-Eulerの運動方程式(3-8)として算出できる。

$$F_d = M\ddot{x}_d + \Phi \tag{3-8}$$

$$\ddot{x}_d = [\ \ddot{x}_d\ \ddot{y}_d\ \ddot{z}_d\ \dot{\omega}_{xd}\ \dot{\omega}_{yd}\ \dot{\omega}_{zd}\ ]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} M' & 0 \\ 0 & I' \end{bmatrix}$$

$$M' = \mathrm{diag}(m\ m\ m)$$

$$I' = R I R^T$$

$$I = \mathrm{diag}(I_x\ I_y\ I_z)$$

$$\Phi = [\ m g^T\ \{-\omega_d \times (I\omega_d)\}^T\ ]^T$$

$$\omega_d = [\ \omega_{xd}\ \omega_{yd}\ \omega_{zd}\ ]^T$$

但し、基準座標系をz軸負方向が重力方向と一致するよう設定し、対象物座標系原点を対象物重心にとり、慣性主軸と座標軸を一致させる。$\ddot{x}_d$は基準座標系から見た対象物の目標加速度、角加速度ベクトルで、初めの3成分は対象物座標系のx，y，z方向の並進成分を、後の3成分は基準座標系各軸回りの微小回転成分を表す(Fig.3.11)。F_dの各成分は、x_dに対応した力、モーメントを表す。Rは基準座標系から見た対象物座標系への3x3姿勢変換行列である。Iの各成分は対象物慣性主軸回りの慣性モーメント、I'は対象物の重心に原点を持ち、基準座標系と同じ姿勢を有する座標系の各軸回りの慣性行列である。また、mは対象物の質量で、gは重力加速度を表す。

式(3-8)を用いることにより、基準座標系で設計された位置、姿勢の目標軌道を実現するために必要となる力、モーメントを算出することができる。対象物を把持した全てのマニピュレータから対象物に加えられる力ベクトルをF_dとすることで、対象物の目標加速度軌道が実現される。

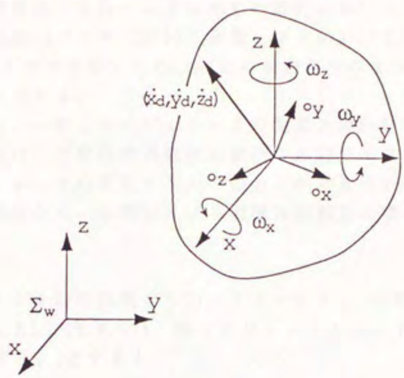


Fig.3.11 対象物座標系と各パラメータ

以上３．３．１で対象物の位置、姿勢の表現、３．３．２で対象物の目標軌道からのマニピュレータ目標軌道の算出法、３．３．３で対象物の運動に必要な力ベクトルの算出を行った。協調制御に用いられる全てのマニピュレータが先端で発生する力ベクトルの和が３．３．３で求めた目標力ベクトルと等しければ、対象物の目標軌道が実現される。３．４では、３．３．３で求まった目標力のうち、各マニピュレータがどれだけの力を分担すれば良いかといった問題について説明する。

3．4 各マニピュレータへの力の配分

3．4．1 力の配分法

対象物に加えるべき力を各マニピュレータに配分する手法を述べる。対象物の運動に対する力の配分問題は、多指ハンドの操りの研究において多く扱われている[Salisbery 1981],[中村 1986],[中村 1990]。多指ハンドにおける指はその先端で対象物をrigidに把持することができないため、内力の制御がマニピュレータの場合と比べ、より重要となるためである。

協調制御研究では、一般にマニピュレータの制御系設計問題と力の配分問題が別々に論じられる。これは、対象物の運動が対象物の合力のみによって決定されるので、それぞれのマニピュレータの発生する力の和のみが対象物の運動方程式に関係するからである。以上の理由から、本節における議論は制御系の構成とは全く独立に行なわれる。

各マニピュレータが先端で発生する力ベクトルをF_i、対象物重心座標系に発生する力とモーメントをF_o(Fig.3.12)、各マニピュレータハンド座標系の対象物座標系に対するヤコビ行列をJ_iとすると、

$$
\begin{aligned}
F_o &= J_1^T F_1 + J_2^T F_2 + \cdots + J_m^T F_m \\
&= [\ J_1^T\ J_2^T \cdots J_m^T\ ] \begin{bmatrix} F_1 \\ \cdot\cdot \\ F_m \end{bmatrix} \\
&= J_t F \qquad (3\text{-}9)
\end{aligned}
$$

但し

$$
\begin{aligned}
J_t &= [\ J_1^T\ J_2^T \cdots J_m^T\ ] \quad \in R^{6\times 6m} \\
F &= [\ F_1^T\ F_2^T \cdots F_m^T\ ]^T \quad \in R^{6m\times 1}
\end{aligned}
$$

となる。これより

$$
F = J_t^+ F_o + (I - J_t^+ J_t) z \qquad (3\text{-}10)
$$

が解として算出される。この冗長自由度を利用して最適な配分を決定する。

[Salisbery 1981]では、式(3-10)右辺の冗長項を利用して、全ての指先で発生する力が対象物の内側を向くようにできるための条件を示している。

[中村 1986]では式(3-10)の拘束条件、更に指先で発生する力が対象物内部を向く条件、指先がすべりを生じないための拘束条件の基に、各指先で発生する力の2乗和が最小となるよう、非線形計画法を用いて、最小把握力の算出を行なっている。また、[中村 1990]では、摩擦コーンを多面体で近似し、指先で発生する力の絶対値の線形和を最小とする握力を、線形計画法を用いて算出するための手順が解説されている。

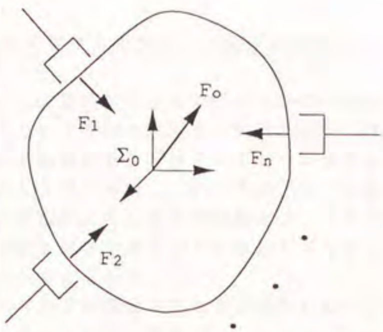


Fig.3.12 複数のマニピュレータの発生力と対象物重心における力

が解として算出される。この冗長自由度を利用して最適な配分を決定する。[Salisbery 1981]では、式(3-10)右辺の冗長項を利用して、全ての指先で発生する力が対象物の内側を向くようにできるための条件を示している。

[Orin 1981]では閉ループ系を含む機構をトルク制御する際のトルク配分法についての手法が述べられている。それぞれのアーム先端で発生する力をどのように配分するかを決定するための評価関数として、各アームでの消費エネルギと、アームから対象物、あるいは足から地面への垂直抗力に重みを掛け合せた関数が用いられている。この際拘束条件として、接触点でのすべりが起きないような摩擦を発生させるための垂直抗力の不等式が考慮され、それぞれのモータのトルク限界も考慮されている。

マニピュレータを対象とした力の配分に関しては[Zheng 1988]がある。[Zheng 1988]では力の分配法として、最小エネルギを評価基準とする手法、対象物に与える力を最小にする手法、それぞれのアームに半分ずつ配分する方法について計算が行われている。最小エネルギ解は、モータにトルク限界がない場合にはMoore-Penrose型の擬似逆行列を利用することで算出され、トルク限界が存在する場合には変数の置き換えを行い非線形計画法を利用することで算出される。これらの方法は演算時間が長くかかるためリアル・タイム制御には向いていない。次に対象物にかかる2つの力を$F_1=\alpha F$, $F_{\varepsilon}=(1-\alpha)F$とし、$\alpha$を変数として消費エネルギを最小とする解を算出する手法を示している。この手法に関してもαが0や1となってしまうと片方のアームが全力を受持たねばならない状態となる可能性がある。そこで最後に、両者のアームに1/2Fの力を受持たせる方法が提案され、結局本手法がリアル・タイム性、両者の力配分に無理がないといった理由から最も良いという結論を引出してる。

以上の手法はそれぞれ同等のマニピュレータ、あるいは指を想定した研究であるが、2台の機構が全く異なる寸法、可搬重量、応答性を有するような場合にはそれぞれの機構に適した力の配分が必要である。例えば、非常に発生トルクの大きな機構と非常に小さな機構の協調制御、あるいは応答性の非常に高い機構と低い機構の協調制御においては、その配分法が自ずと異なったものとなるはずである。次項では、特性の異なる2つの機構において、どのように力を配分すれば良いかについて考察を行う。

3．4．2 異なる特性を有する機構間の力配分法の考察

本項では、発生トルク、周波数応答等の極端に異なる複数の機構間の協調制御を行う場合の力の配分法について考察を加える。前項で説明した力の配分手法は、同等な複数のマニピュレータの協調制御を前提としており、消費エネルギ、発生トルクの2乗和などが評価関数として用いられ、これらを最小とする最適解が算出されている。しかし、特性の異なる機構間における協調制御では、それぞれの機構が別々の役割を有することが多く、機構の発生トルクのみに着目し最適解を求めるといった方法が必ずしも有効でない場合が考えられる。

まず、先端で発生できる力が極端に異なる機構間の協調制御を考える。例えば、6章に示すクレーンとロボットによる重量物ハンドリングでは、クレーンが重量物の重力補償を行い、ロボットが微小位置決めを行うといった役割分担が行われる。この役割を実現するためには、重力方向の目標力はクレーンが、また微小移動に必要な水平方向の力はロボットが受持つ、というように方向毎にそれぞれの機構に目標力を配分すればよい。発生可能な力の異なる機構間の力の配分では、それぞれの機構が発生できる力に従い、方向毎に力を配分していくといった方法が非常に簡便な手法であるといえる。

次に周波数応答の異なる機構間の協調を考える。対象物の目標力には、一般に対象物を駆動するための慣性力と、位置、速度誤差のフィードバック成分、さらに重力、非線形補償項の和が用いられる。

$$F_d = M\ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) + \Phi \qquad (3\text{-}11)$$

F_d：対象物に加えるべき目標力
x_d：対象物の目標位置
$\dot{x}$　：対象物の位置
M　：対象物の慣性行列
K_v：対象物の目標速度に対するフィードバックゲイン行列
K_p：対象物の目標位置に対するフィードバックゲイン行列
Φ　：対象物の重力、非線形項からなるベクトル

F_dを構成する各成分は、それぞれ異なった周波数を持つ。重力補償項はＤＣ成分のみからなり、慣性項の成分は目標加速度軌道の成分と同じとなる。また、誤差のフィードバック項は、軌道を実現しながら誤差を収束させるための項であるから、慣性項と比較して高い周波数成分を含むと考えられる。このような様々な周波数成分を含む項からなる力を、周波数応答の極端に異なる機構間に配分する場合には、F_dを構成する各項毎に配分を行うことで、それぞれの機構の特性を生かすことができると考えられる。

以上をまとめると、発生可能な力、周波数応答の極端に異なる機構間の協調制御における力の配分では、作業座標系の各方向、目標力を構成する各成分毎に配分を行う

ことで、非常に簡便に、しかも役割分担の概念を実現することができる。この考え方を用いて、1）非常に大きなロボットと小さなロボットが協調して重量物の組付け作業を行なう場合、2）リーダ/フォロワにおける力の配分例を示す。3.2.1に示したリーダ/フォロワでは、フォロワは目標軌道を与えられずに力制御されたが、内力の変動を抑えるため、リーダの目標動作をフォロワに利用した制御系も存在する[Ishida 1977]。このようにフォロワにも目標値を与えておくといった制御法は、両腕同等の制御において力配分を極端に設定したものと同じであることを示す。これにより、両腕同等の制御がより一般的な手法であることが確認できる。

例1：大型ロボットと小型ロボットの協調による重量物の組立

大型のロボットと小型のロボットが協調して重量物を搬送し、挿入作業を行う場合を考える(Fig.3.13)。大型ロボットは一般に可搬重量は大きいが、その位置決め精度は小型ロボットと比較して低い。小型ロボットは位置決め精度が高いが可搬重量は小さいという欠点を有する。しかし、この2台のロボットを協調させると両者の長所、即ち大きな可搬重量を持ち、位置決め精度の高いシステムを実現することができる。

小型ロボットは位置決め時の精度の達成を目的として用いられているので、挿入地点の近傍までの搬送過程において重量物に必要となる駆動力を受持つ意味はない。従って、力の配分は式(3-12)とすればよい。

$$
\begin{aligned}
F_{ld} &= M\ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d-\dot{x}) + K_p(x_d-x) + \Phi \\
F_{sd} &= 0
\end{aligned}
\qquad (3\text{-}12)
$$

$$\Phi = [\, m g^T - \omega_d \times (I\omega_d)^T \,]^T$$

x_d：重量物の目標位置、姿勢
x　：重量物の位置、姿勢
M　：重量物の慣性行列
I　：重量物慣性主軸回りの慣性モーメント
m　：重量物質量
K_p：重量物の位置誤差フィードバックゲイン行列
K_v：重量物の速度誤差フィードバックゲイン行列

添字lは大型ロボット、sは小型ロボットを表す。

次に、挿入地点までの微小位置決め過程を考える。この場合、重量物の重力と微小移動のための慣性力は搬送過程に引続き大型ロボットが受持ち、水平方向の位置ずれの補正のみ小型ロボットで行うことにより、重力方向以外の方向に対しては小型ロボットの持つ位置精度で位置決めができる。これを式で表現すると

$$
\begin{aligned}
F_{ld} &= M\ddot{x}_d + K_v P_g(\dot{x}_d-\dot{x}) + K_p P_g(x_d-x) + \Phi \\
F_{sd} &= K_v P_g^{\perp}(\dot{x}_d-\dot{x}) + K_p P_g^{\perp}(x_d-x)
\end{aligned}
\qquad (3\text{-}13)
$$

となる。P_gは重力方向を表す空間S(P_g)への直交射影行列、$P_g^{\perp}$は$P_g^{\perp}=I-P_g$で、S(P_g)の直交補空間への射影を表す。誤差にP_gが掛っている項は、重力方向成分のみフィードバックを掛けることを意味しており、$P_g^{\perp}$は重力方向以外の成分を取り出すために利用されている。

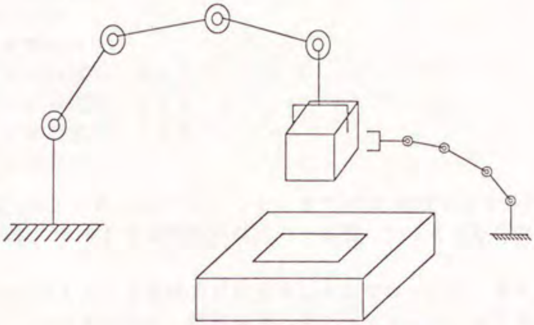


Fig.3.13 大型ロボットと小型ロボットの協調による重量物組立作業

例2:リーダ/フォロワ制御系

この手法は、異なる特性を有する機構間に限ったものではないが、本項で提案した配分法を利用することにより実現することができるのでここに示す。3.2.2に示したリーダ/フォロワでは、フォロワに目標値は与えられなかったが、ここでは内力の変動を抑えるためフォロワの制御にも目標軌道を用いる場合を想定する。

リーダ/フォロワ制御系では、リーダマニピュレータが対象物の位置決めを行ない、フォロワマニピュレータが内力を目標値に保つよう制御される。リーダマニピュレータの指令トルクには、動的フィードフォワード項、位置、速度偏差のフィードバック項、更に位置偏差の積分項が与えられる。積分項が存在しない場合には、対象物を保持するための力が付加えられる。フォロワマニピュレータは、動的フィードフォワード項と、対象物から受ける力が目標値となるよう制御される。この結果達成される制御系では、それぞれのマニピュレータの指令トルクは、自分自身を駆動するための動的フィードフォワード項と、以下に示す力を発生するためのトルクの和となっている。

$$F_{ld} = M\ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) + K_a\int(x_d - x)dt + 1/2M\mathbf{g} + \Phi$$
$$F_{fd} = 1/2M\mathbf{g} + F_{in}$$

または

$$F_{ld} = M\ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) + 1/2Mg + \Phi - F_{in}$$
$$F_{fd} = 1/2Mg + F_{in}$$

但し

x_d：対象物の目標位置
$\dot{x}$　：対象物の位置
M　：対象物の慣性行列
K_v：対象物の目標速度に対するフィードバックゲイン行列
K_p：対象物の目標位置に対するフィードバックゲイン行列
Φ　：対象物の非線形項からなるベクトル
g　：重力加速度ベクトル

となる。添字lはリーダ、fはフォロワを、またdは目標値を表す。つまり、リーダ/フォロワの進化したものが両腕同等の制御の一形態となることが示された。

同じ対象物に加えるべき目標力の配分を、それぞれの成分、即ち対象物の運動に必要なフィードフォワード力と、位置誤差に対するフィードバック力等毎に、また対象物座標系のそれぞれの方向毎に、機構の特性を考慮しながら割付けることが可能であり、２台の機構の特性が異なる場合には非常に有効な手段となる。

以上の例からも分るように、対象物に必要な力を、方向毎、成分毎に配分することで、それぞれの機構の特性、役割といったものを協調制御系に非常に簡単に反映させることができる。また、特性の異なる機構間の協調制御においても、両腕同等の制御が十分適用可能であることが示された。この配分法は、剛性の異なる機構、例えば固い機構と柔らかい機構が協調制御されるような場合にも適用可能である。例えば各機構の剛性を考慮することにより、それぞれの方向に対して固さに比例した力を配分することで、目標力を発生するための両機構の動作量を同じとすることができると考えられる。

本節では、目標加速度の与えられた対象物に加えるべき力を、協調制御に用いられるそれぞれのマニピュレータに配分する手法を示した。３．４．１ではこれまで研究されてきた配分法を示したが、これらの手法のほとんどは同等な２腕を想定したものであった。そこで３．４．２では機構特性、制御特性の全く異なる機構間にも適用が可能で、しかも非常に簡便な力配分法を示した。今後本章においては力配分の問題は扱わない。しかしどのような配分がなされたとしても、本研究の理論がそのまま適用可能である。

3．5 剛体マニピュレータの協調制御系の設計

剛体マニピュレータの協調制御においては、各マニピュレータに必要なトルクが、①3．3．2で求めたマニピュレータハンド座標系の目標軌道を実現するためのマニピュレータの動力学補償トルク、②対象物の目標軌道実現に必要な力のうち、3．4のいずれかの手法で配分された力をハンド座標系で発生するためのトルク、の2つのトルクの和として計算される。②の目標軌道実現に必要な力には、式(3-11)に示したように3．3．3で求めた力の他に、対象物の目標位置、速度誤差を0に収束させるためのフィードバック力を予め加えておく。このように対象物に加えるべき力にフィードバック力を足し込む手法は[内山 1983]，[中村 1986]など多くの研究で一般に用いられている。本節以降の手法は一般のn本のマニピュレータでも成立つので、n本のマニピュレータによる協調制御を想定する。マニピュレータiの制御則を式(3-14)，(3-15)とする。

制御則

$$\tau_{id} = H_i(\theta_i)\left(J_i(\theta_i)^{-1}\ddot{x}_{id} - \dot{J}_i(\theta_i)^{-1}\dot{x}_i \right) + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + g_i(\theta_i) + J_i(\theta_i)^T F_{id} \tag{3-14}$$

$$\sum_i F_{id} = F_{md} = M\ddot{x}_{md} + \Phi + K_{vm}(\dot{x}_{md} - \dot{x}_m) + K_{pm}(x_{md} - x_m) \tag{3-15}$$

とする。ここで

$x_{id} = x_{md}$

θ_i：マニピュレータiの関節角ベクトル
$H_i(\theta_i)$：マニピュレータiの慣性行列
$J_i(\theta_i)$：マニピュレータiのヤコビ行列
$C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)$：コリオリ力、遠心力
$g_i(\theta_i)$：マニピュレータiの重力補償トルク
F_{id}：対象物座標系原点でマニピュレータiが発生すべき目標力
M：対象物の慣性行列
K_{vm}：対象物座標系の速度誤差フィードバックゲイン行列
K_{pm}：対象物座標系の位置誤差フィードバックゲイン行列

である。$J_i(\theta_i)$は対象物座標系のマニピュレータi関節角座標系に対するヤコビ行列とし、マニピュレータの目標軌道は対象物座標により定式化されているものとする。以降の式では、J_i、H_iの(θ_i)は省略し、単にJ_i、H_iとする。

この制御則における指令トルクは、目標加速度軌道を達成するためのフィードフォワードトルク、ヤコビ行列の微分を含む項、コリオリ力、遠心力、重量項からなる非線形項のフィードバック、マニピュレータ先端で発生すべき目標力の和からなる。なお、これらの行列は全てモデルと誤差がなくリアルタイムで計算可能とする。この指

令トルクを用いてマニピュレータを駆動すると、

$$\tau_i = H_i(J_i^{-1}\ddot{x}_i - \dot{J}_i^{-1}\dot{x}_i) + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + g_i(\theta_i) + J_i^T F_i \tag{3-16}$$

となる。モデルと実際のパラメータに誤差がない場合には、これを式(3-14)と連立することにより、

$$H_i J_i^{-1}(\ddot{x}_{id} - \ddot{x}_i) + J_i^T(F_{id} - F_i) = 0 \tag{3-17}$$

が得られる。マニピュレータが単独で運動を行なう場合と異なり、マニピュレータ先端から目標力と実際に発生している力の誤差成分が混入していることがわかる。このため、マニピュレータ単体の運動のみでなく系全体の誤差がどのようなふるまいをするかを調べる必要がある。

対象物の運動方程式は

$$\sum_i F_i = M\ddot{x}_m + \Phi \tag{3-18}$$

となる。(3-15)、(3-18)の両辺をそれぞれ引くと

$$\begin{aligned}\sum_i (F_{id} - F_i) &= M(\ddot{x}_{md} - \ddot{x}_m) + K_{vm}(\dot{x}_{md} - \dot{x}_m) + K_{pm}(x_{md} - x_m) \\ &= M\ddot{e} + K_{vm}\dot{e} + K_{pm}e\end{aligned} \tag{3-19}$$

が得られる。更に式(3-17)から

$$F_{id} - F_i = -W_i\ddot{e}_i \tag{3-20}$$

$$W_i = J_i^{-T} H_i J_i^{-1}$$

が得られる。但しW_iはマニピュレータのハンド座標系における慣性行列を意味し、実慣性行列と呼ばれる。剛体マニピュレータの場合、マニピュレータ先端の位置、姿勢は対象物の位置、姿勢から一意に決定される。マニピュレータは対象物をrigidに把握している場合には、マニピュレータのエンドイフェクタ座標系を対象物座標系と一致するように設定しておくことができる。従って誤差ベクトルe_iとeは同一のものとみなして差し支えない。従って

$$e_i = e$$

とし、式(3-20)を式(3-19)に代入すると

$$(M + \sum_i W_i)\ddot{e} + K_{vm}\dot{e} + K_{vm}e = 0$$

となる。これを書き直して

$$\ddot{e} + W^{-1}K_{vm}\dot{e} + W^{-1}K_{pm}e = 0 \tag{3-21}$$

$$W = M + \sum_i J_i^{-T} H_i J_i^{-1}$$

とし、系全体の誤差ベクトルとして

$e_t = [\ e^T\ \dot{e}^T\ ]^T$

を定義すると式(3-22)の誤差ベクトルの状態方程式が得られる。

誤差システムの状態方程式

$$\dot{e}_t = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -W^{-1}K_{pm} & -W^{-1}K_{vm} \end{bmatrix} e_t \qquad (3\text{-}22)$$

この式は２次系となっており、係数行列は時変である。このような系の安定化には、設定したフィードバックゲインに対してリアプノフ関数をみつけるか、あるいは非線形フィードバックにより線形化を行ない、さらに極配置により安定化を図るといった手法が考えられる。[Arimoto 1987]ではリアプノフ関数を利用して、フィードバックゲインに定数行列を用いても協調系が安定であることを示している。しかしリアプノフ関数を発見すること自体難しい場合が多く、また安定性の証明がされたとしても、その挙動を知ることができないため、作業への適用に問題がある。従って本研究では非線形フィードバックによる線形化と、線形化された系に対する極配置という手法を採用する。

式(3-22)の状態方程式の行列で時変となる成分はW^{-1}である。従ってK_{pm}、K_{vm}をリアルタイムで変更することにより、$W^{-1}K_{pm}$、$W^{-1}K_{vm}$を常に定数とすることができ、誤差システムの状態を線形化することができる。更に、$W^{-1}K_{pm}$、$W^{-1}K_{vm}$を誤差状態ベクトルが０に収束するようフィードバックゲイン行列を計算すれば極配置が完成する。

望ましい収束を示す目標モデルとして

$$\ddot{e} - K_{vmd}\dot{e} + K_{pmd}e = 0 \qquad (3\text{-}23)$$

が与えられた場合、式(3-22)の誤差システムを式(3-23)に従うようにするためには

フィードバックゲイン

$$\begin{aligned} K_{pm} &= WK_{pmd} \\ K_{vm} &= WK_{vmd} \end{aligned} \qquad (3\text{-}24)$$

となるようK_{pm}、K_{vm}を算出すれば良い。

制御系の誤差システムは２次系となるので、フィードバックゲイン行列と外力に対

するコンプライアンスが対応している。式(3-22)の誤差システムにおいて、対象物の目標位置、姿勢が定数ベクトルの時、作業座標系におけるコンプライアンスは、WK_{vmd}、WK_{pmd}となる。従って、コンプライアンスが必要となる作業点におけるWを予め計算することにより、作業に必要なコンプライアンスを陽に指定できる。これはリアプノフ関数を利用して安定性の証明のみを行なう場合には得ることのできない特性である。本手法は、規範モデルを用いた適応制御の一種とみなすことができる。

以上に示した誤差システムの導出過程では、対象物に加わる合力のみが利用され、その配分はいっさい誤差システムに影響しないことがわかる。従って剛体マニピュレータの協調制御において、力の配分は制御系設計と独立に行なうことが可能であることが確認できる。これは3．6に示す剛性行列を考慮した協調制御においても成立つ。

3．6 弾性マニピュレータの協調制御系の設計

本節では、剛性行列でモデル化されるマニピュレータの協調制御系の設計を行なう。3．5と同様にn台のマニピュレータに適用が可能である。剛体マニピュレータの場合には、各関節で発生するトルクが直接手先に伝達されるので、この関係をヤコビ行列により関連づけることができる。これに対して弾性マニピュレータの場合、先端で目標力を発生するためには弾性部をたわませなくてはならない。このため、マニピュレータ先端の目標軌道は先端で発生すべき目標力の関数となる。本節では、3．6．1においてマニピュレータの目標位置の算出を行ない、3．6．2において制御系設計を行なう。

3．6．1 弾性部を含むマニピュレータの位置、姿勢の算出

本節においては、マニピュレータの位置、姿勢、弾性部のたわみ、発生力などの各座標系による表現について説明し、弾性マニピュレータの目標位置、姿勢の算出を行なう。マニピュレータがバネとしてモデル化される場合、マニピュレータ先端において目標力を発生するためにバネをたわませなければならない。マニピュレータが目標力を発生するためのバネのたわみを求める。以下に用いる各パラメータ、変換行列等の関係をFig. 3.14に示す。また、以下の議論では弾性部のたわみは微小であると仮定する。

剛性行列は対象物座標系において定義されているので、たわみの基準座標系による表現と対象物座標系による表現の関係を求めておかねばならない。微小変位の関係においては、用いる座標系の原点は問題とはならず、座標系の姿勢のみが関係する。まず、基準座標系から対象物座標系への同次変換行列をTとし、式(3-25)で表す。

$$T = \begin{bmatrix} R & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \tag{3-25}$$

Rは対象物座標系の姿勢を表す3x3の直交行列で、$\mathbf{p}$は対象物座標系原点の基準座標系における座標を表す。

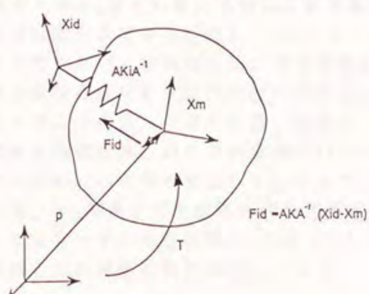


Fig. 3.14 座標系と各パラメータ

ここで

$$A = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \tag{3-26}$$

とおく。このAを用いることにより、対象物座標系で表されるベクトル${}^{o}\Delta x_{o}$を基準座標系の表記Δx_{o}に変換することができる。上付添字のないベクトルはこれまで同様基準座標系における表記であるとする。

$$\Delta x_{o} = A\,{}^{o}\Delta x_{o}$$

Aは直交行列であるから、$A^{-1}=A^{T}$が成立つ。逆に基準座標系において指定された力ベクトルFは

$${}^{o}F = A^{-1}F$$

により対象物座標系の表現に変換することができる。但しこれらの力はそれぞれの座標系の原点に作用する力の関係を示したものではなく、力の方向のみが変換される。

マニピュレータi先端の弾性部のたわみが0の状態で、ハンド座標系と対象物座標系が一致するようマニピュレータiのハンド座標系を設定しておくと、マニピュレータ先端の弾性部が剛性行列K_{i}の場合、バネのたわみと対象物座標系において発生する力F_{i}の関係は

$$F_{i} = AK_{i}A^{-1}(x_{i} - x_{m})$$

で与えられる。但しx_{m}は対象物の位置、姿勢、x_{i}はマニピュレータiのハンド座標系の位置、姿勢をそれぞれ表す。$x_{i}-x_{m}$はバネのたわみを基準座標系において表現したものである。これより、逆に目標力F_{id}を発生させるためのマニピュレータの目標位置、姿勢x_{id}は

$$x_{id} = x_{m} + AK_{i}^{-1}A^{-1}F_{id} \tag{3-27}$$

として求まる。位置、姿勢速度ベクトル$\dot{x}_{i}$などの姿勢成分には基準座標系各軸回りの角速度を用いるが、これらの成分は積分ができないため、x_{i}により3次元空間における姿勢を一意に指定することはできない。本研究では、姿勢表現としてx_{i}の他に同次変換行列を常に併用し、微小変位成分のみを同次変換行列に加えるという式(3-5)に示した操作により姿勢を決定することとする。即ち位置、姿勢x_{i}と呼ぶ場合には、姿勢成分に関してのみ、対応する同次変換行列の姿勢を表す3x3行列を指すものとする。式(3-27)の右辺第2項はバネのたわみのみを表しているので、微小変位ベクトルとみなすことができる。従って、x_{i}を表す同次変換行列を利用することでx_{id}の計算が可能となる。更に、マニピュレータが粘性抵抗Λ_{e}を有している場合、対象物にはマニピュレータの位置、姿勢とは無関係に粘性抵抗による力

$$F_{ei} = A\Lambda_{ei}A^{-1}(\dot{x}_{m} - \dot{x}_{i})$$

が働いている。従って、式(3-27)の目標値を与えてしまうと、F_eが対象物に余分に作用することになる。従って、式(3-28)を以下のように書換える。

$$x_{id} = x_m + AK_i^{-1}A^{-1}F_{id} - AK_i^{-1}\Lambda_{ei}A^{-1}(\dot{x}_m - \dot{x}_i) \qquad (3\text{-}28)$$

これにより、粘性抵抗を含めたマニピュレータの目標位置、姿勢が求まった。

さて、マニピュレータの目標軌道が実現可能であるためには、加速度が有限、即ち軌道の目標速度が連続であることが必要である。マニピュレータの目標値は目標力の関数であるから、弾性マニピュレータを用いた場合、先端で発生すべき目標力の微分が連続関数であることが求められる。これに応じて、対象物に加えるべき力にも同様の拘束条件が付加されるので、対象物の目標軌道は、その加速度の微分が連続関数となることが必要である。これは剛体マニピュレータでは現れない特徴であり、注意すべき事実である。

以上に、弾性マニピュレータを用いる場合の目標位置、姿勢の算出と、対象物の軌道に対する拘束条件を示した。これらの結果を利用して、制御系の設計を行なう。

3．6．2 協調制御系の設計

以上の準備の基に、マニピュレータｉの制御則として式(3-29)，(3-30)を考える。この指令トルクには、剛体マニピュレータの場合のトルクに加えてマニピュレータ先端の目標に対する位置、速度フィードバックが追加されている。これは、マニピュレータ先端の運動が対象物の運動と独立となるからである。なお、本制御則もｎ本のマニピュレータで成立つ。

制御則

$$\boxed{\begin{aligned} \tau_{id} &= H_i(J_i^{-1}\ddot{x}_{id} - \dot{J}_i^{-1}\dot{x}_i) + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + g_i(\theta_i) \\ &\quad + J_i^T\{ F_{id} + K_{vi}(\dot{x}_{id}-\dot{x}_i) + K_{pi}(x_{id}-x_i) \} && (3\text{-}29) \\ \sum_i F_{id} &= M\ddot{x}_{md} + K_{pm}(x_{md} - x_m) + K_{vm}(\dot{x}_{md} - \dot{x}_m) + \Phi && (3\text{-}30) \end{aligned}}$$

$\dot{x}_i$：マニピュレータｉハンド座標系の位置、姿勢ベクトル

K_{vi}：マニピュレータｉハンド座標系の速度誤差フィードバックゲイン行列

K_{pi}：マニピュレータｉハンド座標系の位置誤差フィードバックゲイン行列

このトルク指令を入力すると、マニピュレータの運動は

$$\begin{aligned} \tau_{id} &= H_i(J_i^{-1}\ddot{x}_i - \dot{J}_i^{-1}\dot{x}_i) + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + g_i(\theta_i) \\ &\quad + J_i^T\{ A_iK_iA_i^{-1}(x_i-x_m) + A_i\Lambda_{ei}A_i^{-1}(\dot{x}_i-\dot{x}_m) \} \end{aligned} \tag{3-31}$$

に従う。ここで

$$F_{id} = A_iK_iA_i^{-1}(x_{id}-x_m) + A_i\Lambda_{ei}A_i^{-1}(\dot{x}_i-\dot{x}_m) \tag{3-32}$$

であるので、式(3-19)，(3-31)の両辺を引算し、その結果に(3-32)を代入すると

$$H_iJ_i^{-1}\ddot{e}_i + J_i^TK_{vi}\dot{e}_i + J_i^T(K_{pi}+A_iK_iA_i^{-1})e_i = 0 \tag{3-33}$$

が得られる。但しe_iは以下の通りである。

$$e_i = x_{id} - x_i$$

次に、対象物の運動方程式を求める。対象物に実際に加わる合力は

$$\sum_i F_i = \sum_i A_iK_iA_i^{-1}(x_i-x_m) + \sum_i A_i\Lambda_{ei}A_i^{-1}(\dot{x}_i-\dot{x}_m) \tag{3-34}$$

である。ここで式(3-28)より

$$x_m = x_{id} - A_iK_i^{-1}A_i^{-1}F_{id} + A_iK_i^{-1}\Lambda_{ei}A_i^{-1}(\dot{x}_i - \dot{x}_m) \tag{3-35}$$

であるから、これを用いると式(3-34)の右辺第１項は

$$\begin{aligned} A_iK_iA_i^{-1}(x_i-x_m) &= A_iK_iA_i^{-1}x_i - A_iK_iA_i^{-1}x_m \\ &= A_iK_iA_i^{-1}x_i - A_iK_iA_i^{-1}x_{id} + F_{id} - A_i\Lambda_{ei}A_i^{-1}(\dot{x}_i - \dot{x}_m) \end{aligned}$$

$= -A_i K_i A_i^{-1} e_i + F_{id} - A_i \Lambda_{ei} A_i^{-1}(\dot{x}_i - \dot{x}_m)$

これを式(3-34)に代入すると

$$\sum_i F_i = -\sum_i A_i K_i A_i^{-1} e_i + \sum_i F_{id}$$
$$= -\sum_i A_i K_i A_i^{-1} e_i$$
$$+ M\ddot{x}_{md} + K_{pm}(x_{md} - x_m) + K_{vm}(\dot{x}_{md} - \dot{x}_m) + \Phi$$
$$= M\ddot{x}_m + \Phi$$

従って、

$$-\sum_i A_i K_i A_i^{-1} e_i + M\ddot{e} + K_{vm}\dot{e} + K_{pm} e = 0 \tag{3-36}$$

が得られる。式(3-33)から

$$\ddot{e}_i = -W_i^{-1} K_{vi} \dot{e}_i - W_i^{-1}(K_{pi} + A_i K_i A_i^{-1}) e_i \tag{3-37}$$

$$W_i = J_i^{-T} H_i J_i^{-1}$$

が、また(3-36)から

$$\ddot{e} = M^{-1}\sum_i A_i K_i A_i^{-1} e_i - M^{-1} K_{vm}\dot{e} - M^{-1} K_{pm} e \tag{3-38}$$

が、式(3-37),(3-38)から e, e_iについての状態方程式を得ることができる。

<u>誤差システムの状態方程式</u>

$$\dot{e}_t = E e_t \tag{3-39}$$

$$E = \begin{bmatrix} Q & Q_1 & \cdots & Q_{n-1} & Q_n \\ 0 & E_1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & E_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & E_n \end{bmatrix}$$

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -W_i^{-1}(K_{pi} + A_i K_i A_i^{-1}) & -W_i^{-1} A_i K_{vi} A_i^{-1} \end{bmatrix}$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1} A_i K_i A_i^{-1} & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1} K_{pm} & -M^{-1} K_{vm} \end{bmatrix}$$

但し e_tは以下と通りである。

$$e_t = [\, e^T\ \dot{e}^T\ e_1{}^T\ \dot{e}_1{}^T\ e_2{}^T\ \dot{e}_2{}^T\ \cdots\ e_n{}^T\ \dot{e}_n{}^T\,]^T$$

式(3-39)から分るように、誤差システムEの極は行列E_iの極とQの極である。W_i、A_iは時変なので、この誤差システムは非線形となるが、3．5と同様にK_{vm}、K_{pm}、K_{vi}、K_{pi}の各値をリアルタイムで算出し修正することにより、Eを時間によらず定数とすることができる。従って、誤差システムが安定に0に収束するように予め目標とするE_dを決定しておき、このE_dが常に達成されるように各フィードバックを算出すれば、3．5．2と同様に系を安定に動作させることができる。

誤差収束の仕方を見ると、それぞれのマニピュレータの位置、速度誤差は他のマニピュレータ、あるいは対象物の誤差に全く影響されずに収束する。従って、全てのE_iの極をQの極よりも早く収束するよう設定しておけば、各マニピュレータの誤差が収束した後には、対象物のコンプライアンスがK_{vm}、K_{pm}とMで表されることになる。

ここで目標とする誤差システムを式(3-40)のように与えたとする。

$$E_d = \begin{bmatrix} Q_d & Q_{1d} & \cdots & Q_{(n-1)d} & Q_{nd} \\ 0 & E_{1d} & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & E_{(n-1)d} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & E_{nd} \end{bmatrix} \tag{3-40}$$

但し

$$E_{id} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_{pid} & -K_{vid} \end{bmatrix}$$

$$Q_d = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_{pmd} & -K_{vmd} \end{bmatrix}$$

で、K_{pid}、K_{vid}、K_{pmd}、K_{vmd}はそれぞれ定数とする。式(3-40)の誤差システムを持つためには、フィードバックゲイン行列K_{pm}、K_{vm}、K_{pi}、K_{vi}を次の様に決定すればよい。

フィードバックゲイン

$$\boxed{\begin{aligned} K_{pm} &= M K_{pmd} \\ K_{vm} &= M K_{vmd} \\ K_{pi} &= W_i K_{pid} - A_i^{-1} K_i A_i \\ K_{vi} &= W_i K_{vid} \end{aligned} \qquad (3\text{-}41)}$$

各マニピュレータの誤差が対象物よりも速く収束するように式(3-40)のE_{id}の極を設定すれば、弾性マニピュレータを利用した場合においても、対象物に任意のコンプライアンスを付与することが可能となることがわかる。

次節では、本節の制御系を用いたシミュレーションを行ない、この誤差システム、設計法の正当性を検証する。

3．7　シミュレーション

本章では3．6の結果を平面内3自由度を有する2つのマニピュレータに適用し、その制御則の正当性を検証する。

まず目標位置、姿勢を固定したまま対象物に外乱を与え、誤差収束の過程のシミュレーションを行い、フィードバックゲインを用いて設定した極に従って誤差システムが収束することを確認する。

次に、外乱のない状態での搬送制御シミュレーションを行い、フィードフォワードが正しく作用すること、また設計軌道の正当性を検証する。

初期外乱を与え搬送制御シミュレーションを行う。この結果から、フィードフォワードトルクとは独立に誤差システムが設定した極に応じて収束することを確認する。

最後に、設定したフィードバックゲインにより、外力に対するコンプライアンスを表すことを検証するため、ステップ状の外力が対象物に加わった場合のシミュレーションを行う。

3．7．1 平面内3自由度マニピュレータの動力学

Fig.3.15に示す3自由度マニピュレータの動力学方程式をLagrangeの方程式により求める。各パラメータをFig.3.15のように定める。

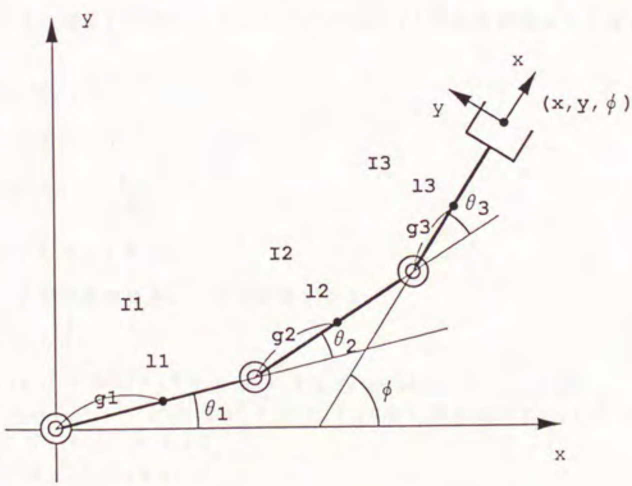


Fig.3.15 3自由度水平多関節型マニピュレータと各パラメータ

第iリンク重心の座標を(x_i, y_i)とすると

$x_1 = g_1 c_1$
$y_1 = g_1 s_1$

$x_2 = l_1 c_1 + g_2 c_{12}$
$y_2 = l_1 s_1 + g_2 s_{12}$

$x_3 = l_1 c_1 + l_2 c_{12} + g_3 c_{123}$
$y_3 = l_1 s_1 + l_2 s_{12} + g_3 s_{123}$

但し

$c_i = \cos(\theta_i), \quad c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$
$S_i = \sin(\theta_i), \quad s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$

となる。各リンクの運動エネルギは

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_{12}^2$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2} I_3 \dot{\theta}_{123}^2$$

として求まる。対象とするマニピュレータは平面内3自由度機構なので重力項はない。
従って

$$L = T_1 + T_2 + T_3$$

となる。これより

$$\tau_i = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i}$$

$$\theta_{123} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

としてトルクが算出できる。これを計算すると

$$\tau = H\ddot{\theta} + C\dot{\theta}$$

$$\begin{aligned} H_{11} = {} & m_1 g_1^2 + m_2(l_1^2 + g_2^2 + 2 l_1 g_2 c_2) \\ & + m_3(l_1^2 + l_2^2 + g_3^2 + 2 l_1 l_2 c_2 + 2 l_1 g_3 c_{23} + 2 l_1 g_3 c_3) \\ & + (I_1 + I_2 + I_3) \\ H_{12} = {} & m_2(g_2^2 + l_1 g_2 c_2) \\ & + m_3(l_2^2 + g_3^2 + l_1 l_2 c_2 + l_1 g_3 c_{23} + 2 l_1 g_3 c_3) \\ & + (I_2 + I_3) \end{aligned}$$

$H_{13} = m_3(g_3^2 + l_1 g_3 c_{23} + l_2 g_3 c_3) + I_3$

$H_{21} = H_{12}$

$H_{22} = m_2 g_2^2 + m_3(l_2^2 + g_3^2 + 2 l_2 g_3 c_3) + (I_2 + I_3)$

$H_{23} = m_3(g_3^2 + l_2 g_3 c_3) + I_3$

$H_{31} = H_{13}$

$H_{32} = H_{23}$

$H_{33} = m_3 g_3^2 + I_3$

$$
\begin{aligned}
C_{11} &= -\dot{\theta}_2\{m_2 l_1 g_2 s_2 + m_3(l_1 l_2 s_2 + l_1 g_3 s_{23})\} \\
&\quad - \dot{\theta}_3 m_3(l_1 g_3 s_{23} + l_2 g_3 s_3) \\
C_{12} &= -\dot{\theta}_1\{m_2 l_1 g_2 s_2 + m_3(l_1 l_2 s_2 + l_1 g_3 s_{23})\} \\
&\quad - \dot{\theta}_2\{m_2 l_1 g_2 s_2 + m_3(l_1 l_2 s_2 + l_1 g_3 s_{23})\} \\
&\quad - \dot{\theta}_3 m_3(l_1 g_3 s_{23} + l_2 g_3 s_3) \\
C_{13} &= -\dot{\theta}_1 m_3(l_1 g_3 s_{23} + l_2 g_3 s_3) \\
&\quad - \dot{\theta}_2 m_3(l_1 g_3 s_{23} + l_2 g_3 s_3) \\
&\quad - \dot{\theta}_3 m_3(l_1 g_3 s_{23} + l_2 g_3 s_3) \\
C_{21} &= \dot{\theta}_1\{m_2 l_1 g_2 s_2 + m_3(l_1 l_2 s_2 + l_1 g_3 s_{23})\} \\
&\quad - \dot{\theta}_3 m_3 l_2 g_3 s_3 \\
C_{22} &= -\dot{\theta}_3 m_3 l_2 g_3 s_3 \\
C_{23} &= -\dot{\theta}_1 m_3 l_2 g_3 s_3 - \dot{\theta}_2 m_3 l_2 g_3 s_3 - \dot{\theta}_3 m_3 l_2 g_3 s_3 \\
C_{31} &= \dot{\theta}_1 m_3(l_1 g_3 s_{23} + l_2 g_3 s_3) + m_3 l_2 g_3 s_3 \\
C_{32} &= \dot{\theta}_1 m_3 l_2 g_3 s_3 + \dot{\theta}_2 m_3 l_2 g_3 s_3 \\
C_{33} &= 0
\end{aligned}
$$

が得られる。次にヤコビ行列を算出する。

$x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123}$

$y = l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123}$

$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$

となるので、

$\Delta \mathbf{x} = J \Delta \boldsymbol{\theta}$,　$\Delta \mathbf{x} = [\Delta x \ \ \Delta y \ \ \Delta \alpha]^T$, $\Delta \boldsymbol{\theta} = [\Delta \theta_1 \ \ \Delta \theta_2 \ \ \Delta \theta_3]^T$

とすると、

$J_{11} = -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_3 s_{123}$

$J_{12} = -l_2 s_{12} - l_3 s_{123}$

$J_{13} = -l_3 s_{123}$

$J_{21} = l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123}$

$J_{22} = l_2 c_{12} + l_3 c_{123}$

$J_{23} = l_3 c_{123}$

$J_{31} = 1$

$J_{32} = 1$
$J_{33} = 1$

但し

$c_{123} = \cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3)$,　　$s_{123} = \sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3)$

が得られる。

3．7．2 目標軌道の設計

3．6．1にも述べたように、弾性マニピュレータの協調制御においては、対象物の目標加速度軌道を1階微分した関数が更に連続でなければならない。搬送軌道の初期条件、終端条件が決定されていると、これを満たす関数は最低9次関数となる。このように次数の高い関数は、その挙動が分りにくく、しかも加減速が非常に大きな値をとる恐れがあり、好ましくない。そこで本論文では、[Paul 1979], [Taylor 1979]を参考に、等速軌道を始点と終点の近傍で多項式曲線で補間するという軌道を設計する。[Paul 1979], [Taylor 1979]の手法では、まず軌道上に与えられた通過点の間を等速直線で連結する(Fig. 3.16)。このままではそれぞれの通過点において速度が不連続となるため、通過点前後に移行時間を設け、等加速度曲線により補間を行なう。この手法は軌道設計が簡単で、目標通過点が変更された場合にも軌道の変更が容易であるという利点がある。

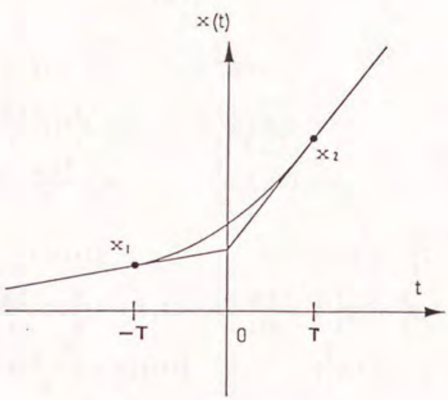


Fig. 3.16 等速軌道の内挿

2つの等速曲線の補間曲線を、加速度の1階微分が連続となるよう変更することにより、本制御系に適用する。移行時間を-Tから+Tとし、通過時刻を0とする。また、通過点前後の速度をV_1、V_2とする。

$$\alpha = \frac{4(V_1-V_2)}{T^3}$$

とおけば、$x_d(t)$は

$$
\begin{aligned}
&\ddddot{x}_d(t) = \alpha && \left(-T \leqq t < -\frac{T}{2},\ \frac{T}{2} \leqq t \leqq T\right) \qquad (3\text{-}42)\\
&\ddddot{x}_d(t) = -\alpha && \left(-\frac{T}{2} \leqq t \leqq \frac{T}{2}\right)\\
\\
&\dddot{x}_d(t) = \alpha\,(t+T) && \left(-T \leqq t < -\frac{T}{2}\right)\\
&\dddot{x}_d(t) = -\alpha\, t && \left(-\frac{T}{2} \leqq t \leqq \frac{T}{2}\right)\\
&\dddot{x}_d(t) = \alpha\,(t-T) && \left(\frac{T}{2} \leqq t \leqq T\right)\\
\\
&\ddot{x}_d(t) = \frac{\alpha\,(t+T)^2}{2} && \left(-T \leqq t < -\frac{T}{2}\right)\\
&\ddot{x}_d(t) = -\frac{\alpha\, t^2}{2} + \frac{\alpha T^2}{4} && \left(-\frac{T}{2} \leqq t \leqq \frac{T}{2}\right)\\
&\ddot{x}_d(t) = \frac{\alpha\,(t-T)^2}{2} && \left(\frac{T}{2} \leqq t \leqq T\right)\\
\\
&\dot{x}_d(t) = \frac{\alpha\,(t+T)^3}{6} + V_1 && \left(-T \leqq t < -\frac{T}{2}\right)\\
&\dot{x}_d(t) = -\frac{\alpha\, t^3}{6} + \frac{\alpha T^2}{4}\left(t+\frac{T}{2}\right) + V_1 && \left(-\frac{T}{2} \leqq t \leqq \frac{T}{2}\right)\\
&\dot{x}_d(t) = \frac{\alpha\,(t-T)^3}{6} + \frac{\alpha T^3}{4} + V_1 && \left(\frac{T}{2} \leqq t \leqq T\right)\\
\\
&x_d(t) = \frac{\alpha\,(t+T)^4}{24} + V_1(t+T) && \left(-T \leqq t < -\frac{T}{2}\right)\\
&x_d(t) = -\frac{\alpha\, t^4}{24} + \frac{\alpha T^2}{8}\left(t+\frac{T}{2}\right)^2 + V_1(t+T) + \frac{\alpha T^4}{192} && \left(-\frac{T}{2} \leqq t \leqq \frac{T}{2}\right)\\
&x_d(t) = \frac{\alpha\,(t-T)^4}{24} + \frac{\alpha T^3}{4} t + V_1(t+T) && \left(\frac{T}{2} \leqq t \leqq T\right)
\end{aligned}
$$

また、軌道の概形をFig.3.17に示す。始点からの立上がりでは$V_1 = 0$とすればよく、終点では$V_2 = 0$とすれば良い。

シミュレーションでは、x，y，ϕのそれぞれについて、本節の式を利用した軌道を設計している。

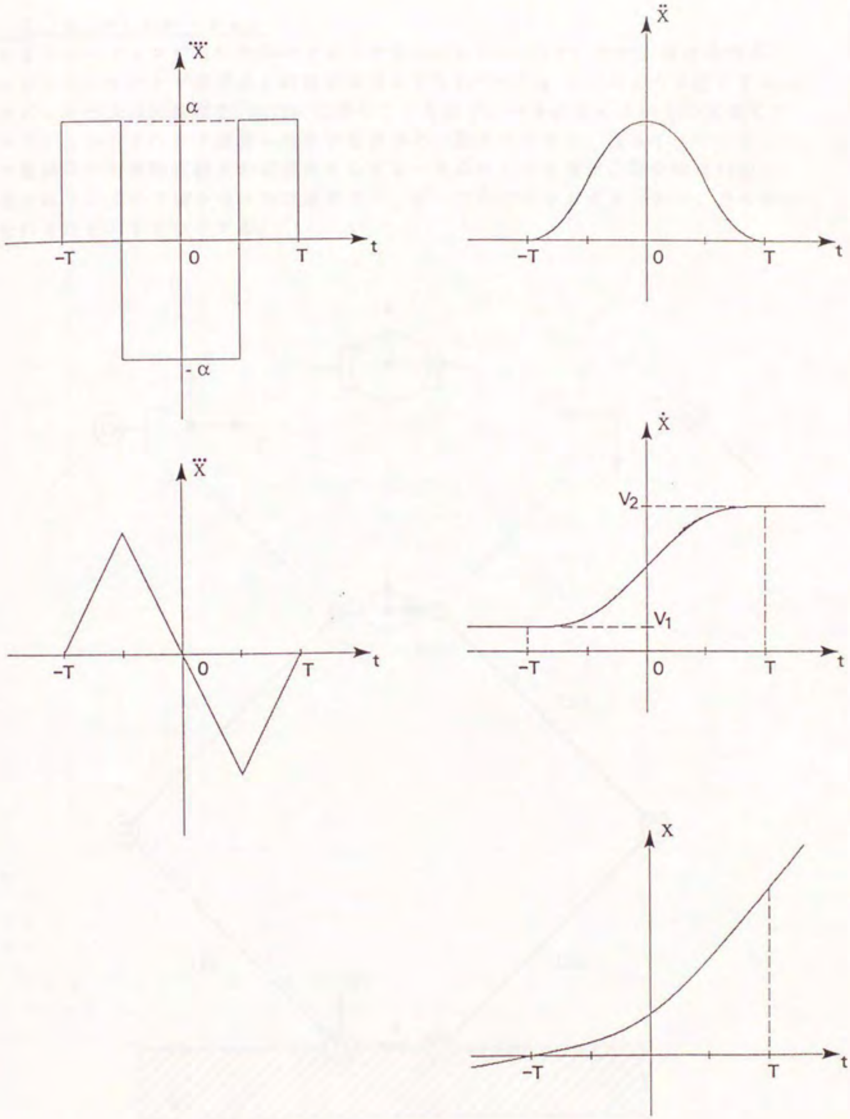


Fig. 3.17 加速度の微分が連続となる軌道

3．7．3 シミュレーション

シミュレーションに用いた各パラメータをTable.3.2に示す。また、基準座標系、マニピュレータハンド座標系、対象物座標系をそれぞれFig.3.18のように設定する。マニピュレータは対象物をrigidに把持しているので、バネのたわみが0の状態で予めマニピュレータハンド座標を対象物座標系と一致させておく。従って、マニピュレータ座標系と対象物座標系の偏差がそのままバネのたわみを表す。対象物はrigidに把持されているので挟みつけ力は必要ない。従って内力は0とする。また、力の配分はそれぞれ1／2ずつとする。

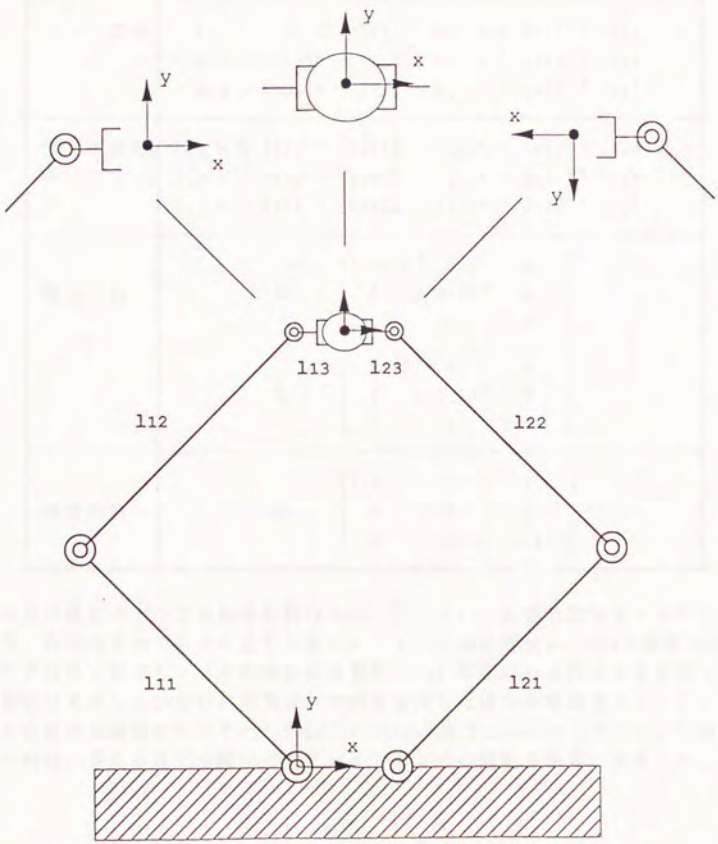


Fig.3.18 シミュレーションの設定

Table.3.2 シミュレーションに用いるパラメータ

リンク長	$l_{11} = 3.0\times10^{-1}$ [m]　$l_{21} = 3.0\times10^{-1}$ [m] $l_{12} = 3.0\times10^{-1}$ [m]　$l_{22} = 3.0\times10^{-1}$ [m] $l_{13} = 5.0\times10^{-2}$ [m]　$l_{23} = 5.0\times10^{-2}$ [m]
リンク重心距離	$g_{11} = 1.5\times10^{-1}$ [m]　$g_{21} = 1.5\times10^{-1}$ [m] $g_{12} = 1.5\times10^{-1}$ [m]　$g_{22} = 1.5\times10^{-1}$ [m] $g_{13} = 2.5\times10^{-2}$ [m]　$g_{23} = 2.5\times10^{-2}$ [m]
リンク質量	$m_{11} = 1.0\times10^{-1}$ [kg]　$m_{21} = 1.0\times10^{-1}$ [kg] $m_{12} = 1.0\times10^{-1}$ [kg]　$m_{22} = 1.0\times10^{-1}$ [kg] $m_{13} = 5.0\times10^{-2}$ [kg]　$m_{23} = 5.0\times10^{-2}$ [kg]
リンク慣性モーメント	$I_{11} = 7.5\times10^{-4}$ [kgm2]　$I_{21} = 7.5\times10^{-4}$ [kgm2] $I_{12} = 7.5\times10^{-4}$ [kgm2]　$I_{22} = 7.5\times10^{-4}$ [kgm2] $I_{13} = 1.0\times10^{-5}$ [kgm2]　$I_{23} = 1.0\times10^{-5}$ [kgm2]
剛性行列	$K_1 = \begin{bmatrix} 1.0\times10^{3} & 0 & 0 \\ 0 & 2.0\times10^{3} & 0 \\ 0 & 0 & 2.0 \end{bmatrix}$ $K_2 = \begin{bmatrix} 1.0\times10^{3} & 0 & 0 \\ 0 & 2.0\times10^{3} & 0 \\ 0 & 0 & 2.0 \end{bmatrix}$
慣性行列	$M = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.3\times10^{-3} \end{bmatrix}$

なお、制御対象のモデルでは粘性抵抗は利用していない。左側の添字はマニピュレータの番号、右側添字はリンクの番号を表す。リンクには断面30mmx30mmで肉厚5mmのアルミの中空角棒を想定した。また対象物は質量1kg、半径50mmの円柱を想定している。モータ重量は考慮していない。両腕が対象物を把持した場合の対象物のx，y，θ方向への自由振動の周期はそれぞれ0.14[S],0.098[s],0.11[s]となっている。それぞれの剛性行列は、多くの研究で用いられている力センサの剛性を参考に決定した。

シミュレーションとして、

1）位置決め点において初期外乱がある場合の振動制御シミュレーション、
2）初期外乱がない場合の搬送制御シミュレーション、
3）初期外乱がある場合の搬送制御シミュレーション、
4）ステップ状の外力を対象物に加えた場合のシミュレーション

の4通りを行なう。1）のシミュレーションにおいて、フィードバックにより誤差システムが安定に収束することを検証する。2）ではフィードフォワード指令、設計軌道の正当性を検証する。3）ではフィードフォワードループとフィードバックループの両者が同時に存在する場合においても系が安定に動作することを確認する。4）では設定したフィードバックゲインで外力に対するコンプライアンスを設定できることを検証する。フィードバックゲインをTable.3.3のように設定した。

Table.3.3 設定したフィードバックゲイン

$$K_{pmd} = \begin{bmatrix} 4.0\times10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0\times10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0\times10^3 \end{bmatrix} \qquad K_{vmd} = \begin{bmatrix} 1.3\times10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.0\times10 & 0 \\ 0 & 0 & 6.5\times10 \end{bmatrix}$$

$$K_{p1d} = \begin{bmatrix} 1.0\times10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0\times10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0\times10^4 \end{bmatrix} \qquad K_{v1d} = \begin{bmatrix} 2.0\times10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0\times10^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.0\times10^2 \end{bmatrix}$$

$$K_{p2d} = \begin{bmatrix} 1.0\times10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0\times10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0\times10^4 \end{bmatrix} \qquad K_{v2d} = \begin{bmatrix} 2.0\times10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0\times10^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.0\times10^2 \end{bmatrix}$$

目標とする応答は、対象物、それぞれのマニピュレータの誤差ともに、ほぼ臨界減衰を示すよう設定している。また、誤差収束の特徴が明らかに示されるよう、対象物の誤差収束を方向毎に異なった値に設計した。それぞれの極は約-63、-45、-32である。これに対して、各マニピュレータの目標値に対する誤差収束は早ければ早いほど良いが、実現性を考慮して極を-100と決定した。その結果、本節に示す全てのシミュレーション結果は数十W程度のモータにより実現可能である。

対象物の初期の釣合位置、姿勢はTable.3.4,Fig.3.19の通りである。

Table.3.4 初期位置、姿勢

$x_m(0)$ = 0.05[m]	$y_m(0)$ = 0.424[m]	ϕ_m = 0.0[rad]
$x_1(0)$ = 0.05[m]	$y_1(0)$ = 0.424[m]	ϕ_1 = 0.0[rad]
$x_2(0)$ = 0.05[m]	$y_2(0)$ = 0.424[m]	ϕ_2 = 0.0[rad]
$\theta_{11}(0)$ = 2.36[rad]	$\theta_{12}(0)$ = -1.57[rad]	$\theta_{13}(0)$ = -0.785[rad]
$\theta_{21}(0)$ = 0.785[rad]	$\theta_{22}(0)$ = 1.57[rad]	$\theta_{23}(0)$ = 0.785[rad]

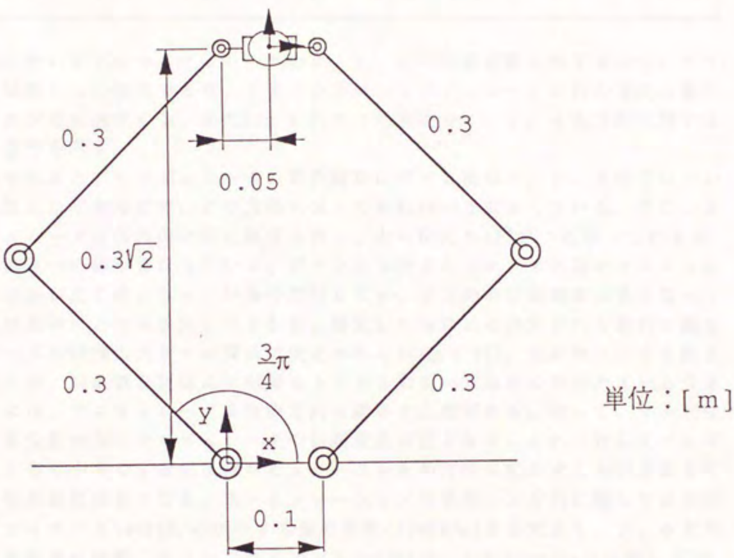


Fig.3.19 対象物、マニピュレータの初期姿勢

1）シミュレーションI

まず、対象物の初期状態としてTable.3.5を与えた。それぞれのマニピュレータ先端のバネはx，y方向にそれぞれ10mmたわみ、回転方向に0.1rad回転した状態となっている。なお、初期速度はすべて0とする。対象物の目標位置、姿勢はFig.3.19に示した位置、姿勢である。

Table.3.5 初期条件

$x_m(0) = 6.0\times10^{-2}$[m]	$y_m(0) = 4.3\times10^{-1}$[m]	$\theta_m(0) = 1.0\times10^{-1}$[rad]
$x_{md}(0) = 5.0\times10^{-2}$[m/s]	$y_{md}(0) = 4.2\times10^{-1}$[m/s]	$\theta_{md}(0) = 0.0$ [rad/s]

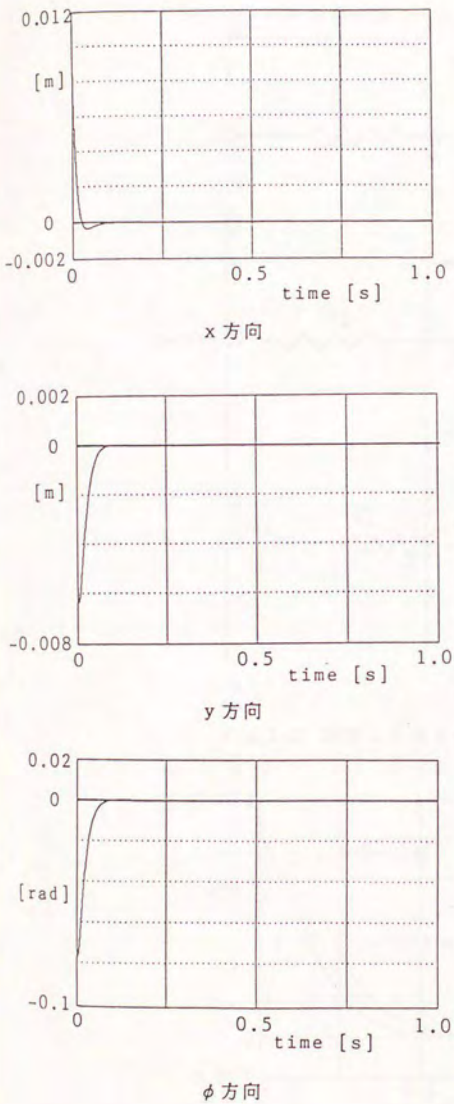
Fig.3.20にそれぞれのマニピュレータのx，y，ϕの誤差収束の様子を示す。グラフの縦軸は誤差からの変位であり、グラフの正は、マニピュレータが負の方向に動作指令を受けた状態を意味する。またFig.3.21には対象物のx，y，ϕ各方向に関する誤差収束の様子を示す。

Fig.3.20を見ると、マニピュレータの誤差収束に対する極はx，y，ϕ全てについて同じ値に設定してあるので、どの方向に関しても約90msで収束している。また、2つのマニピュレータは各方向に同じ剛性を有し、力の配分も1/2ずつとなっているので、グラフは2つの線が重なっている。グラフから分るように、x方向のマニピュレータの初期誤差が正の値となっているのに対してy、ϕ方向の初期誤差は負となっている。初期誤差が正となるか負となるかは、設定した極により決定される静的な剛性と、本来のバネの剛性の大きさの関係で決定される(Fig.3.22)。対象物に対する誤差が与えられた時、対象物を目標点に引戻そうとする力をバネ本来の復元力よりも大きくするためには、マニピュレータを負の方向に動かす必要がある。従って、マニピュレータの目標位置からのマニピュレータの初期変位が正となる。これに対してバネ本来の復元力よりも小さくするにはマニピュレータを正の方向に動かすことが必要となる。従って初期変位は負となる。本シミュレーションの場合、x方向に関しては設定したコンプライアンス(4000N/m)がバネ本来の剛性(2000N/m)より大きく、y、ϕ方向に関してはそれぞれ設定したコンプライアンス(2000N/m, 770000Nm/rad)に対してバネの剛性は(4000N/m, 2500000Nm/rad)となっている。

次にFig.3.21を見ると、対象物の挙動はx.y.ϕの各方向について、それぞれ140ms,200ms,260ms程度で収束している。これらの値はほぼ設定した極の大きさと対応しており、マニピュレータの誤差収束が理論通り行われている。更に、極を臨界減衰を示すよう設定しているので収束過程において振動は発生しない。これより、フィードバックゲインのリアルタイム計算による誤差システムの安定化、極配置が実現されていることが確認できる。

Fig.3.23には、誤差収束の過程におけるx方向の対象物の目標位置からの偏差、それぞれのマニピュレータの偏差を示す。マニピュレータはx方向に同じ剛性を有しており、しかも力の配分も1／2ずつとなっているので、2つのマニピュレータは全く

同じ運動を行う。従って、2つのマニピュレータの位置は重なっている。縦軸は偏差、横軸は0～0．25秒までの時間を表している。対象物に設定した極を臨界減衰となるよう設定しているので、マニピュレータは、対象物が目標位置で振動を発生せずに停止するよう動作していることがわかる。



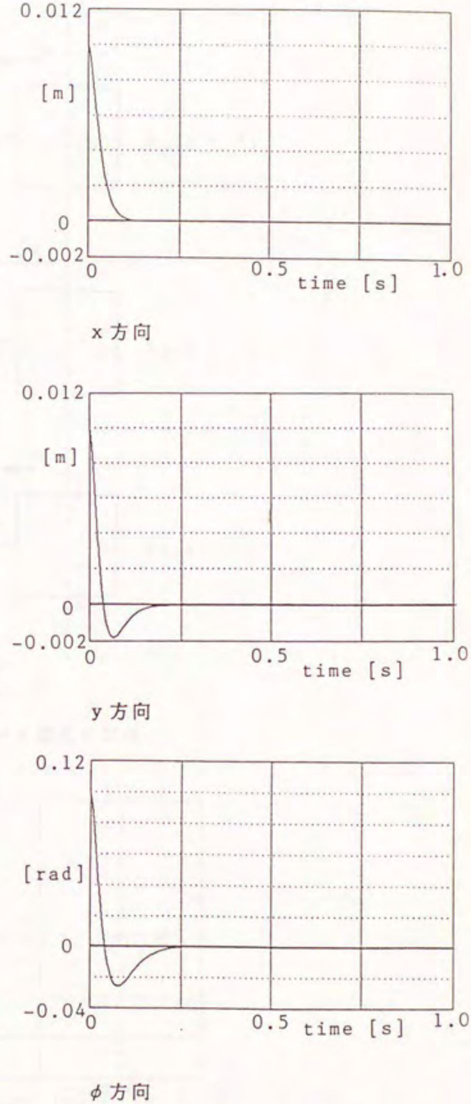


Fig. 3.20 マニピュレータの誤差収束の様子

Fig. 3.21 対象物の誤差収束の様子

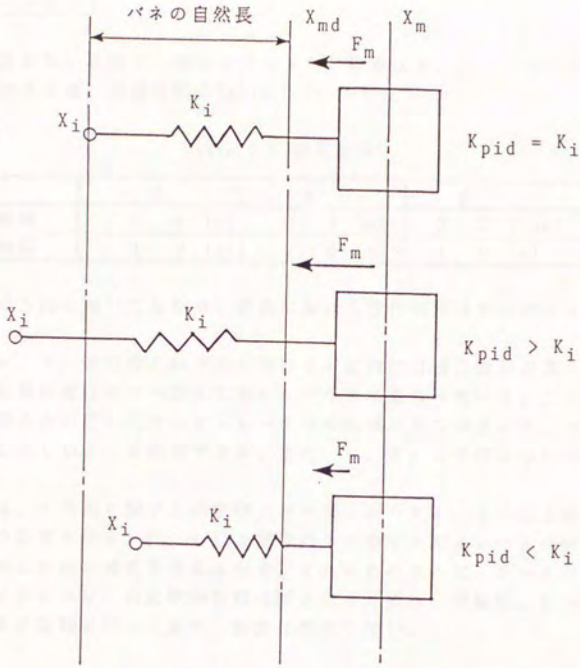


Fig. 3. 22 設定した極とバネ剛性の関係

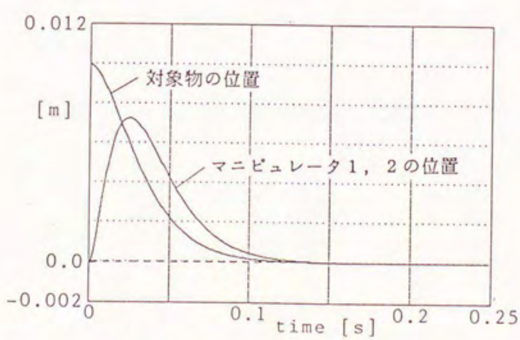


Fig. 3. 23 対象物、マニピュレータの位置偏差

2）シミュレーションⅡ

次に初期外乱がない状態で、搬送を行なった。軌道は３．７．２に示した関数を利用している。搬送距離、搬送時間をTable.3.6に示す。

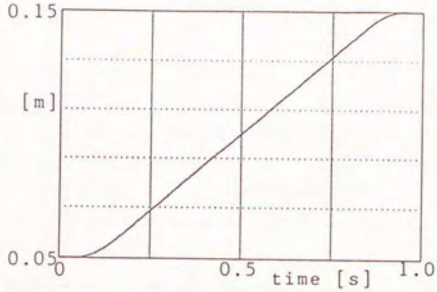
Table.3.6 搬送条件

	x	y	ϕ
搬送距離	０．１ [m]	０．１ [m]	０．３ [rad]
搬送時間	１．０ [s]	１．０ [s]	１．０ [s]

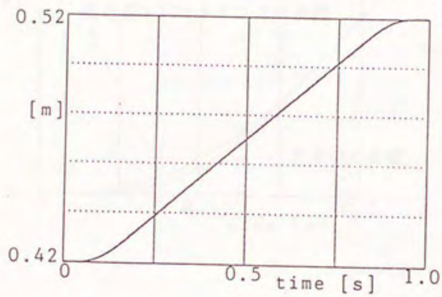
なお、いずれの方向においても始点、終点における移行時間はそれぞれ０．２秒である。

Fig.3.24にｘ，ｙ，ϕ方向それぞれにおける対象物の目標位置と実現された値を示す。目標値と実現軌道はほぼ一致しており、グラフは重なっている。このことから、対象物への目標合力が正しくマニピュレータから伝達されていること、マニピュレータの目標位置が正しいことが確認できる。また、３．８．２で設計した軌道の妥当性が証明できる。

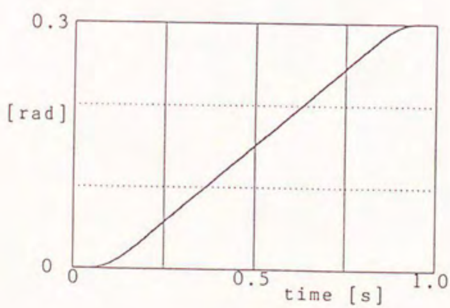
Fig.3.25には、ｘ方向に関する対象物とマニピュレータ１，２の立上がり時（０～０．２５秒）の位置を示す。Fig.3.23と同様に２つのマニピュレータの軌道は重なっている。対象物に目標の速度を与えるため、それぞれのマニピュレータが対象物を引張っている様子がわかる。対象物が目標速度となった後は、対象物、２つのマニピュレータは共に等速運動を行っており、振動は発生しない。



x方向



y方向



ϕ方向

Fig.3.24 目標搬送軌道と実現軌道(初期外乱なし)

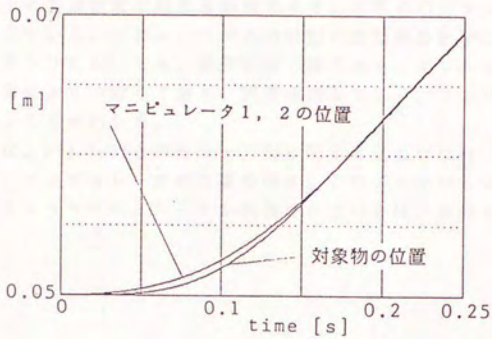


Fig. 3.25 対象物、マニピュレータの加速時における位置（x方向）

3）シミュレーションⅢ

最後のシミュレーションとして、初期外乱が存在する場合の搬送を行なった。初期外乱の大きさ、搬送軌道はそれぞれTable.3.5,Table.3.6と同じである。

Fig.3.26にx，y，ϕ方向の目標軌道と実現軌道を示す。どのグラフにおいても約0.22秒で誤差が収束し、その後はシミュレーションⅡと同様ほとんど誤差を生じることなく搬送が実現されている。x，y，ϕ方向の目標誤差システムで異なる極を指定しているので、収束時間はそれぞれ異なっている。この誤差収束を見るため、対象物の実現軌道の目標軌道からの偏差をFig.3.27に示す。また、Fig.3.28にはそれぞれのマニピュレータの目標位置に対する誤差を示す。どちらのグラフも搬送中にわずかな定常偏差が生じている。これは、モデルの線形化誤差等の影響によるものと思われるが、いずれのグラフにおいても、誤差収束の様子はシミュレーションⅠのFig.3.20、Fig.3.21と非常によく一致しており、誤差収束がフィードフォワード項によらず独立に機能していることがわかる。

Fig.3.29には、Fig.3.25と同様にx方向に関する立上がり時（０～０．２５秒）の対象物の位置、マニピュレータの位置を示す。このグラフから対象物の位置を目標軌道と一致させるようマニピュレータが制御されている様子が分る。

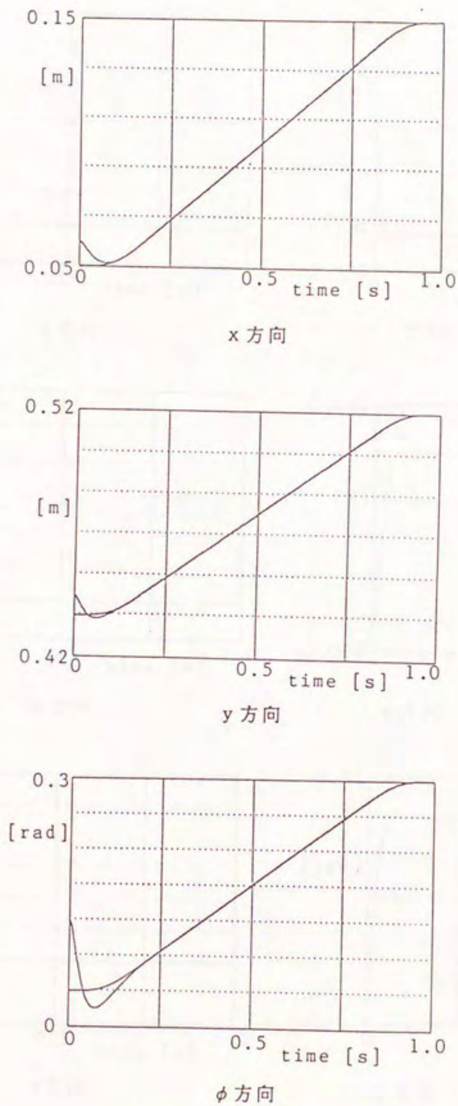


Fig.3.26 目標搬送軌道と実現軌道(初期外乱あり)

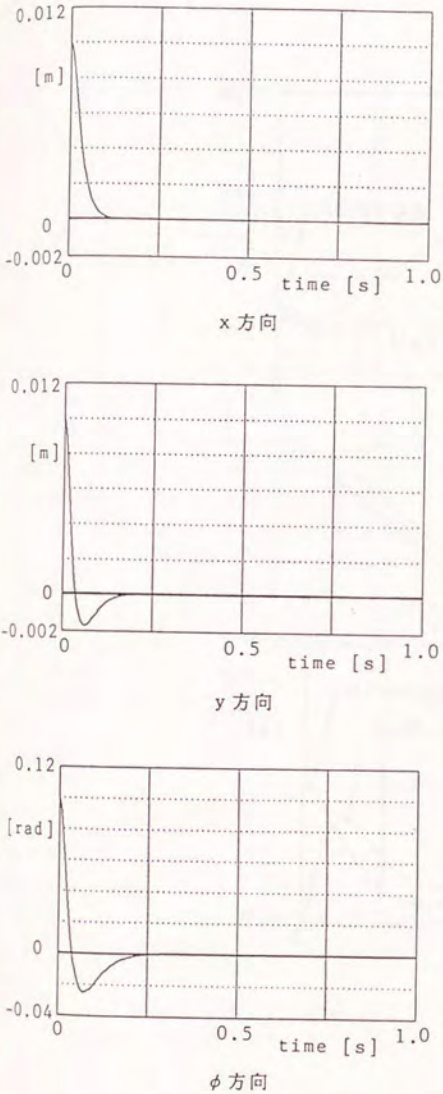


Fig. 3.27 対象物の誤差収束の様子

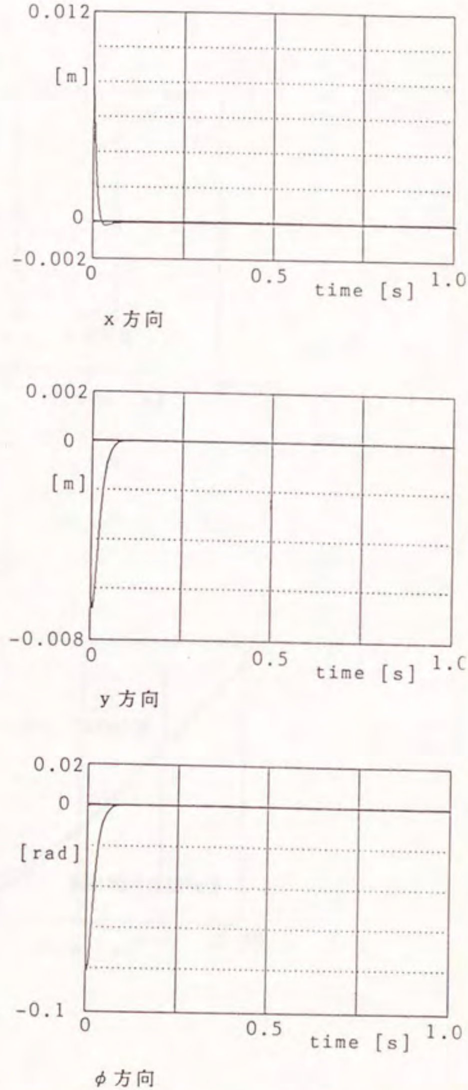


Fig. 3.28 マニピュレータの誤差収束の様子

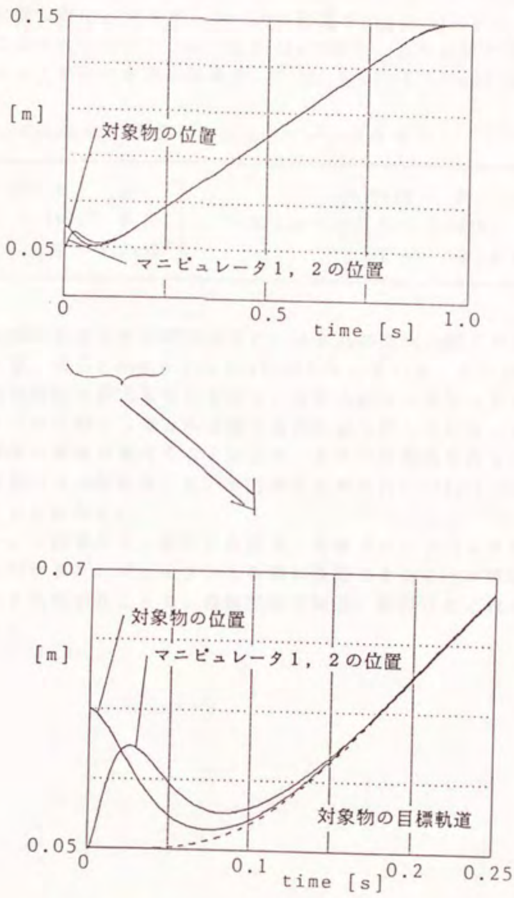


Fig.3.29 対象物、マニピュレータの加速時における位置（x方向、初期外乱有り）

4）シミュレーションⅣ

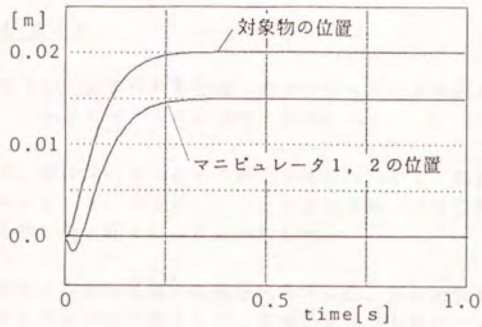
Table.3.3に示したフィードバックゲイン行列のうち、対象物誤差に対するゲイン行列のみTable.3.7のように変更し、ステップ状の外力がx，y，φの各方向に加わった場合の対象物の位置の変化、マニピュレータの位置をFig.3.30に示す。なお、それぞれの方向に対する力の大きさは、10N,10N,0.1Nmであり、これに対する定常偏差は、設定したフィードバックゲインを用いた場合、0.02m,0.02m,0.16radとなる。

Table.3.7 設定したフィードバックゲイン

$$K_{pmd} = \begin{bmatrix} 5.0\times10^{2} & 0 & 0 \\ 0 & 5.0\times10^{2} & 0 \\ 0 & 0 & 5.0\times10^{2} \end{bmatrix} \qquad K_{vmd} = \begin{bmatrix} 4.5\times10 & 0 & 0 \\ 0 & 4.5\times10 & 0 \\ 0 & 0 & 4.5\times10 \end{bmatrix}$$

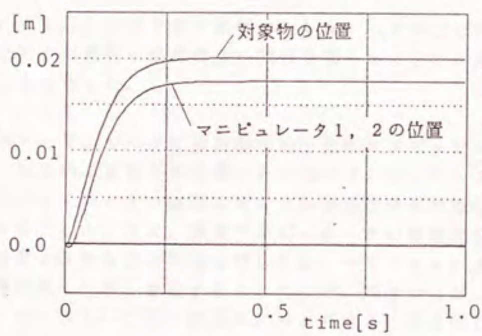
グラフをみると、対象物に発生する定常偏差は、いずれの方向に関しても理論通り設定した剛性に対する値、即ち0.02m,0.02m,0.16radとなっている。どの方向に関しても同じバネ定数、粘性抵抗を設定しているので、実際の剛性が異なっているにも拘らず対象物の応答は3方向に関してほとんど同じ過渡応答を示している。また、それぞれの方向に関する機構の剛性が異なることにより、見かけの剛性を作るためのマニピュレータの対象物位置からの変位は、x，y方向でそれぞれ0.005m,0.0025mと異なった値となっていることがわかる。

このシミュレーション結果から、設定した位置、速度フィードバックゲインを用いることにより外力に対するコンプライアンスを陽に設定できることが確認された。このコンプライアンスを利用することで、協調制御を搬送、組付けなど様々な作業に適用することができる。



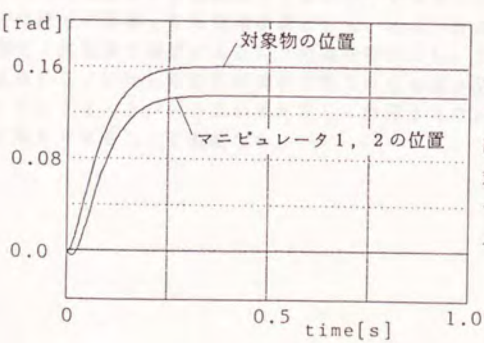
外力:１０N
マニピュレータ剛性:1000x2 N/m
設定した剛性: 500 N/m
対象物に発生する偏差:0.02 m
マニピュレータの
バネに発生する偏差: 0.005 m

x方向



外力:１０N
マニピュレータ剛性:2000x2 N/m
設定した剛性: 500 N/m
対象物に発生する偏差:0.02 m
マニピュレータの
バネに発生する偏差:0.0025 m

y方向



外力:０．１Nm
マニピュレータ剛性: 2.0x2 Nm
設定した剛性: 0.625 Nm
対象物に発生する偏差:0.16 rad
マニピュレータの
バネに発生する偏差: 0.025 rad

ϕ方向

Fig.3.30 ステップ状の外力に対する対象物、マニピュレータの変位

3．8 まとめ

本章では、剛性行列を考慮したマニピュレータの協調制御系の設計を行ない、シミュレーションによりその正当性を証明した。

まず、剛体マニピュレータ同士の場合について、動力学を考慮した協調制御系の形態を考察し、２つのマニピュレータ両方を用いて対象物の軌道実現と内力の制御を行なう形態が最も好ましいことを示した。

対象物に与える目標力の配分法を示した。２つの機構が異なる機構特性、制御特性を有する場合の配分法として、目標力を各成分毎に、また作業座標系の各方向毎に配分するという簡便な手法を提案した。

これまで行なわれてきた剛体マニピュレータ同士の協調制御系のフィードバックゲイン行列と対象物の誤差収束の関係を明らかにし、対象物の挙動を２次系モデルとできることを示した。

剛体マニピュレータの協調制御系を弾性マニピュレータの協調制御系に拡張した。まず、対象物に目標力を伝達するためのマニピュレータの目標位置を算出した。また、弾性マニピュレータの協調においては加速度軌道の微分が連続となることが必要であることを示した。次に、弾性マニピュレータの協調制御系におけるフィードバックゲイン行列と誤差収束の関係を明らかに、マニピュレータの目標誤差収束を対象物の目標誤差収束より速く設定することにより、剛体マニピュレータの場合同様、弾性マニピュレータにおいても２次系モデルとできることを示した。

２台の３自由度水平多関節型マニピュレータを用いたシミュレーションを行った。加速度の微分が連続となる目標軌道として、始点、終点を等速曲線で結び、始点、終点近傍を４次関数で補間するという軌道を設計した。この軌道を用いたシミュレーション結果から、設計した協調制御系で誤差収束の極が設計可能なこと、フィードフォワード項とフィードバック系が共に正しく作用すること、対象物のコンプライアンスを陽に指定できることを検証した。