

腱制御ロボットの運動制御に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-05-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 兵頭, 和人 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/12887

学位論文

腱制御ロボットの運動制御に関する研究

兵頭 和人

1994年

腱制御ロボットの運動制御に関する研究

目次

第1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	生体システムとロボット	2
1.3	腱制御機構について	5
1.4	本論文の構成	11

第1部 腱制御機構の基礎解析

第2章 腱制御機構の運動学

2.1	はじめに	14
2.2	作業, 関節, 腱空間	14
2.3	非線形バネ要素(NST)	17
2.4	剛性調整変数の構成	21

第3章 腱制御機構の機構特性評価

3.1	はじめに	31
3.2	解析モデルの概要	31
3.3	可動範囲	34
3.3.1	1自由度モデルにおける解析	37
3.3.2	3自由度機構における解析	39
3.4	可操作性	45

第4章 腱制御機構の制御

4.1	はじめに	50
4.2	機構の概要	50
4.3	腱張力の算出	53

4.4	制御系の構成	目次 57
4.4.1	張力制御系の構成	57
4.4.2	1関節-2駆動系モデルでの制御系の構成	58
4.4.3	n自由度腱制御機構での制御系の構成	61
4.5	制御	62
4.5.1	実験システムの概要	62
4.5.2	実験結果	64
第2部 腱制御機構の応用		
第5章 小型腱制御アームと産業用ロボットの協調制御		
5.1	はじめに	72
5.2	問題設定	72
5.3	協調制御系の構成	76
5.4	制御システムの拡張	86
第6章 7自由度腱制御アームの制御		
6.1	はじめに	90
6.2	7自由度腱制御アームの概要	90
6.3	剛性制御変数の構成及び腱張力の算出	94
6.4	制御	98
6.4.1	実験システムの概要	98
6.4.2	実験結果	102
第7章 結言		115
謝辞		118
参考文献		119

第 1 章

序論

1.1 はじめに

近年のエレクトロニクスの発展にともない、ロボットの性能も飛躍的に向上している。生産形式が少品種大量生産から多品種小量へと移行するのと相まって、工場の生産ラインなどの自動化を行なう上での花形的存在であり、数多くの作業を人に代わって行うに至っている。しかし、作業そのものの複雑さから見た場合、現在のロボットの持つ能力は人のそれに遠く及ばない。つまり、位置精度が要求される作業に対しては人よりも優れた能力を発揮するが、環境との相互作用を伴うような作業や人との協調動作が必要となる作業に対してはあまり高い能力を持っていないというのが現在の産業用ロボットの状況である。そこで、人のように刻一刻と変化する環境に素速く適応しつつ、多種多様の作業に同一の機構で対応できる柔軟性をロボットにも備えて、より複雑な作業を行なわせたいという要求が高まっている。

位置精度が要求される作業にも柔らかさが要求される作業にも同一の機構（ロボット）によって対応するためには、要求される作業によってロボットの剛性を調整できる必要がある¹⁾。ロボットの見かけの剛性を制御系によって調整する目的で開発されたのがアクティブ・コンプライアンス制御手法であるが²⁾³⁾、この場合アクチュエータの動特性によって調整できる剛性の下限が制限を受ける。そのため非常に柔らかい特性（例えば人と接触したときに危害を与えない）を持つためには機械的に剛性を調整できる特性を持たな

なければならない。機械的にロボット機構の剛性を調整するには、ロボットの関節を駆動する以外に機械的剛性を調整するための駆動力をアクチュエータが発生するような構造とすることが考えられる^{4),5)}。そこで、本論文では、ロボットの関節に対して冗長なアクチュエータによって駆動することによって、ロボットの作業性能を向上させるための研究を行う。以下では、生体運動系において駆動冗長性及び可変弾性要素が果たす役割を1.2節で、駆動冗長性をロボット機構に適応した際の特徴及び問題点について1.3節において述べる。

1.2 生体システムとロボット

生体の運動における動作の巧妙さや複雑さ、更に環境変動への適応性の高さなどは、ロボットに同じような動作をさせようと考えてみた時に必要性を痛感する問題であり、またロボットにそれら生体の優れた特性を取り入れることは魅力的なテーマである。では、生体の運動系の優れた特色とは何か、従来のロボットと大きく違う点は制御システムの構造上の特徴と筋骨格系の持つ力学的特性（駆動冗長性及び可変粘弾性特性）の2点であると思われる⁶⁾。これまでも制御システムの面からロボット制御システムの改善が数多くなされている^{7),8),9),10)}、しかしより柔軟で汎用性に富んだロボット制御システムを構築するには機構面からの改善も必要である。本論文では生体の運動系のように、駆動冗長性と可変粘弾性要素を導入したロボットの運動制御について論じている。以下では、生体運動系の持つ2つの特徴について詳しく述べる。

第一の特徴である制御システム構造としては、運動制御系が階層的な構成をとる多重ループ制御を行なっていることが挙げられる¹¹⁾。生体の運動制御系は上位中枢(脳系)によって運動が企画され、外的環境因子との兼ね合いより運動指令が生成され、その運動指令に対して下位中枢(脳幹、脊髄系)が基本的な脊髄反射¹²⁾を駆使して筋骨格系に働き

かけ具体的な運動の遂行と制御を行うという構造を採っている。

Fig. 1-1の階層的運動制御系では，視覚系からの情報を視覚野(Visual Area)で，触覚等の体性感覚を体性感覚連合野(Somatic Sensory ASS. Area)で受け取り，特徴抽出の処理を行い頭頂連合野(Parietal Ass. Area)に送る，ここでは体性感覚と視覚との統合が行われ，運動を実行するのに必要となる身体像や眼球の動きの影響を取り除いた空間地図の形成が行われる¹³⁾．これら高次の感覚情報を受け取った運動前野(Premotor Area)では，状況に応じた運動の企画・構成，つまり軌道計画が行われる．この運動プログラムは運動野(Motor Area)及び小脳外側部(Lateral Cerebellum)に送られる．小脳外側部は運動の動的

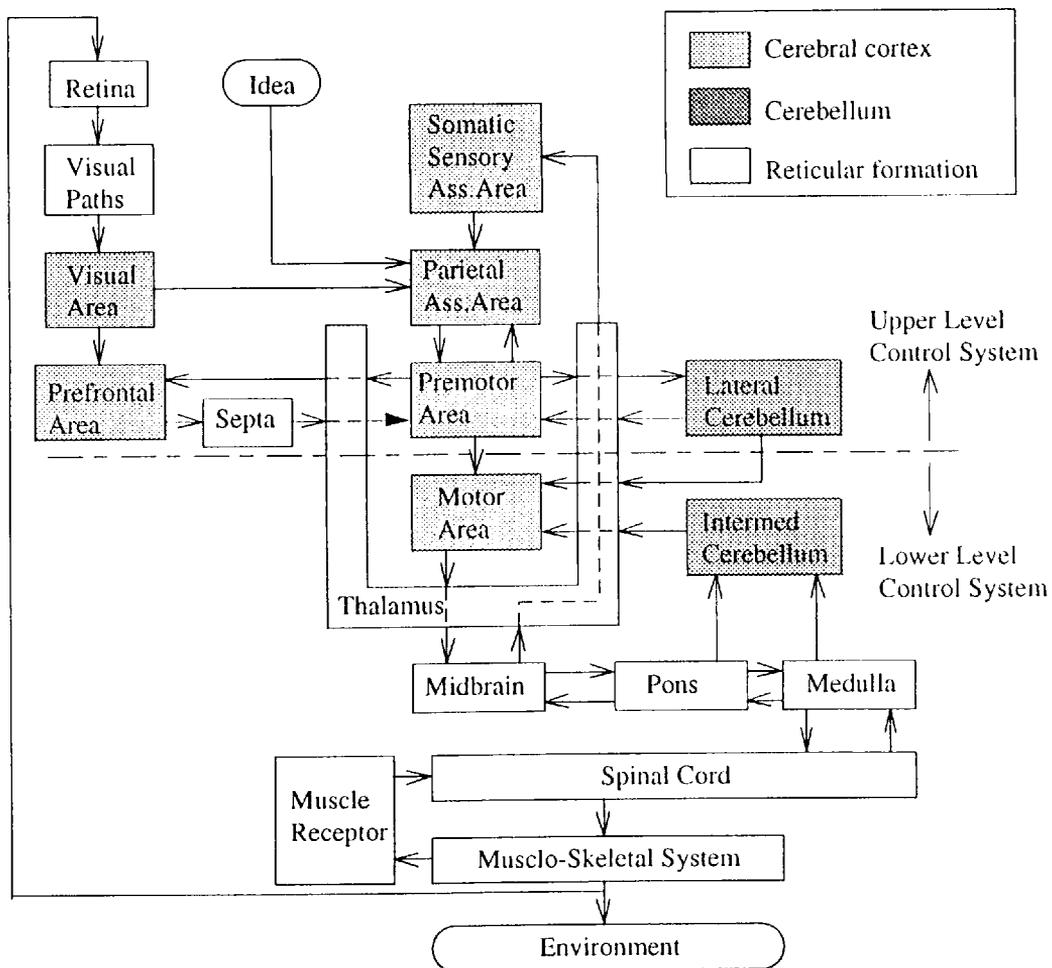


Fig. 1-1 A schematic diagram of the motorial nervous system

パターン（関節の発生すべきトルク）の計算を行い運動野に出力するとともに、運動前野へフィードバックし運動プログラムの修正を行う。運動野では運動前野、小脳外側部で構成・計算された運動指令から各筋群の時空間収縮パターンを生成する。また、運動野は脊髄反射のゲイン調節や切り換えも行っている。運動野の出力を運動の対象や外部環境の変動に応じて修正する適応制御系として機能しているのが、小脳中間部(Interned Cerebellum)である。運動野と小脳中間部によって生成された運動指令は網様体(Reticular Formation)を通り脊髄(Spinal Cord)に至る。脊髄はまた筋紡錘、腱受容器および関節受容器からのフィードバック情報も受け取っていて、上位中枢からのパラメータ調節可能な基本的なフィードバックサーボ機構を構成している。

現在の産業用ロボットでは主にフィードバックによる制御によって動作している。これに対し、生体の運動制御系では過去の学習によって小脳外側部に形成された逆モデルを使用したフィードフォワード制御が運動中に主に働いており、上位中枢へのフィードバックループは未知な作業や環境に対して逆モデルを修正する働きを持っていると言われている¹⁴⁾。このような制御システムの構造を採っているため、演算素子の基本スイッチング時間が、半導体素子のそれが1ns程度であるのに比して1ms程度と100万倍以上も遅い演算素子によってシステムが構成されているにもかかわらず、生体の運動制御システムはロボット制御システムに比して優れた柔軟性や適応性を示す。

第2の特徴である筋骨格系の持つ力学的な特性については、関節、筋（アクチュエータ）の数における冗長性及び筋の持つ可変粘弾性特性が挙げられる。まず、筋骨格系の冗長性について述べる。通常3次元作業空間内での位置姿勢を任意に定めるには6自由度必要である。これに対し、人の腕の自由度は7である。さらに、その7個の関節を動作させるための筋の数は少なく見積っても30以上はあり¹⁵⁾、筋繊維の数は数千のオーダーにのぼる。このように運動目的を達成するのに必要な自由度に比べて、はるかに多くの運

動学的自由度を有している。つまり、同一の作業空間での位置姿勢を達成するための関節変位は無数に存在している。従来より冗長な関節を持つロボット自体の特性の研究^{16),17)}や冗長性を障害物の回避¹⁸⁾、手先の操作性の向上¹⁹⁾、そしてインピーダンス制御能力の向上²⁰⁾のために利用する研究が行われている。

また関節トルクと腱張力のあいだの関係も同じで、同一の関節トルクを発生するための腱張力の組み合わせは無数に存在している。肘を例にとると、肘関節は上腕二頭筋によって屈曲し、上腕三頭筋によって伸張している。肘関節回りのトルクはこれらの筋の発生する張力の差によって生じている。このため肘関節に所要のトルクを発生している状態で、両方の筋の張力レベルを上げれば関節トルクを変えずに関節回りの剛性のレベルを上昇することができる。逆に両方の筋の張力を下げれば剛性レベルを減少することができるのである。この駆動冗長性に加えて筋の粘弾性特性は先の上位中枢によるパラメータ調整によって可変であり²¹⁾、筋骨格系の機械的インピーダンスの調整を容易に行うことができる。生体は、この駆動冗長性と筋の粘弾性特性の調節を動作に応じ利用することにより、筋骨格系の特性を調整し、様々な動作を行なうことが可能となる。

以上のように生体運動系では、階層的な構造を持つ制御システムによって筋骨格系の力学的特性を状況に応じて調整することによって、柔軟で汎用性の高い運動系を構築している。よって、ロボット制御システムの融通性や柔軟性を向上させるためには、制御システムの面からの改善のみではなく、機構面からの改善も必要であると考えられる。以下では、駆動冗長性を持つロボット機構である腱制御機構の特性と問題点について述べ、本論文において取り扱う点について述べる。

1.3 腱制御機構について

ロボットの可搬重量特性を改善する目的から **Fig. 1-2**のようなワイヤ駆動機構が開発さ

れてきた^{22),23)}。このような機構では関節を駆動するための全てのアクチュエータをベース部に配置することができ可動部の重量を抑さえることができる。しかし、ワイヤが緩み側から張り側に変化するときにバックラッシュが生ずる。このワイヤ駆動系では関節の数と同数アクチュエータを使用しており生体運動系の様な駆動冗長性を有していない。

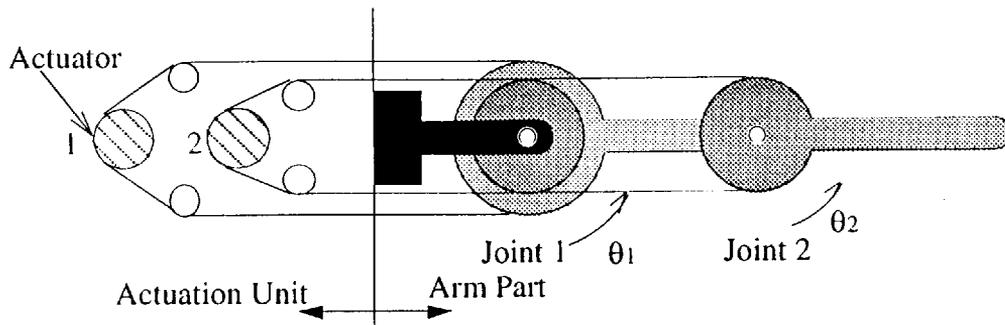


Fig. 1-2 Wire drive manipulator

ワイヤ駆動系の可搬重量特性を活かし、さらに筋骨格系の駆動冗長性を導入するためにFig. 1-3のような関節部の自由度よりも多くのアクチュエータを用いて関節部を駆動する機構が考案された²⁴⁾。このような駆動冗長性を持つワイヤ駆動機構のことを腱制御機構(Tendon-controlled mechanism)と呼ぶ。腱制御機構では、所定の動作に対して逆向きの作用をする拮抗腱が常時存在していて、その働きにより機構部の機械的剛性を調整することが出来るという特性を持っている。剛性が可変であることから、剛性を高く取っておくことにより、RCC(Remote Compliance Center)²⁵⁾などで問題であったアーム部の高速運動時の振動や外乱による振動を抑制することが出来る。但し、この可変剛性能力はワイヤが非線形な剛性特性を持っていることを前提としており、その調整範囲はあまり広くない。この剛性の調整範囲を広げるには、後述のように可変弾性要素を導入する必要がある。更に適当な初期張力を拮抗腱が発生することにより、歯車機構でのバックラッシュや従来のワイヤ駆動系でのバックラッシュを取り除くことが出来る。逆に腱制御機構では各アクチュエータには一本ずつの腱しか取り付けられていないので、アクチュ

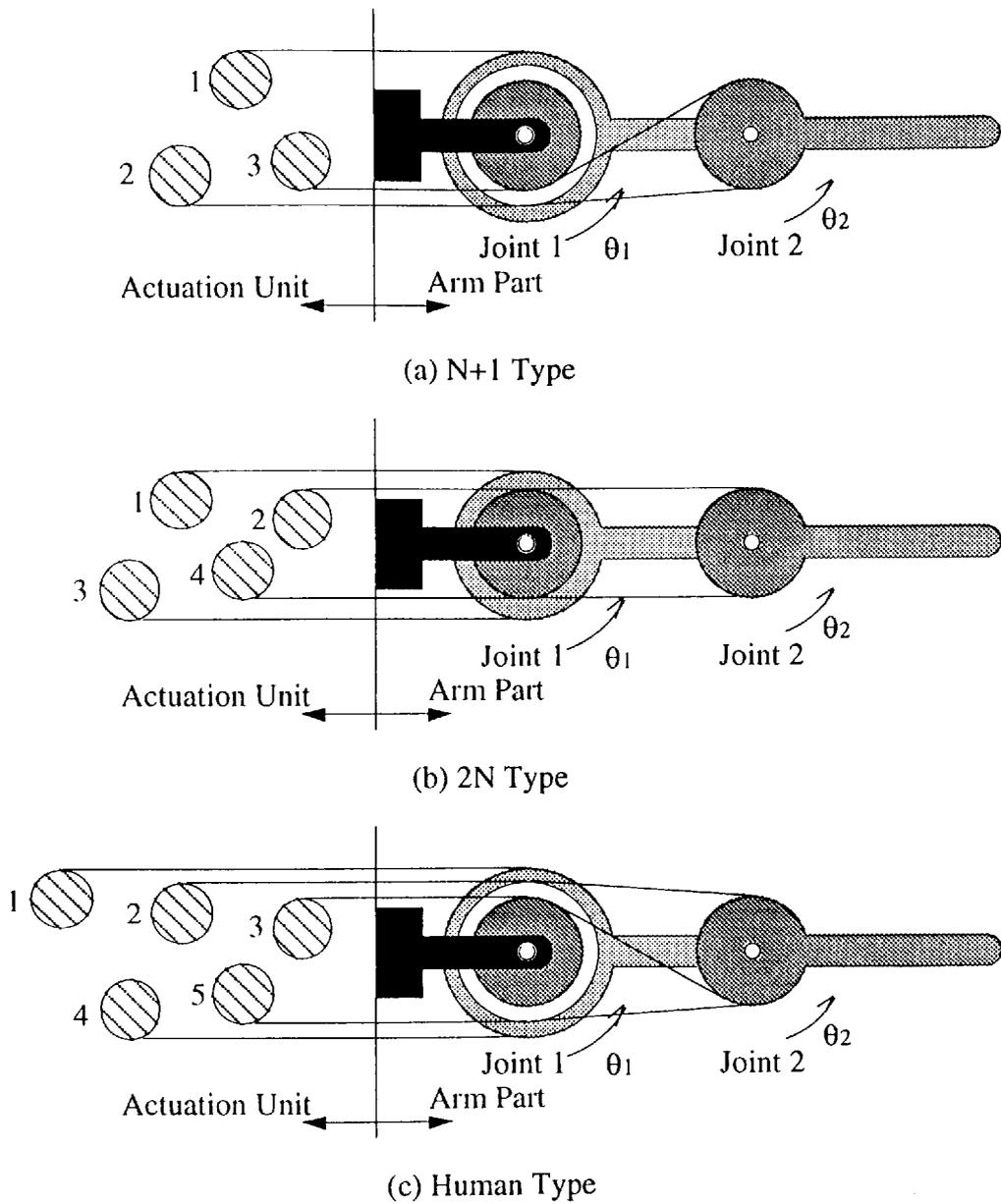


Fig. 1-3 Tendon controlled manipulator

エータは常に腱を張り続けるように動作しなければならず、アクチュエータが行き過ぎ量を生じた時の安全性を考慮すれば、初期張力は不可欠なものである。また腱を用いて操作力を関節部に伝達しているため、伝達経路中の支持部との摩擦が問題にならない範囲では、アクチュエータを任意の場所へ配置することができる。そのため、機構の自重を軽くすることができ、かつ手先重量とのカウンターバランスをとることも可能であり、

ロボットを製作する上で非常に有効である。

一方、拮抗腱が働くことによりトルクの相殺が生ずることや、腱が冗長であるために、与えられた関節トルクに対する腱張力を求める際に何らかの規範^{26),27)}を設ける必要があり、その手順がやや複雑になる欠点もある。また腱制御機構では機構部の自由度より1個以上多くのアクチュエータが必要であり、不経済である。アクチュエータの数が多ければ多いほど腱の冗長性が高くなり、調節可能な力学的特性は増えるわけであるが、先の腱張力を求める手順の複雑さに伴う計算量の増加と、この冗長分のアクチュエータの経済性を考慮してアクチュエータの数を決定する必要がある。

さらに、環境との接触時にアクチュエータの応答が外力に対して遅れた場合や、アクチュエータ間の動特性の差異によってアクチュエータの協調が崩れた場合には、ワイヤが緩んだりワイヤ張力が急激に上昇してしまい制御性能が低下する²⁸⁾。そのため、外力が作用した際に不必要な振動が発生したり、低い機械的剛性で外力へ順応する事が困難となる等の問題が起こる。

以上のことをまとめると、次のようになる。

a) 利点

- 1) 剛性が可変である。(腱の非線形弾性が前提)
- 2) バックラッシュ及びヒステリシスを取り除ける。
- 3) アクチュエータの配置の融通性が高い。

b) 欠点及び問題点

- 1) トルクの相殺が起こる。
- 2) 機構部の自由度より多くのアクチュエータが必要である。
- 3) 腱張力の算出が複雑となる。
- 4) 拮抗張力の上昇、腱の緩みによる不安定動作が生じる可能性がある。

腱制御機構は前述のように、関節の数よりも1個以上多くのアクチュエータがあれば腱張力を正に保ったままで関節を動作させることが可能である(数学的な理由については第3章を参照)。腱制御機構はアクチュエータの冗長度に応じて幾つかのタイプに分類できる。次に挙げる3つタイプが代表的である。第1のタイプは**Fig. 1-3 (a)**のように駆動冗長性が1であるもの²⁹⁾、すなわち関節の数より1個だけ多いアクチュエータによって駆動されるものである。関節数を N とすれば、アクチュエータの数が $N+1$ となることから $N+1$ タイプと呼ばれている。このタイプの腱制御機構は冗長なアクチュエータの個数が1であるため、コスト的には経済的な機構であると言える。しかし、ある特定の関節部の動作に対しては、1つのアクチュエータに負荷が集中するという問題を含んでいる。第2のタイプは冗長なアクチュエータの数が関節の数と同じもの³⁰⁾、つまりアクチュエータの数が $2N$ であるタイプである(**Fig. 1-3 (b)**参照)。 $2N$ タイプの腱制御機構では N 個の機構パラメータを調整することが出来る。但し、関節部の機械的剛性を独立に任意の値に設定出来るわけでは無いことを注意しておく。また、 $2N$ 個のアクチュエータが必要となるので製作コストが高む。関節部の機構パラメータ調整の自由度を高めるには、更に多くのアクチュエータを用意する必要がある。これが第3のタイプで人間型腱制御機構である。2自由度のマニピュレータを例にとって考えると、関節空間での剛性行列は 2×2 となる。剛性行列が対称であるので調整すべきパラメータの数は3個となる。従って5($=2+3$)個のアクチュエータを**Fig. 1-3 (c)**のように配置すれば、それら3つの機構パラメータを調節することが可能となる。人間型腱制御機構では調整出来る機構特性が増え、作業を行う際の制御戦略の選択の幅が広がるが、その反面膨大な数のアクチュエータが必要となる。例えば、7自由度マニピュレータにおいて剛性行列のすべての要素を調整するには35個のアクチュエータが必要となる。

これまでも腱制御をロボットに応用した例は、関節指ハンドをはじめ幾つかあるが

^{31),32),33)}, 前述のように腱制御機構では常に正の腱張力を用いて目的運動を達成しなければならないという、枷をはめられている。しかし、正の腱張力のみで任意の関節トルクを構成可能である可動範囲についての考察は、これまであまりなされてこなかった。その理由として、関節指ハンドにおける腱張力と関節トルクの関係の線形性が挙げられる。それに対して、関節変位により腱空間と関節空間との間の写像が変化する場合には、明確な形で可動範囲を把握する必要があると思われる（第3章において解析を行う）。

また、拮抗張力の上昇や腱の緩みによる不安定動作に対しては、各々の張力制御系にソフト的に適当なインピーダンスを設定する方法が提案された³⁴⁾。しかし、より急激な動作に対応するためにはアクチュエータの応答遅れを機械的に補う機構が必要である。そこで、本論文で取り扱う腱制御機構では、Fig.1-4に示すように駆動力の伝達経路の各々に、非線形バネ要素(Nonlinear Spring Tensioner : NST)を挿入することにより、ワイヤの緩みや拮抗張力の上昇を防ぐ。さらに、急激な動作に対するアクチュエータの応答遅れをNSTにより機構的に補っているので、従来の腱制御機構に比して低い関節剛性を実現できるという利点を持つ³⁵⁾。

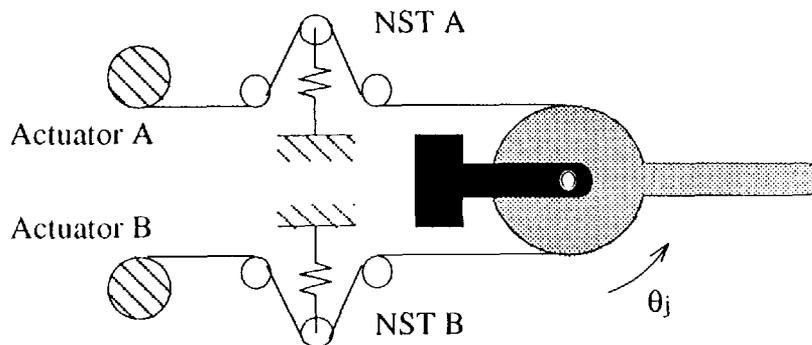


Fig. 1-4 Tendon-controlled manipulator with NST

このように可変弾性要素を導入することにより腱制御機構の持つ駆動冗長性をより有効に利用することができる。この非線形バネ要素を導入することによる利点については

第2章で詳しく述べる。また、可変弾性要素を有する腱制御機構に適した制御系については第4章において提案する。

1.4 本論文の構成

本論文は、2つの部分から構成されている。第1部では腱制御機構の基本的な特性についての解析を行い、第2部では腱制御機構を使用した協調制御について述べる。

第1部は第2章から第4章から構成されており、まず第2章においては、腱制御機構の解析を行う際の基礎となる作業空間、関節空間と腱空間との関係などの基礎式を導出し、腱空間における剛性と関節空間での剛性及び作業空間でのコンプライアンスとの関係について述べる。本論文で取り扱う機構の特徴の1つであるNSTの定式化を行った後に、剛性調整変数のパラメータ化を行う。

次に第3章では、腱制御機構の機構特性について述べる。機構特性の評価を、正の腱張力によって任意の関節トルクが発生可能である可動範囲、及び腱による関節トルクの可操作性の2面から行い、腱制御機構の設計の指針を示す。

第4章では、非線形バネ要素(NST)を持つ腱制御機構の制御について述べる。まず、関節部の目標運動と目標剛性が与えられた時の腱張力の算出法を述べる。次に、駆動冗長性と可変弾性要素を持つ機構を制御するのに適した制御系を提案する。まず、非線形要素(NST)を含んだ張力制御系の安定解析をした後に、全体の制御系の構成について述べる。

第2部は第5章と第6章から構成されており、まず、第5章において小型腱制御アーム（マイクロアーム）と産業用ロボット（マクロアーム）の協調制御を行うための制御法を提案する。腱制御機構では関節部を小型化するのが容易であるので、通常の産業用ロボットの先端に搭載可能なサイズにアームをまとめることができる。小型（慣性が小さい）で機械的剛性が調整できる機構を産業用ロボットに装着することにより、系全体としての運動性能が改善できる。ただし、素速い動作が可能であるが可動範囲の狭い腱制

御マイクロアームと、可動範囲は広いが動作速度に制限のあるマクロアームの両者の特性を上手く引き出すための制御系を構成する必要がある。そこで本章では、マイクロアームとマクロアーム動作を、各々の物理的特性に見合った周波数帯で行えるように分離するための制御系を提案する。

第6章では、7自由度腱制御アームの制御について述べる。本章で対象とする腱制御アームは、肩部に3自由度、肘部に1自由度、手首部に3自由度の計7自由度を有するロボットアームであり、人間の腕とほぼ同じ形態およびサイズとなっている。7つの関節は10個のアクチュエータによって駆動される構造を採り、3つの剛性要素が調節可能となっている。この腱制御アームに対し、第1部において述べた理論の拡張を行い、実験によって本アームの有効性を示す。

最後に第7章で、本論文全体の結言を述べる。

第 1 部

腱制御機構の基礎解析

第2章 腱制御機構の運動学

第3章 腱制御機構の機構特性評価

第4章 腱制御機構の制御

第1部では腱制御機構の基礎解析として、腱制御機構の解析，制御をする上での基礎式の導出（第2章），腱制御機構の機構特性の評価及び設計の指針（第3章），関節部の運動と機械的剛性の制御を行うための制御系の構造（第4章）について述べる。

第 2 章

腱制御機構の運動学

2.1 はじめに

本章では、今後の解析を行う上での基礎式の導出を行う。まず2.2節において腱制御機構における関節空間と腱空間の関係性を導出し、腱空間における剛性を調整することにより、関節空間での剛性及び作業空間でのコンプライアンスを調整できることを示す。次に2.3節において非線形バネ要素(*NST*)の定式化を行い、機械的な剛性調整が可能であることを示す。最後に2.4節で、*NST*を使用して関節剛性を調整を行うのに適した変数の導入し、その調整可能な範囲の定式化を行う。

2.2 作業, 関節, 腱空間

腱制御機構の運動を制御するためには作業空間、関節空間及び腱空間における位置変数、力・トルク変数間の関係が必要である。本論文では各空間の次元を k 、 n 及び m とし、各変数を以下のように定義する。

作業空間：位置 $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)'$

力・トルク $\boldsymbol{w} = (w_1, w_2, \dots, w_k)'$

関節空間：位置 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)'$

トルク $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)'$

腱空間：腱長 $\boldsymbol{l} = (l_1, l_2, \dots, l_m)'$ (但し伸張方向を正とする)

$$\text{張力} \quad \mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_m)' \quad (\text{但し引張り方向を正とする})$$

従来のロボットでは、腱制御機構の腱空間に対応するものとしてアクチュエータの状態量の空間があるわけであるが、この場合アクチュエータが関節に対して冗長でないために、これまで問題とされることは少なかった。

作業変位ベクトル \mathbf{x} と関節変位ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ との間に次式の関係がある時に

$$\mathbf{x} = (\zeta_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \zeta_2(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \dots, \zeta_k(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n))' = \boldsymbol{\zeta}(\boldsymbol{\theta}) \quad (2-1)$$

それぞれの微小変位 $\delta\mathbf{x}$ と $\delta\boldsymbol{\theta}$ の間には以下の関係が成立する。

$$\delta\mathbf{x} = \mathbf{J}_m(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \delta\boldsymbol{\theta} \quad (2-2)$$

ここで、 $\mathbf{J}_m(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ はマニピュレータのヤコビ行列と呼ばれ次式で定義される³⁶⁾。

$$\mathbf{J}_m = \begin{bmatrix} \frac{\partial \zeta_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \zeta_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \zeta_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \zeta_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \zeta_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \zeta_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \zeta_k}{\partial x_1} & \frac{\partial \zeta_k}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \zeta_k}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

また、作業空間における力・トルクベクトル \mathbf{w} と関節空間トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ との間には、仮想仕事の原理から³⁷⁾

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_m' \mathbf{w} \quad (2-4)$$

なる関係が成り立つ。以上の議論を腱空間と関節空間の間に適用すると以下のようになる。まず、腱長ベクトル \mathbf{l} が関節変位ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ によって

$$\mathbf{l} = (\eta_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \eta_2(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \dots, \eta_m(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n))' = \boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\theta}) \quad (2-5)$$

と表わされるとき、腱長の微小変位 $\delta\mathbf{l}$ と関節は微小変位 $\delta\boldsymbol{\theta}$ との間の関係は

$$\delta l = J_f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \delta \theta \quad (2-6)$$

と表わされる。ここで、 $J_f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ は

$$J_f = \begin{bmatrix} \frac{\partial \eta_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \eta_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \eta_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \eta_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \eta_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \eta_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \eta_m}{\partial x_1} & \frac{\partial \eta_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \eta_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

で定義される腱制御機構のヤコビ行列である。以下では述語の混同を避けるため、単にヤコビ行列と書く場合は先のマニピュレータのヤコビ行列を指すものとし、(2-6)の意味でのヤコビ行列を指す場合には腱制御機構のヤコビ行列と明記する。一方、関節トルクベクトル τ と腱張力ベクトル f には

$$\tau = -J_f^T f \quad (2-8)$$

なる関係が成立する。上式の負符号は腱長と腱張力の方向が逆向きに定義されていることによる。

以下ではこれらの変数間の関係を使用して、腱空間において設定した剛性が関節空間及び作業空間においてどのような効果を持つのかを明らかにする。まず、腱空間における剛性行列を K_m と設定したとすると、腱張力ベクトル f は腱長の微小変位ベクトル δl と剛性 K_m によって

$$f = -K_m \delta l \quad (2-9)$$

と表される。(2-6)、(2-8)式によって、関節空間においては

$$\tau = J_f^T K_m J_f \delta \theta \quad (2-10)$$

となり、 $J_f^T K_m J_f$ が関節空間での剛性行列を与える。また、(2-2)、(2-4)式を使用すると

作業空間における力・トルクベクトル \mathbf{w} と微小変位ベクトル $\delta\mathbf{x}$ の関係式が得られる.

$$\delta\mathbf{x} = \mathbf{J}_m (\mathbf{J}_f^t \mathbf{K}_m \mathbf{J}_f)^{-1} \mathbf{J}_m^t \mathbf{w} \quad (2-11)$$

上式での、 $\mathbf{J}_m (\mathbf{J}_f^t \mathbf{K}_m \mathbf{J}_f)^{-1} \mathbf{J}_m^t$ が作業空間におけるコンプライアンス行列を与える. これら
 のことから、腱制御機構では腱空間における剛性行列 \mathbf{K}_m を調整することにより、関節空
 間での剛性行列及び作業空間でのコンプライアンス行列を調整することが出来ることが
 わかる. 次節では、 \mathbf{K}_m を機械的に調整するために導入した非線形バネ要素(NST)の定式
 化を行う.

2.3 非線形バネ要素(NST)

本節では、本論文で取り扱う機構の特徴の1つである非線形バネ要素 (NST) の定式化
 を行う. Fig.2-1に示すように、NSTでは腱張力 f により線形バネによって支持されたプー
 リBが変位し、力の三角形 A-B-C が変形する. これによって非線形なバネ特性を作り出
 している.

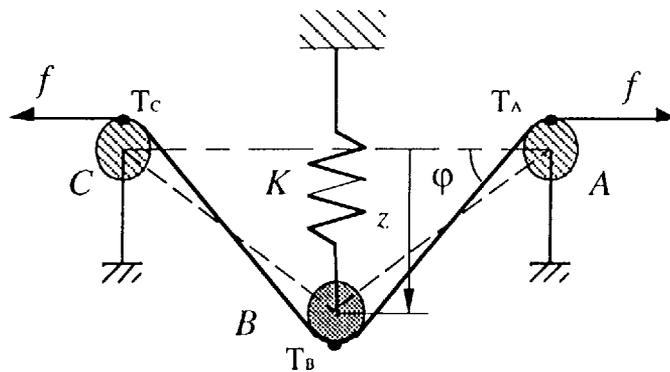


Fig. 2-1 Mechanism of NST

プーリBとプーリAとの鉛直方向の距離が z である時に腱の角度が ϕ であるとすると、
 腱張力 f は次式のように

$$f = \frac{K(S_b - z)}{2 \sin \varphi} \quad (2-12)$$

となる。ここで S_b はバネが自然長の時のプーリA,B の鉛直距離であり、 K はバネ定数である。一方 $\sin \varphi$ と z との間には

$$\frac{z^2}{(S_a - \frac{2r_p}{\sin \varphi})^2 + z^2} = \sin^2 \varphi \quad (2-13)$$

なる関係があるので、 $\sin \varphi$ は次の2次方程式の解となる。ここで、 S_a はプーリA,B の水平距離であり、 r_p はプーリの半径である。

$$(z^2 + S_a^2) \sin^2 \varphi - 4 S_a r_p \sin \varphi + 4 r_p^2 - z^2 = 0 \quad (2-14)$$

本機構で使用しているNSTの場合 $0 < \sin \varphi < \frac{2 S_a r_p + S_b \sqrt{S_a^2 + S_b^2 - 4 r_p^2}}{S_a^2 + S_b^2}$ であるので、

$$\sin \varphi = \frac{2 S_a r_p + z \sqrt{S_a^2 + z^2 - 4 r_p^2}}{S_a^2 + z^2}$$

となる。また腱の弾性係数を E_w とすれば、 $T_A - T_c$ 間の腱長の変化量 z_w は

$$z_w = z_{NST} + \frac{f}{E_w} \quad (2-15)$$

$$z_{NST} = 2(L_0 - \sqrt{S_a^2 + z^2 - 4 r_p^2} - 2 r_p \varphi) \quad (2-16)$$

となる。ここで、 z_{NST} は z によるNST内部の腱長の幾何学的変化量であり、 L_0 は腱張力が零の時のNST内の腱長を示す。従って、NSTの見かけ上の剛性を E_{NST} (腱長の変化量 z_w に対する腱長力 f の変化率) おくと、腱張力 f と腱長の変化量 z_w の微小変位の間には

$$\delta f = E_{NST} \delta z_w$$

が成り立ち、NSTの見かけ上の剛性 E_{NST} は以下のように

$$E_{NST} = \frac{\partial f}{\partial z} \left(\frac{\partial z_w}{\partial z} \right)^{-1} = \frac{\partial f}{\partial z} \left(\frac{\partial z_{NST}}{\partial z} - \frac{1}{E_w} \frac{\partial f}{\partial z} \right)^{-1} \quad (2-17)$$

と表される。よって、 z によってNSTの見かけ上の剛性 E_{NST} を調整できることがわかる。

Fig. 2-2 に基準点の腱張力 \hat{f} と E_{NST} の関係を示す。同図に示すように、NSTは基準点の腱張力 \hat{f} によってその剛性を調整することが可能である。また、冗長なアクチュエー

タによって駆動される腱制御機構では関節トルクを変動させることなく基準点の腱張力 \hat{f} を変化できるので、NSTの持つ可変弾性特性を機構部の機械的剛性調整に利用することが可能となる。

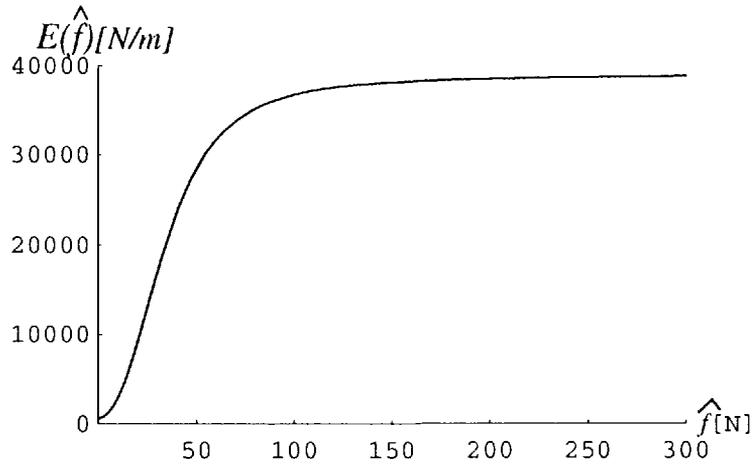


Fig. 2-2 Adjustable stiffness performance

以下では、NST の非線形なバネ特性と腱制御機構の持つ駆動冗長性を利用して機械的剛性の調整が行えることを、Fig.2-3の腱制御機構を例にとって説明する。

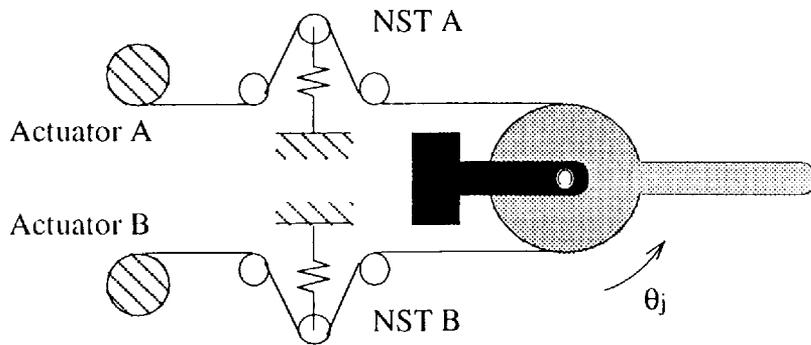


Fig. 2-3 1D.O.F Tendon-controlled manipulator

Fig.2-3の腱制御機構における腱張力と関節トルクの関係式は、関節部のモーメントアームが R であるとする、

$$\tau = [R \quad -R] \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \end{bmatrix}$$

と書ける。本機構では、冗長なアクチュエータが存在するため、関節変位に対する解(腱張力)が無数に存在する不定問題となっている。従って、関節トルクを生じないような腱張力の組(以後バイアス張力と呼ぶ)が存在する。つまり、 $f_A = f_B$ となるような腱張力の組に対しては関節トルクが零となる。Fig.2-3 の腱制御機構において平衡点 ($f_A = f_B$ を満たしている状態) から関節が $\delta\theta$ だけ変位した場合の腱張力の変化をFig.2-4 に示す。図中の f_{A_i} , f_{B_i} はそれぞれ屈曲側(腱A), 伸張側(腱B)の腱張力を示している。Fig.2-4の(f_{A_i} , f_{B_i})の組($i=1,2$)は、それぞれバイアス張力を低く設定した場合と高く設定した場合の、関節変位に対する腱張力を示している。非線形バネ特性を持つNSTを使用することにより、バイアス張力を大きくする程、関節が変位した時の回復トルクが大きくなり関節剛性を高くすることができる。

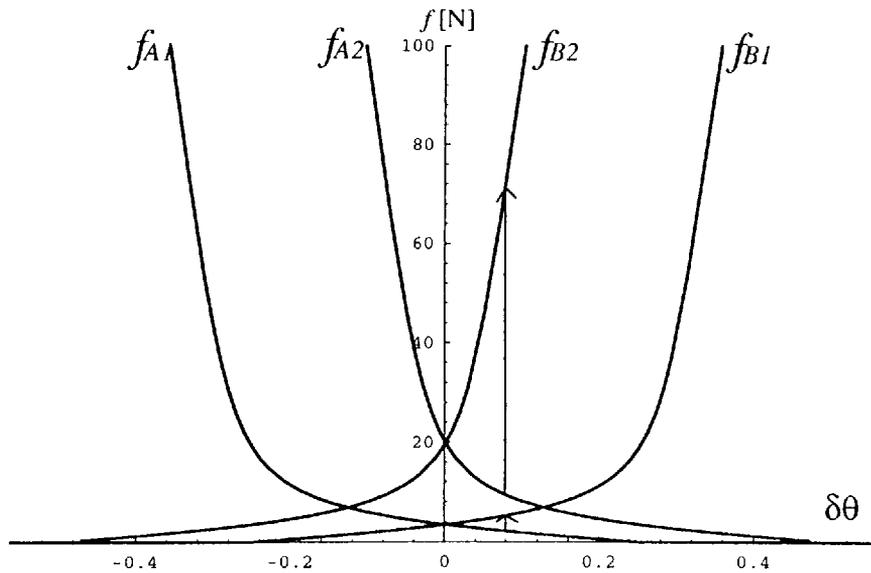


Fig. 2-4 Redundancy of Inverse Statics

関節トルクは2本の張力の差によって生じているので、この関節剛性の調整動作は平衡点の移動とは独立に行うことが出来る。次節では、このバイアス張力による剛性の調整を行うのに適した変数の導入を行う。

2.4 剛性調整変数の構成

前節ではバイアス張力により機械的剛性を調整できることを述べた。バイアス張力は関節トルクを発生させないような腱張力の組であるので、腱制御機構のヤコビ行列の零化空間内のベクトルの線形結合によって作り出すことができるような腱張力ベクトルであるはずである。駆動冗長性を関節剛性を調整することに使用するときには、剛性行列の要素と直接結びつくような形でバイアス張力が構成できれば制御系を構成する上での見通しがよくなる。そこで本節では、バイアス張力による剛性調整に適した零化空間ベクトルの選択をする事により剛性調整変数の構成を行う。

今、それぞれの NST の剛性 E_i ($i = 1, 2, \dots, m$) が腱 i の張力 f_i に比例するような領域、つまり $E_i = \alpha f_i$ と表されるような領域で剛性の調整を行うことを考える。(2-10) 式より関節部の剛性行列 \mathbf{K}_j は

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{J}_f' \mathbf{K}_m \mathbf{J}_f$$

で与えられる。ここで、 $\mathbf{K}_m = \text{diag}\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ である。腱制御機構の駆動冗長性を使用すると、 \mathbf{K}_j の $n(n+1)/2$ 個の要素のうち $m-n$ 個の要素が調整可能となる。そこで、 \mathbf{K}_j の要素の中から調整を行う $m-n$ 個の要素を選び、 $\mathbf{E} = (E_1, E_2, \dots, E_m)'$ に対して以下のように表すことができるとする。

$$\begin{aligned} k_1 &= \mathbf{h}_1' \mathbf{E} \\ k_2 &= \mathbf{h}_2' \mathbf{E} \\ &\vdots \\ k_{m-n} &= \mathbf{h}_{m-n}' \mathbf{E} \end{aligned} \quad (2-18)$$

ただし $[\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_{m-n}]$ はフルランクとする。今、 $E_i = \alpha f_i$ であるので、 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_{m-n})'$ は

$$k = Hf \quad (2-19)$$

となる。ここで、 $H = [\alpha h_1, \alpha h_2, \dots, \alpha h_{m-n}]'$ である。バイアス張力によって剛性を調整するのであるから、関節トルクを発生させない腱張力 f は(2-8)より、 J_f' の疑似逆行列 $J_f(J_f'J_f')^{-1}$ を J_f^+ とすれば

$$f = (I_m - J_f^+J_f')\xi$$

で示される³⁸⁾。ここで、 ξ は m 次元の任意のベクトルである。 $N' = H(I_m - J_f^+J_f')$ とし、 ξ を N' の疑似逆行列 $N(N'N')^{-1} = N^+$ を使用して $\xi = N^+s$ とすれば、

$$k = H(I_m - J_f^+J_f')\xi = N'\xi = N'N^+s = s \quad (2-20)$$

とでき、 s が剛性調整のために適切な変数であることがわかる。これは、元来 m 次元のベクトルである ξ を剛性調整に必要なかつ十分な次元な $m-n$ 次元ベクトル s で座標付けした効果を持つ。また、 N の全ての列は $-J_f'$ の零化空間ベクトル ($(I_m - J_f^+J_f')$ の列ベクトル)の線形結合によって作られているので、 N もまた $-J_f'$ の零化空間ベクトルから構成される。つまり $-J_f'N = 0$ である。ここで

$$N'f = N'(I_m - J_f^+J_f')N^+s = (N' - 0)N^+s = s \quad (2-21)$$

であるので、腱制御機構の拡張ヤコビ行列を

$$\begin{bmatrix} \tau \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_f' \\ N' \end{bmatrix} f \quad (2-22)$$

で定義する。また、

$$\begin{bmatrix} -J_f' \\ N' \end{bmatrix}^{-1} = [-J_f^+ \ N^+] \quad (2-23)$$

であるので、関節トルク τ と剛性調整変数 s に対して腱張力 f は

$$f = -J_f^+\tau + N^+s \quad (2-24)$$

と表される。ただし、腱制御機構では腱張力 f はその全ての要素が正でなければならないという拘束を受けているので、剛性調整変数 s を全く任意に設定できるわけではないこと

を注意しておく。剛性の目標値と関節部の運動が与えられた時に、腱張力 f の全要素を正にするという拘束によって生ずる剛性変数 s に対する制約については第4章で述べる。

例として、NSTを持つ2自由度の腱制御マニピュレータを使用して、零空間ベクトルの選択法の実例を示す。まず、Fig.2-5で示されるアクチュエータの数が3の場合を考える。

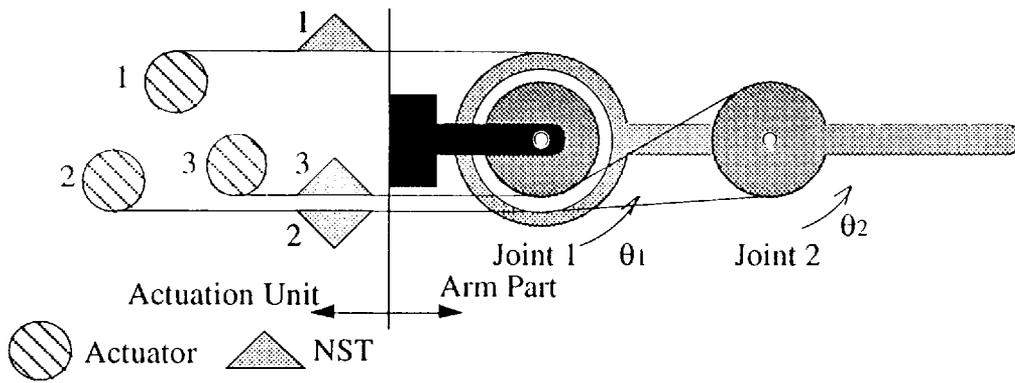


Fig. 2-5 2 D.O.F Tendon-controlled manipulator with 3 Actuator

この機構では腱空間張力と関節トルクの関係は

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = -J_f^* \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

となる。この系では冗長度は1であるので、剛性調節を行うのに適したスカラー変数でパラメータ化する。関節空間での剛性行列は、3個のNSTの剛性をそれぞれ E_1 , E_2 , E_3 とすると

$$\begin{bmatrix} E_1 + E_2 + E_3 & E_2 - E_3 \\ E_2 - E_3 & E_2 + E_3 \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

となる。この剛性行列の(1,1)要素に着目すると、3つのNSTの剛性之和となっているので、

$$n' = (1, 1, 1)(I - J_f^* J_f)$$

となる。なお簡単化のため $\alpha = 1$ とする。 $s = n'f$ を剛性調節のパラメータとし、次式のように腱制御機構の拡張したヤコビ行列を構成する。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_f' \\ \mathbf{n}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

この腱制御機構の拡張ヤコビ行列の逆行列を取り、左から2列と残りの1列に分解する。

$$\begin{bmatrix} -J_f' \\ \mathbf{n}' \end{bmatrix}^{-1} = [\mathbf{B}_1 \ \mathbf{b}_2]$$

上式の \mathbf{B}_1 , \mathbf{b}_2 を使用すれば腱張力は

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \mathbf{B}_1 \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \mathbf{b}_2 s \quad (2-28)$$

となる。関節トルクを変化させずに $\mathbf{b}_2 s$ によって腱張力を操作できる。この場合の $\mathbf{b}_2 s$ は具体的には、 $(s/2, s/4, s/4)'$ となる。 NST の剛性が腱張力に比例するような領域では、関節空間での剛性行列は、

$$\begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s/2 \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

となり、 s が剛性調整を行うのに適したパラメータであることがわかる。

次に、アクチュエータの数が4であるFig. 2-6の場合を考える。

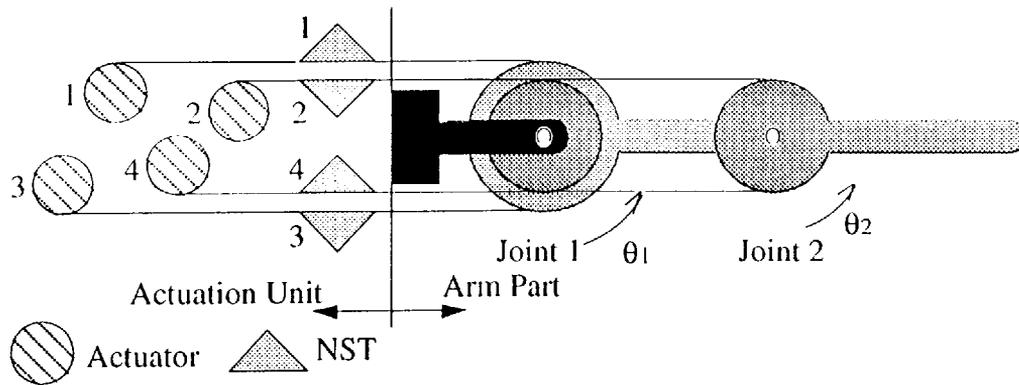


Fig. 2-6 2 D.O.F. Tendon-controlled manipulator with 4 Actuator

次の腱制御機構のヤコビ行列に対し

$$-J_f' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

関節空間での剛性行列は

$$\begin{bmatrix} E_1 + E_2 + E_3 + E_4 & E_2 + E_4 \\ E_2 + E_4 & E_2 + E_4 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

となるので、(1,1)要素と(2,2)要素に着目すると、

$$\mathbf{n}_1' = (1, 1, 1, 1)(I - \mathbf{J}_f^+ \mathbf{J}_f'),$$

$$\mathbf{n}_2' = (0, 1, 0, 1)(I - \mathbf{J}_f^+ \mathbf{J}_f')$$

となる。2つの剛性調整パラメータとして $s_1 = \mathbf{n}_1' \mathbf{f}$, $s_2 = \mathbf{n}_2' \mathbf{f}$ を選択すると、バイアス張力は s_1 と s_2 によって

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 0 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} s_2$$

とパラメータ化される。負の張力は発生できないのでこの場合は $s_1 > s_2$ なる拘束を受けることになる。よってNSTの剛性が張力に比例する範囲においてこの機構では、(2-31)式の剛性行列はパラメータ s_1 , s_2 によって

$$\begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ s_2 & s_2 \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

と調整できることがわかる。冗長度が2であるため剛性行列の要素の内2個の要素を調整することが可能である。

さらに、Fig. 2-7 のように5個のアクチュエータによって駆動される2自由度マニピュレータを考える。

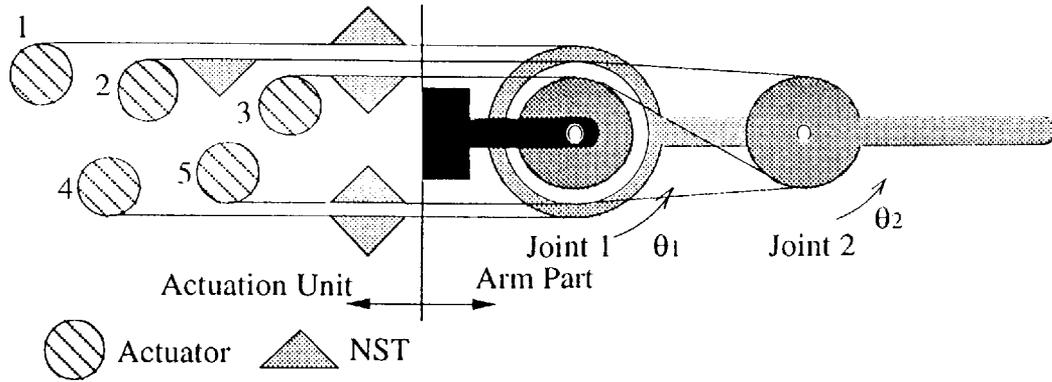


Fig. 2-7 2 D.O.F. Tendon-controlled manipulator with 5 Actuator

この場合,

$$-J_f' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

なる腱制御機構のヤコビ行列に対して、剛性行列が

$$\begin{bmatrix} E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 & E_2 - E_3 + E_5 \\ E_2 - E_3 + E_5 & E_2 + E_3 + E_5 \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

となる。冗長度が3であるので、(2-34)の剛性行列の要素から

$$\mathbf{n}_1' = (1, 1, 1, 1, 1)(I - J_f'^+ J_f'),$$

$$\mathbf{n}_2' = (0, 1, 1, 0, 1)(I - J_f'^+ J_f'),$$

$$\mathbf{n}_3' = (0, 1, -1, 0, 1)(I - J_f'^+ J_f')$$

とすればバイアス張力は

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 2 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} -1 \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} s_2 + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 2 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ 2 \end{bmatrix} s_3 \quad (2-35)$$

とパラメータ化される。この時、剛性パラメータはバイアス張力の5個の要素がそれぞれ

正となるように制約を受ける。この機構の剛性行列は比例域では、

$$\begin{bmatrix} s_1 & s_3 \\ s_3 & s_2 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

となり、3つの冗長性を利用して剛性行列の3個の要素をすべて調整できる。

次に、正の要素のみからなるバイアス張力を構成するという拘束を満たしつつ、剛性制御変数を調整できる範囲について述べる。

調整可能範囲

バイアス張力 f_b は、その全ての要素が正でなければならないので

$$f_b = N^+s \geq 0 \quad (2-37)$$

が成立する範囲において s を設定しなければならない。ここで、 $f_b \geq 0$ は $(f_b)_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$ を意味するものとする。(2-37)式は m 個の不等式の共通領域であり多面錐を形成する^{39),40)}。よって、 s は多面錐 $N^+s \geq 0$ の内部の点でなければならない。この調整可能な s は、多面錐 $N^+s \geq 0$ の有限基底ベクトルを $c_1, c_2, c_3, \dots, c_{m-n}$ としたとき

$$s = \sigma_1 c_1 + \sigma_2 c_2 + \sigma_3 c_3 + \dots + \sigma_{m-n} c_{m-n} \quad (2-38)$$

と表される。ここで、 $\sigma_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m-n$ である。

前記の3つの例に対して調整可能多面錐を求めると以下のようになる。

まず、駆動冗長度が1であるマニピュレータでは、バイアス張力は

$$f_b = (s/2, s/4, s/4)^t \quad (2-39)$$

であるので、調整可能多面錐は半直線

$$s \geq 0 \quad (2-40)$$

となる。

次に、駆動冗長度が2であるマニピュレータでは、バイアス張力は

$$f_b = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 0 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} s_2 \quad (2-41)$$

となる。バイアス張力は負に出来ないので、

$$\begin{aligned} s_1 - s_2 &\geq 0 \\ s_2 &\geq 0 \end{aligned} \quad (2-42)$$

なる拘束を s_1 及び s_2 は受ける。この時、 s_1, s_2 は多面錐の有限基底 $(1,1)$ 、 $(1,0)$ によって、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \sigma_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_1 &\geq 0, \quad \sigma_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (2-43)$$

また、調整可能多面錐はFig. 2-8に示される領域となる。

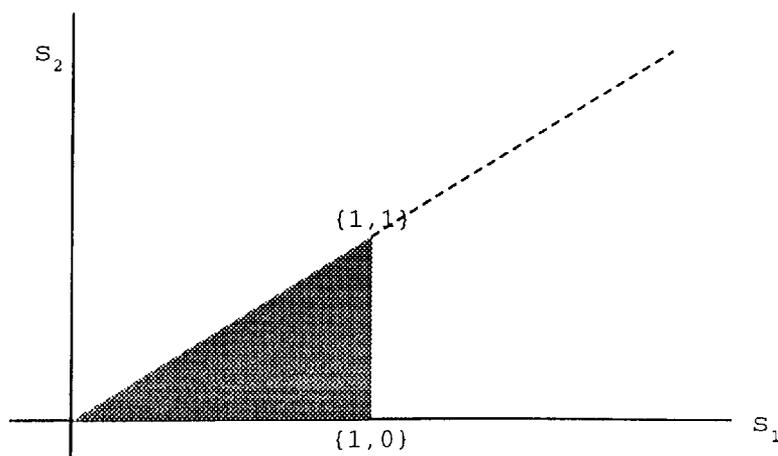


Fig. 2-8 Stiffness adjustable zone

次に、駆動冗長度が3であるマニピュレータでは、バイアス張力は

$$f_b = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} -1 \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} s_2 + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 0 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} s_3 \quad (2-44)$$

となる。バイアス張力は負に出来ないので

$$\begin{aligned} s_1 - 2s_2 + s_3 &\geq 0 \\ s_2 &\geq 0 \\ s_2 + s_3 &\geq 0 \\ s_1 + s_3 &\geq 0 \\ s_3 &\geq 0 \end{aligned} \quad (2-45)$$

なる拘束を s_1 , s_2 及び s_3 は受ける。(2-45)式の5個の条件はFig. 2-9 のようになり、

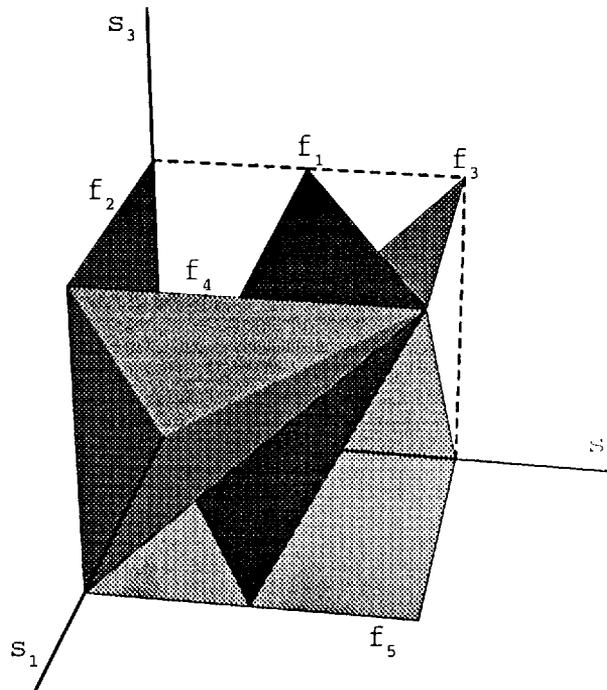


Fig. 2-9 Constrained condition planes

その共通領域はFig. 2-10 のようになる.

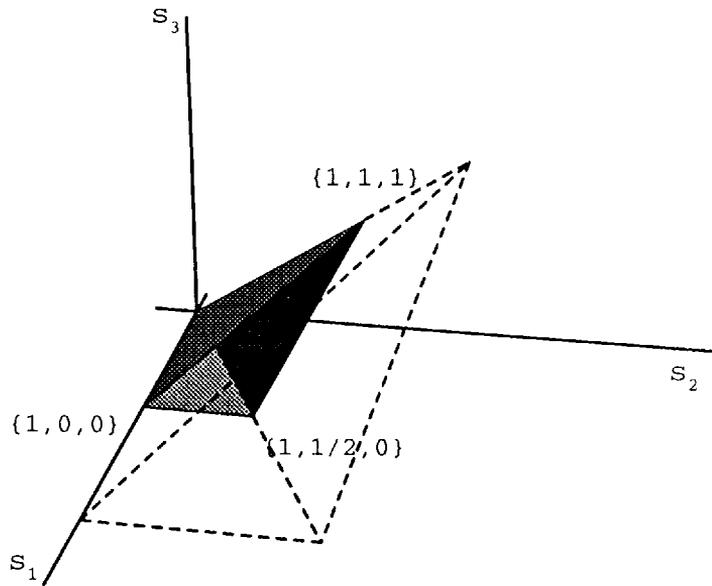


Fig. 2-10 Stiffness adjustable zone

この時, s_1, s_2, s_3 は次式のように表される.

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \sigma_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \sigma_2 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sigma_3$$

$$\sigma_1 \geq 0, \quad \sigma_2 \geq 0, \quad \sigma_3 \geq 0$$

(2-46)

第 3 章

腱制御機構の機構特性評価

3.1 はじめに

序論でも述べたように、腱制御機構の応用範囲の拡張を考えた場合、関節空間から腱空間への写像が関節変数に依存しているような機構も取り扱う必要が生ずる。このような機構に対しては正の腱張力のみによって任意の関節トルクが発生可能であるかの解析が必要である。

本章では、関節空間から腱空間への写像が関節変数に依存しているような腱制御機構の機構特性を、可動範囲及び腱による関節トルクの可操作性の2面から評価し、機構設計の指針を示す。具体的な解析は **Fig. 3-1** のパラレルマニピュレータ型腱制御機構を例にとって行う。以下では、3.2節において解析用モデルの概要を説明した後、3.3節において可動範囲の解析を、3.4節において腱による関節トルクの可操作度の解析を行う。

3.2 解析モデルの概要

本節では、機構特性評価の対象となるパラレルマニピュレータ型腱制御機構の概要を述べる。**Fig. 3-1** のように3つの回転軸が一点で交わる機構は、運動学計算の容易さ及び特異点が作業領域の端 ($\theta_2 = \pm \pi/2$) に位置することから、ロボット機構の構成要素として様々な駆動形態のものが開発研究されて来ている。例えば歯車機構によるもの⁴¹⁾、ダイレクト・ドライブによるもの⁴²⁾、パラレル・マニピュレータ型⁴³⁾⁴⁴⁾のものなどがある。

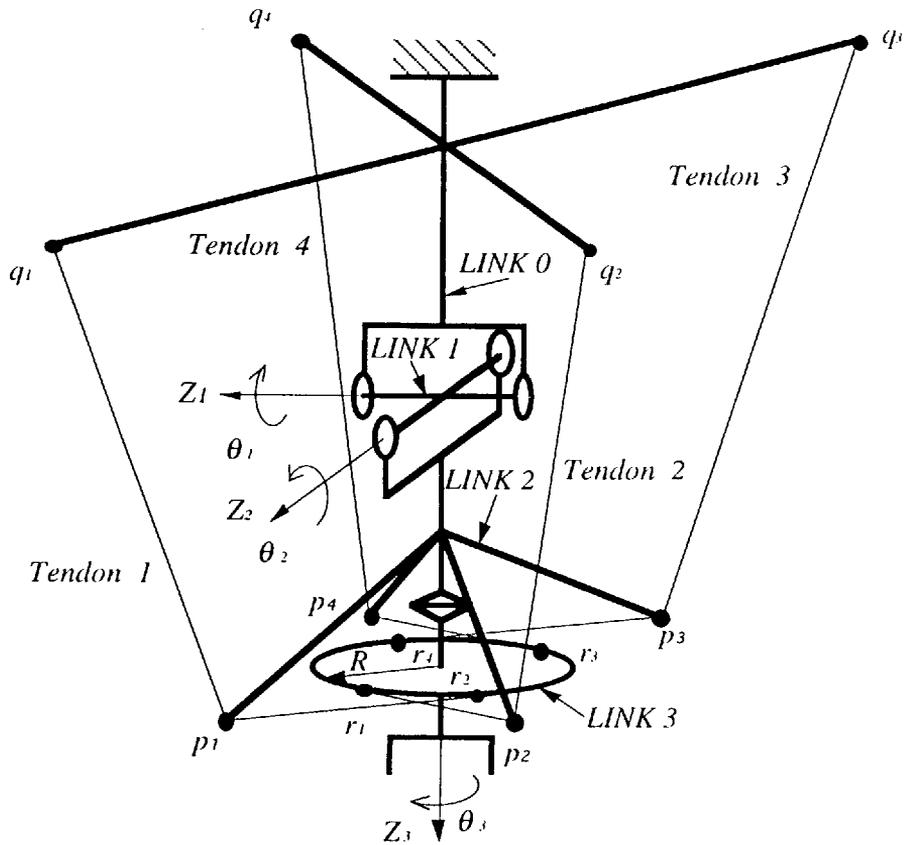


Fig. 3-1 3D.O.F. Model of Tendon-controlled mechanism

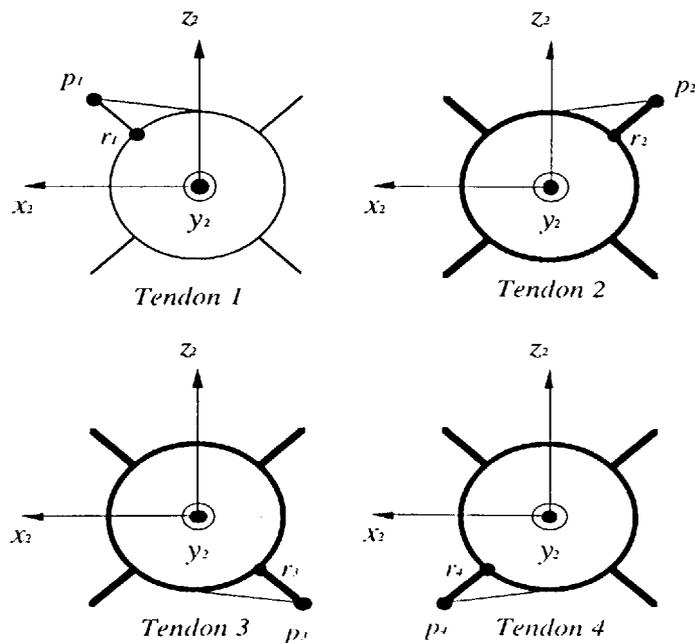


Fig. 3-2 Wiring to Link3

本章で解析するモデルは平行・マニピュレータ型機構の発展型の腱制御機構である。

平行マニピュレータ型腱制御機構は腱の配置の融通性が高く、プーリなどを用いて腱を引き回す機構に比べて、様々な関節配置に対応することができる。しかし、腱空間と関節空間との間の写像が関節変数に依存した構造となる。そのため可動範囲及び可操作度の解析を行い腱の配置を決定する必要がある。

Fig. 3-1 に3自由度平行マニピュレータ型腱制御機構の構造図を示す。本機構は4本の腱（図中の細線）によって z_1 軸、 z_2 軸、 z_2 軸まわりの回転運動を制御する機構である。腱は、それぞれリンク0上の q_i 点を起点とし、リンク2上の p_i 点で支持され、リンク3に巻き付いた後、 r_i 点で固定される（Fig. 3-2 参照）。

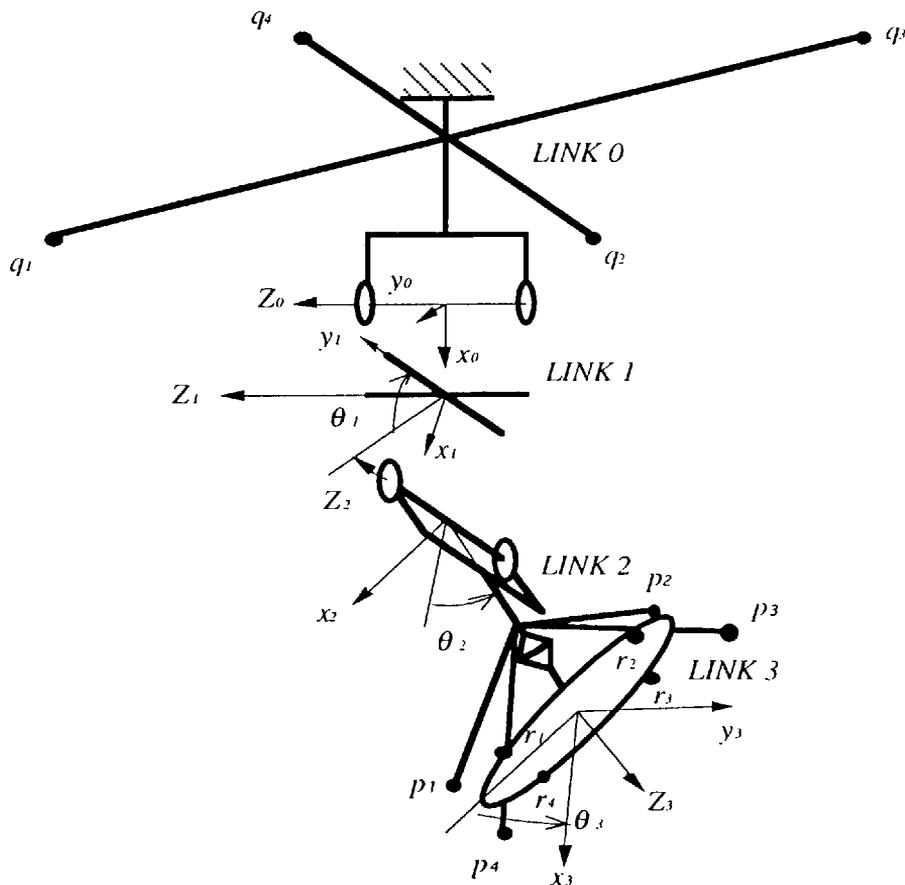


Fig. 3-3 Link coordinate systems

本機構の駆動方法は以下の通りである。

- a) z_1 軸まわりの回転 (θ_1) : 腱 1, 2 を縮め, 腱 3, 4 を伸ばす
- b) z_2 軸まわりの回転 (θ_2) : 腱 2, 3 を縮め, 腱 1, 4 を伸ばす
- c) z_3 軸まわりの回転 (θ_3) : 腱 1, 3 を縮め, 腱 2, 4 を伸ばす

本機構に対してFig. 3-3 に示すように座標系を定める。始点 q_i と終点 r_i との間の腱の長さを l_i とすると

$$l_i = |T\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i| + l_c - R\theta_3 \quad i=1,3 \quad (3-1-a)$$

$$l_i = |T\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i| + l_c + R\theta_3 \quad i=2,4 \quad (3-1-b)$$

で求められる。ここで、 T はFig.3-2における座標系0を基準とした座標系2への同次変換行列であり、 \mathbf{p}_i は座標系2での p_i の位置ベクトル、 \mathbf{q}_i は座標系0での q_i の位置ベクトルであり、 l_c は $\theta_3=0$ の時の $p_i - r_i$ 間のワイヤ長、 R はリンク3の半径である。

本機構における、 T 、 \mathbf{p}_i 、 \mathbf{q}_i は以下の通りである。

$$T = \begin{bmatrix} C_1 S_2 & C_1 C_2 & S_1 & 0 \\ -S_1 S_2 & -S_1 C_2 & C_1 & 0 \\ C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}_1 = (L_3, L_2, L_3, 1)', \quad \mathbf{q}_1 = (-L_1, L_5, L_4, 1)'$$

$$\mathbf{p}_2 = (L_3, L_2, -L_3, 1)', \quad \mathbf{q}_2 = (-L_1, -L_5, L_4, 1)'$$

$$\mathbf{p}_3 = (-L_3, L_2, -L_3, 1)', \quad \mathbf{q}_3 = (-L_1, -L_5, -L_4, 1)'$$

$$\mathbf{p}_4 = (-L_3, L_2, L_3, 1)', \quad \mathbf{q}_4 = (-L_1, L_5, -L_4, 1)'$$

ここで、 C_i, S_i は $\text{Cos}(\theta_i), \text{Sin}(\theta_i)$ である。

3.3 可動範囲

本節では、 $m = n+1$ の場合に対して、全ての腱張力を正に保ったままで任意の関節トルクが発生できる為の条件について述べる。この条件を満足する領域がその機構の可動

範囲となる。ここで、腱制御機構の拡張ヤコビ行列を関節の数と冗長自由度の数の列に分解し次のように書く。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{J}_f' \\ \mathbf{n}' \end{bmatrix} \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{a}_{12} \\ \mathbf{a}_{21}' & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_a \\ f_{m+1} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

この(3-2)に対し、以下の定理が成立する。

<定理>

(3-2)において任意の $\boldsymbol{\tau}$ に対して、 $[\mathbf{A}_{11} \ \mathbf{a}_{12}] \mathbf{f} = \boldsymbol{\tau}$ を満たし $\mathbf{f} \geq \mathbf{0}$ となる \mathbf{f} を構成し得るような $s \geq 0$ が存在するための必要十分条件は \mathbf{A}_{11}^{-1} が存在して、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{a}_{12} \\ \mathbf{a}_{21}' & a_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{b}_{12} \\ \mathbf{b}_{21}' & b_{22} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

としたとき $b_{12} > \mathbf{0}$ $b_{22} > 0$ となることである⁴⁵⁾。□

証明

(i) 十分性

(3-2), (3-3) 式より

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} \\ \mathbf{b}_{21}' \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau} + \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{12} \\ b_{22} \end{bmatrix} s \quad (3-4)$$

となるから、任意の $\boldsymbol{\tau}$ に対して $s(\geq 0)$ を十分大きくとることにより $\mathbf{f} \geq \mathbf{0}$ とできる。

(i) 必要性

今、任意の $\boldsymbol{\tau}$ に対して

$$[\mathbf{A}_{11} \ \mathbf{a}_{12}] \mathbf{f} = \boldsymbol{\tau} \quad (3-5)$$

となるものが存在するとするとすれば、 $[\mathbf{A}_{11} \ \mathbf{a}_{12}]$ はフルランクでなければならない。さらに、 \mathbf{A}_{11} が正則行列であることが次のようにしてわかる。いま \mathbf{A}_{11} が正則でないとなれば

$$b' A_{11} = 0 \quad (3-6)$$

となる $b \neq 0$ が存在する。この時 $[A_{11} \ a_{12}]$ がフルランクであるので $b'a_{12} \neq 0$ でなければならない。よって

$$b'a_{12}f_{n+1} = b'\tau \quad (3-7)$$

となる。ここで、 $\tau = b(b'b)^{-1}b'a_{12}$ とすると、 $f_{n+1} = -1$ となる。これは仮定に反する。従って、 A_{11} は正則行列となり、

$$f_a = A_{11}^{-1}\tau - A_{11}^{-1}a_{12}f_{n+1} \quad (3-8)$$

となる。任意の τ に対して $f \geq 0$ とできるためには、明らかに $-A_{11}^{-1}a_{12} > 0$ でなければならない。

さて、 A_{11} が正則の時拡張ヤコビ行列の逆行列は

$$\begin{bmatrix} A_{11} & a_{12} \\ a_{21}' & a_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} + c_1 \Delta^{-1} c_2' & -c_1 \Delta^{-1} \\ -\Delta^{-1} c_2' & \Delta^{-1} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

で与えられる。ここで、 $\Delta = a_{22} - a_{21}' A_{11}^{-1} a_{12}$ 、 $c_1 = A_{11}^{-1} a_{12}$ 、 $c_2' = a_{21}' A_{11}^{-1}$ である。 $-A_{11}^{-1} a_{12} > 0$ であるので任意の τ に対し $f \geq 0$ とできる $s \geq 0$ が存在するには $\Delta^{-1} \geq 0$ でなければならない。よって、 $b_{12} > 0$ 、 $b_{22} > 0$ となる。

＝証明 終＝

以上の証明より

$$s \geq s^* = \max \left\{ \frac{f_{i1}}{k_{b1}}, \frac{f_{i2}}{k_{b2}}, \dots, \frac{f_{im}}{k_{bm}} \right\}$$

であれば $\tau = -J_i' f$ かつ $f \geq 0$ が成立することがわかる。ここで f_{ii} と k_{bi} はそれぞれ $[B_{11}' \ b_{21}']\tau$ と $[b_{12}' \ b_{22}]'$ の第 i 要素である。

以下では、ワイヤの配置が可動範囲に与える影響を、まず1自由度モデルにおいて解析し、その結果をふまえて3自由度の平行マニピュレータ型腱制御機構において解析する。

3.3.1 1自由度モデルにおける解析

Fig.3-4 に示されるような1自由度の腱制御機構モデルでの解析を行う。

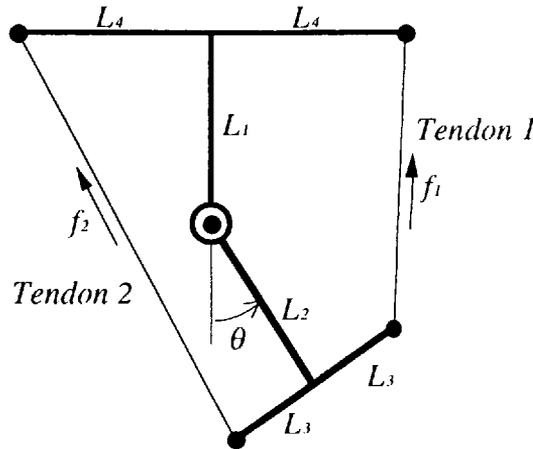


Fig. 3-4 1 D.O.F. Model

この機構では腱長 l_i は

$$l_1 = \sqrt{\alpha C_\theta - \beta S_\theta + \gamma} \quad (3-10-a)$$

$$l_2 = \sqrt{\alpha C_\theta + \beta S_\theta + \gamma} \quad (3-10-b)$$

となる。ここで $\alpha = 2(L_1L_2 - L_3L_4)$, $\beta = 2(L_2L_4 + L_1L_3)$, $\gamma = L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + L_4^2$, $C_\theta = \cos(\theta)$, $S_\theta = \sin(\theta)$ である。この場合の腱制御機構のヤコビ行列 J_f は次のようになる。

$$-J_f' = \begin{bmatrix} \frac{-\alpha S_\theta - \beta C_\theta}{2l_1} & \frac{-\alpha S_\theta + \beta C_\theta}{2l_2} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

また、関節部の剛性は腱 i のNSTの剛性を E_i に対して

$$\frac{(\alpha S_\theta + \beta C_\theta)^2}{4l_1^2} E_1 + \frac{(\alpha S_\theta - \beta C_\theta)^2}{4l_2^2} E_2$$

と表されるので、

$$\mathbf{n}' = \begin{bmatrix} \frac{(\alpha S_\theta + \beta C_\theta)^2}{4l_1^2} & \frac{(\alpha S_\theta - \beta C_\theta)^2}{4l_2^2} \end{bmatrix} (I_2 - J_f' J_f)$$

として、腱制御機構の拡張ヤコビ行列 J_n を構成する。

定理より，任意の τ を発生させるための必要十分条件は J_a^{-1} の2列目の各要素が非負であることなので

$$\frac{l_1^2 l_2^2}{l_1^2(\beta^2 C_\theta^2 - \alpha^2 S_\theta^2) + l_2^2(\beta^2 C_\theta + \alpha^2 S_\theta)^2} > 0 \quad (3-12-a)$$

$$\frac{l_1^2 l_2^2}{l_1^2(\beta^2 C_\theta - \alpha^2 S_\theta)^2 + l_2^2(\beta^2 C_\theta^2 - \alpha^2 S_\theta^2)} > 0 \quad (3-12-b)$$

となる．(3-10)式より

$$\beta(\beta C_\theta + \alpha S_\theta)(\alpha C_\theta^2 + \gamma C_\theta + \alpha S_\theta^2) > 0$$

$$\beta(\beta C_\theta - \alpha S_\theta)(\alpha C_\theta^2 + \gamma C_\theta + \alpha S_\theta^2) > 0$$

となる．従って可動範囲の条件として

$$(\beta C_\theta - \alpha S_\theta)(\beta C_\theta + \alpha S_\theta) > 0 \quad (3-13)$$

を得る．これより

$$C_\theta^2 > \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2} = \frac{(L_1 L_2 - L_3 L_4)^2}{(L_1^2 + L_4^2)(L_2^2 + L_3^2)}$$

を満たす θ に，において任意の関節トルク τ を発生できる．よって，

$$L_1 L_2 = L_3 L_4 \quad (3-14)$$

の時可動範囲が最大となり， $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ で手首機構が駆動可能となる．

3.3.2 3自由度機構における解析

Fig.3-1の本手首機構をFig.3-4の1自由度モデルを組み合わせたものと考え、Fig.3-5に示すように q_i , p_i を配置する.

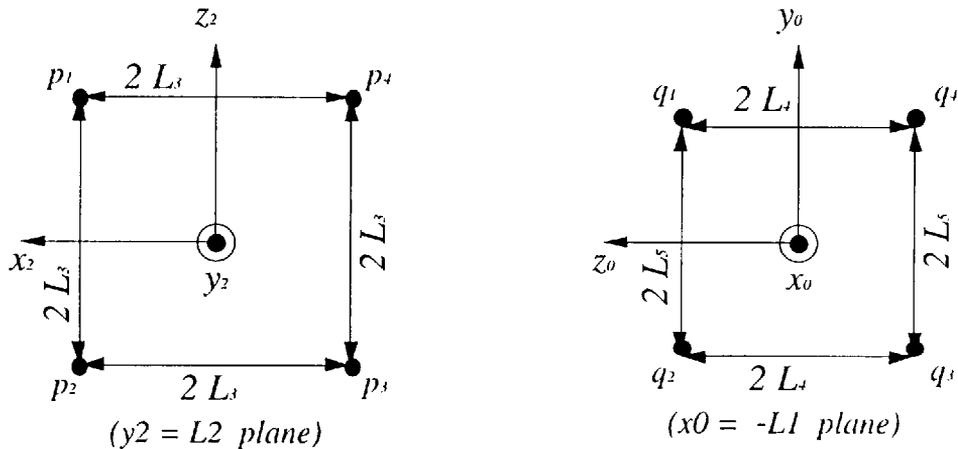
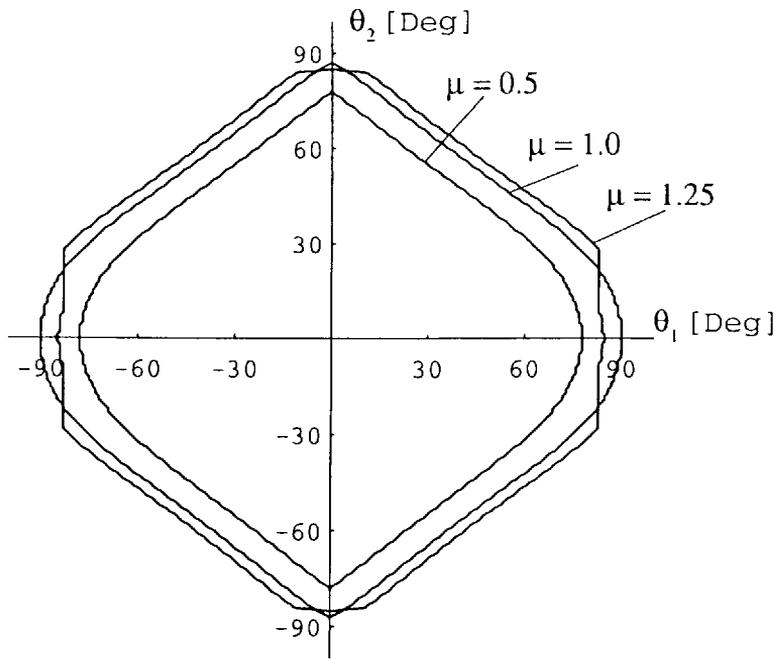


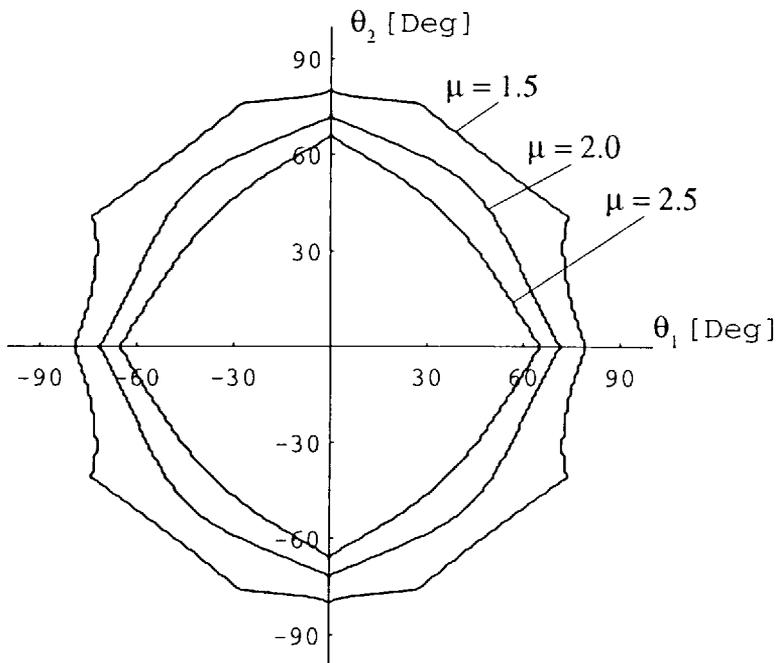
Fig. 3-5 Configuration of p_i , q_i

手首機構等のように等方的な作業領域が要求されるような機構においては $L_4 = L_5$ として機構特性の解析を行う. 以下では, 機構パラメータ $L_1 \sim L_4$ による機構特性を(3-14)式の状態からの偏差 $\mu = \frac{L_1 L_2}{L_3 L_4}$ を用いて評価する.

μ の変化に対する可動範囲の $|\theta_1, \theta_2|$ 空間での形状の変化をFig. 3-6に示す. また, μ に対する可動範囲の面積の変化をFig. 3-7に示す. よって, 可動範囲から見た場合, $1.0 \leq \mu \leq 1.5$ の機構パラメータの組み合わせとするのがよいと考えられる.



(a)



(b)

Fig. 3-6 Accessible joint space Type 1 ($L_5=L_4$)

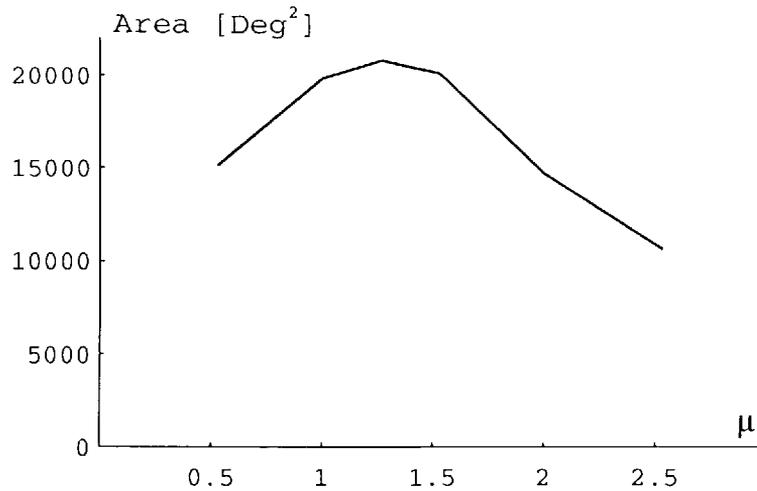
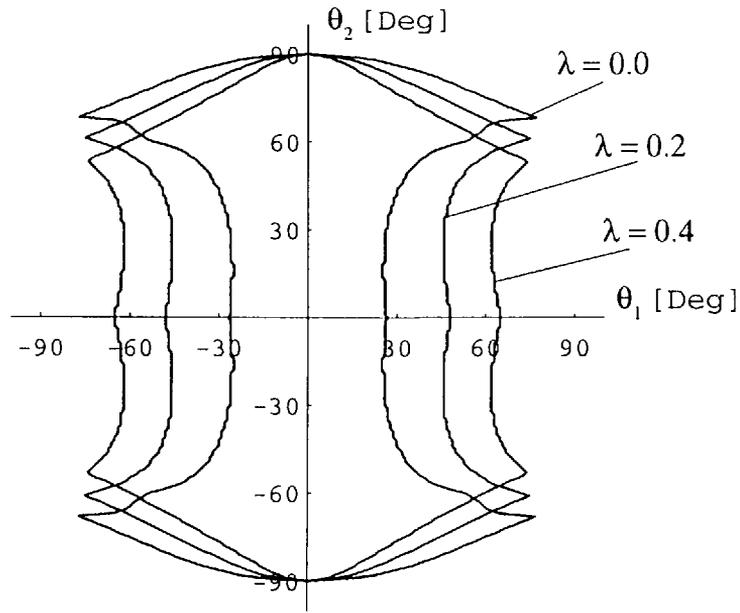


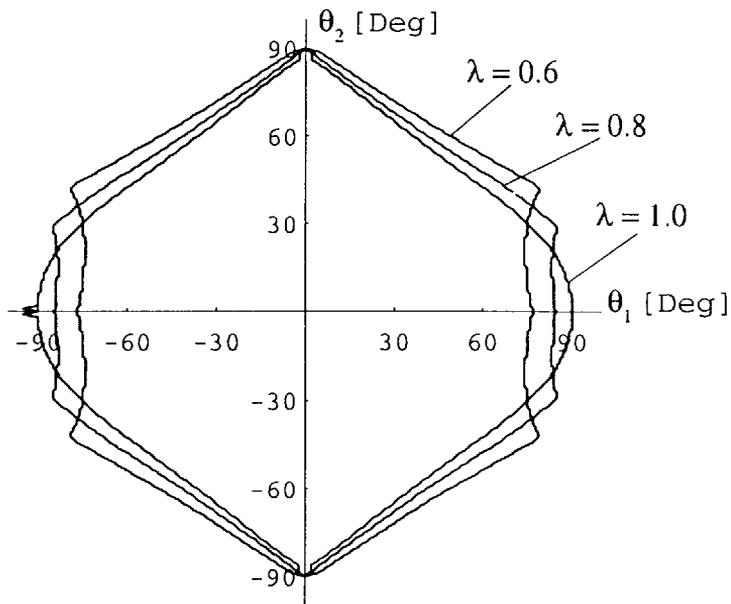
Fig. 3-7 Area of accessible joint space type 1($L_5=L_4$)

以下では、本機構を足首などのように方向性のある作業領域が要求される場合への応用として機構パラメータ L_5 が可動範囲へ与える影響を考察する。機構パラメータ $L_1 \sim L_4$ が $\mu=1.0, 1.25, 1.5$ の状態、 $\lambda = L_5/L_4$ を $0.0 \sim 1.0$ と変化させた場合の可動範囲の形状変化を Fig. 3-8 3-10 に示す。また、面積の変化を Fig. 3-11 に示す。

$\lambda = 0.8$ 付近に設定すれば、 θ_2 に対する可動範囲は狭くなるものの θ_1 の可動範囲を広く取ることが可能となる。更に、面積的にも $L_5=L_4$ の機構から劣化していない。

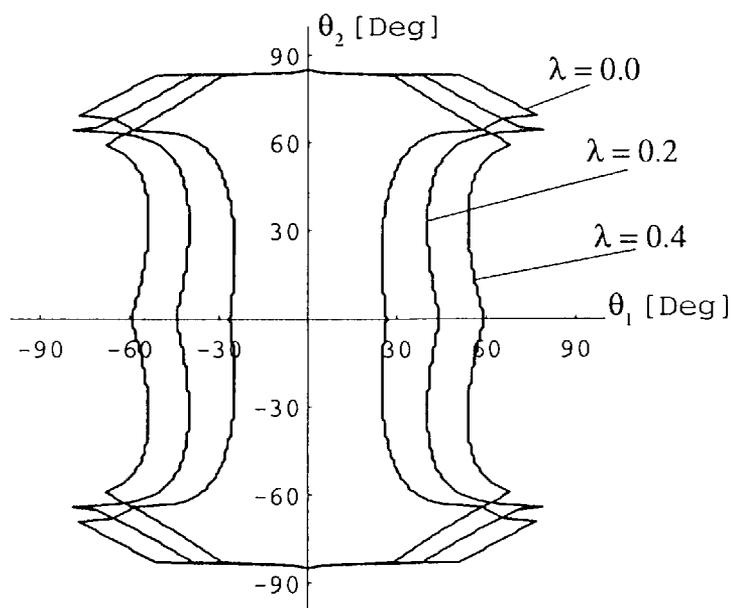


(a)

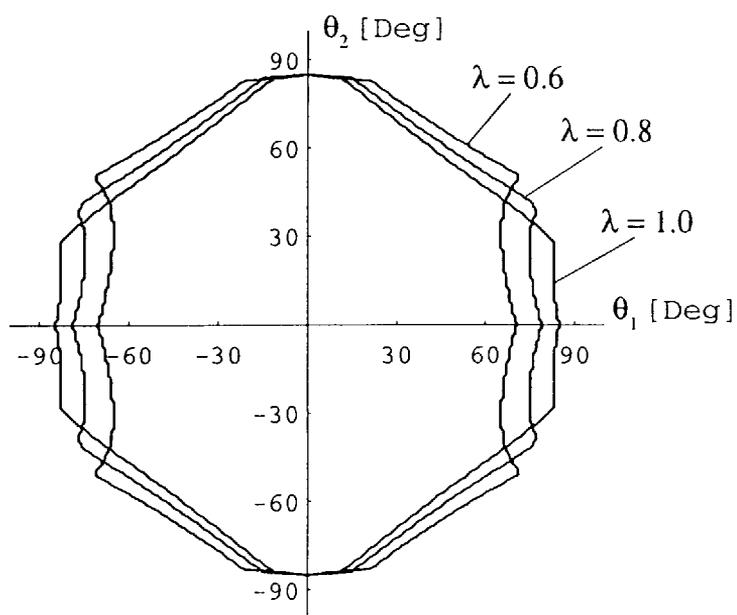


(b)

Fig. 3-8 Accessible joint space Type 1 ($L_3=\lambda L_4$) : case 1 $\mu=1.0$

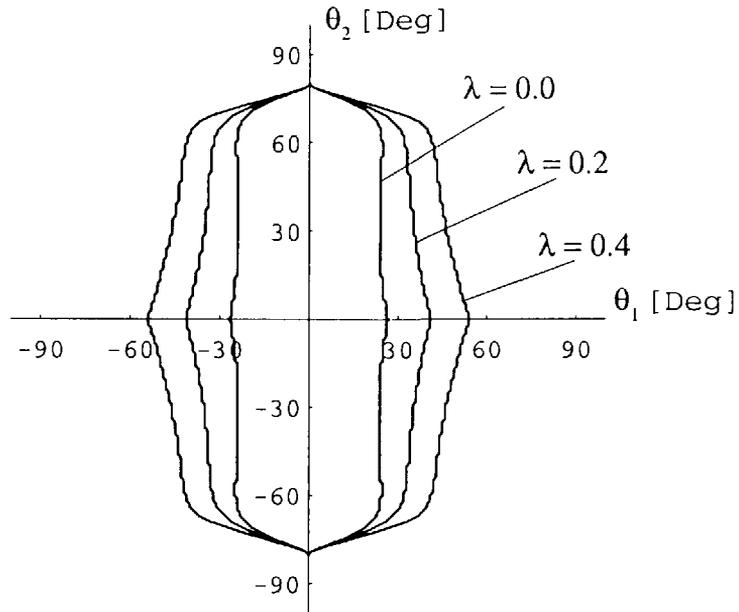


(a)

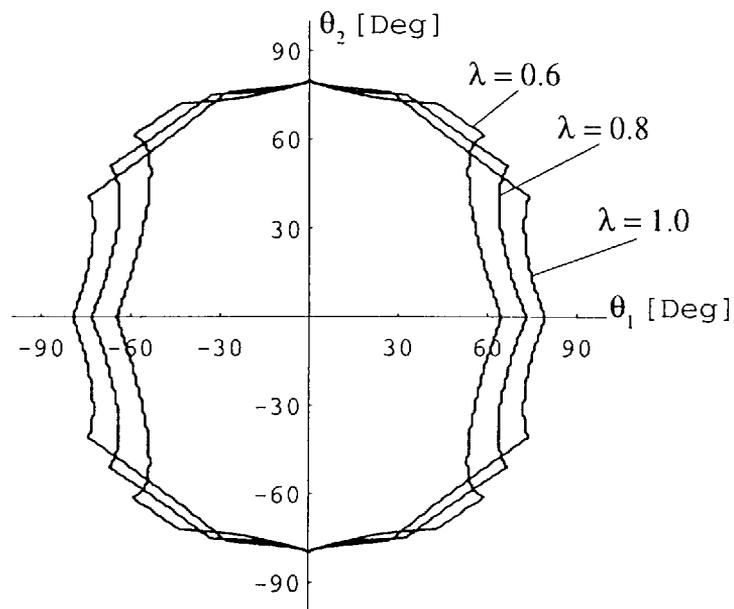


(b)

Fig. 3-9 Accessible joint space Type 1 ($L_5 = \lambda L_4$) : case 2 $\mu = 1.25$



(a)



(b)

Fig. 3-10 Accessible joint space Type 1 ($L_5 = \lambda L_4$) : case 3 $\mu = 1.5$

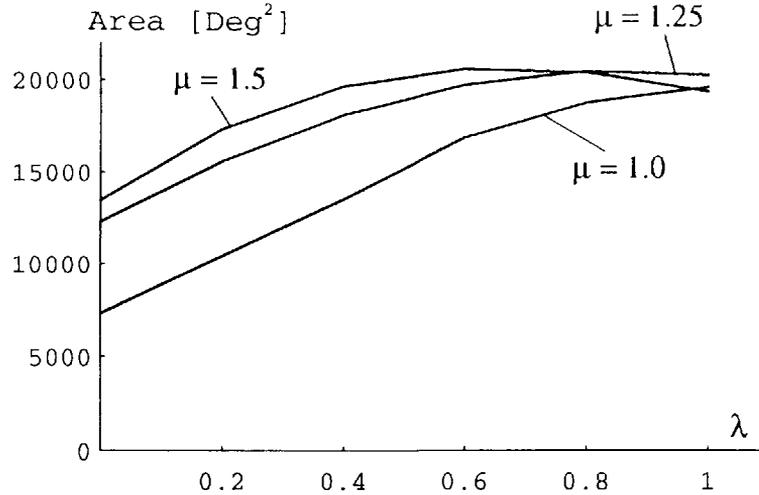


Fig. 3-11 Area of accessible joint space Type 1 ($L_5 = \lambda L_4$)

3.4 可操作性

前節では、可動範囲によって機構特性を評価した。そこで本節では、可動範囲内での腱張力による関節トルクの操作能力の面から機構特性の評価を行う。

腱張力 f と、関節トルク τ の間には (2-8) 式より

$$\tau = -J_f' f$$

の関係が成り立つ。ここで、 $\|f\|^2 \leq 1$ を満たす f を用いて実現できる τ の集合を考えると、 R^n 空間内の楕円体

$$\tau'(J_f^+)J_f^+\tau \leq 1$$

となる⁴⁶⁾。ここで、 J_f^+ はの J_f 疑似逆行列である。この楕円体の体積 V は

$$V = \frac{4\pi}{3}\omega \quad \text{ここで } \omega = \sqrt{\det(J_f J_f')}$$

で与えられる。 ω は可操作性と呼ばれ腱張力 f による関節トルク τ の操作のし易さを表しており、機構パラメータによって決定される⁴⁷⁾。可操作性の面からの機構パラメータの評価に際して、機構パラメータを以下のようにおく。

$$L_1 = \frac{K_2}{K_1} \mu L_s$$

$$L_2 = K_1 L_s$$

$$L_3 = L_s$$

$$L_4 = K_2 L_s$$

すなわち、機構パラメータ間の比 K_1 、 K_2 及び μ が可操作度 $\omega_d = \omega/L_s^3$ へ与える影響を解析し腿制御機構を設計する際の指針を導く。

まず、 $K_1 = 2.0$ とし $\mu = 0.5 \sim 2.5$ 、 $K_2 = 0.75 \sim 1.5$ と変化させたときの、可動範囲内における可操作度の平均を Fig. 3-12、標準偏差を Fig. 3-13 に、 $\omega_d \geq 4$ を満たすような $|\theta_1, \theta_2|$ 空間での領域の面積を Fig. 3-14 に示す。図より、可操作度では同一の μ となる組合せであっても K_2 の選び方によって特性が変化すると考えられる。可操作度は K_2 を大きくとるほど平均及び標準偏差が大きくなり、 μ が大きいほど可動範囲内での可操作度の標準偏差が小さくなる。従って K_2 として 1.0 ~ 1.25 を使用することにより、可動範囲内で関節トルクを操作しやすい機構とできる。

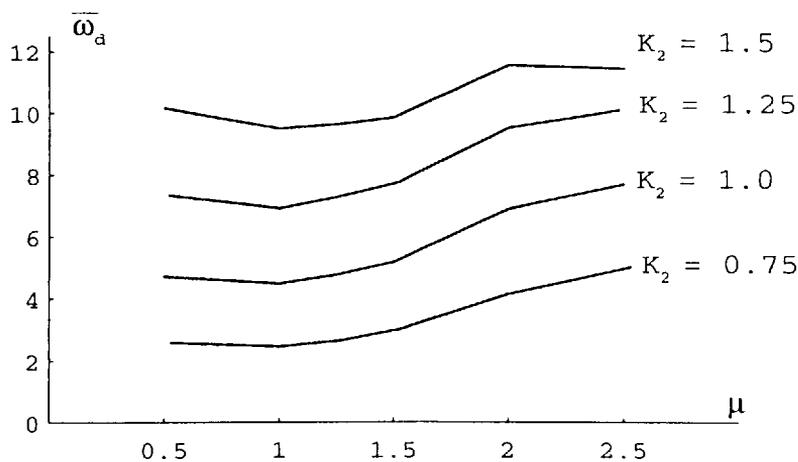


Fig. 3-12 Average of manipulability in accessible space

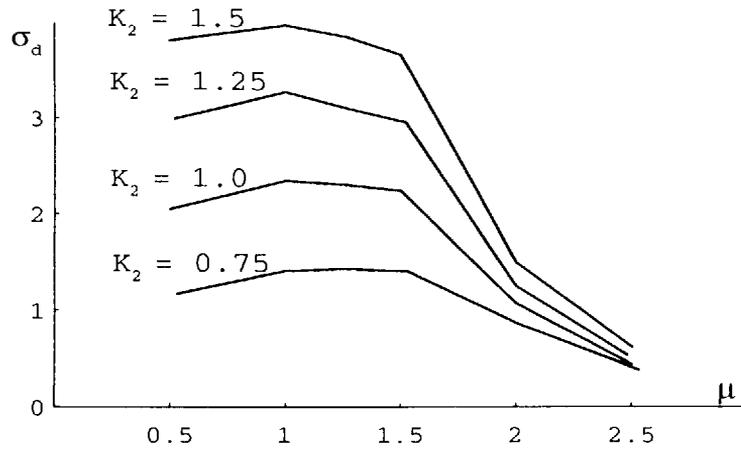


Fig. 3-13 Standard deviation of manipulability

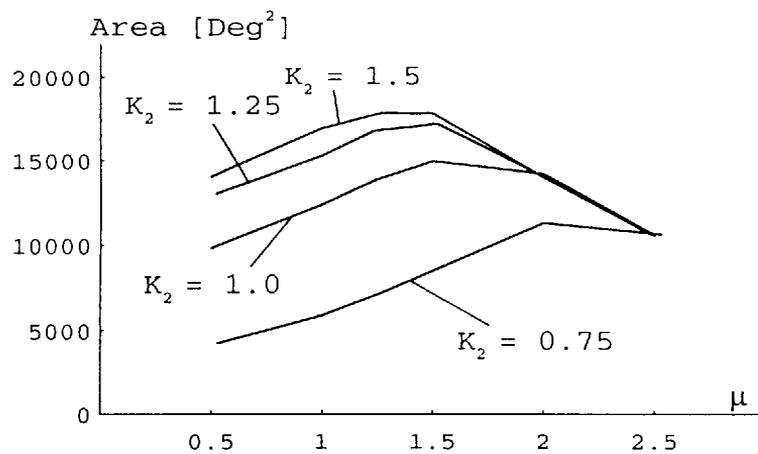


Fig. 3-14 Area for manipulability $\omega_i \geq 4$

次に、 $K_2 = 1.25$ とし $\mu = 1.0 \sim 1.5$ 、 $K_1 = 1.0 \sim 3.0$ と変化させたときの、可動範囲内における可操作度の平均をFig. 3-15、標準偏差をFig. 3-16に示す。図より、 K_1 を大きくとるほど可操作度の標準偏差が大きくなり、 μ が大きいほど可動範囲内の可操作度の標準偏差が小さくなることがわかる。また、可操作度の平均はの影響をあまり受けていないこともわかる。従って K_1 として1.5～2.0を使用することにより、可動範囲内で関節トルクを操作しやすい機構が得られる。

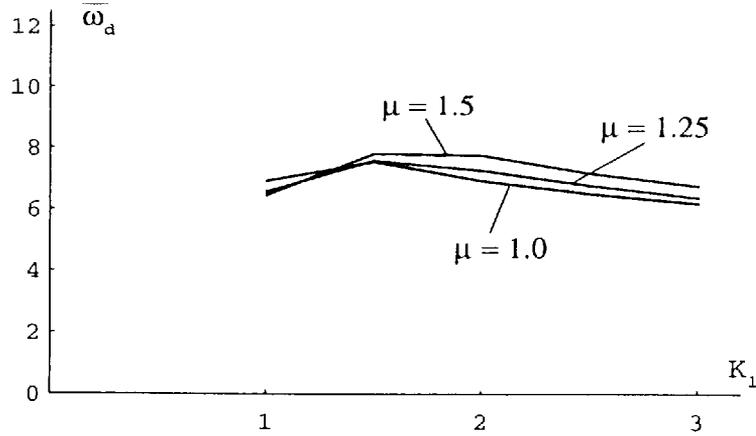


Fig. 3-15 Average of manipulability in accessible space

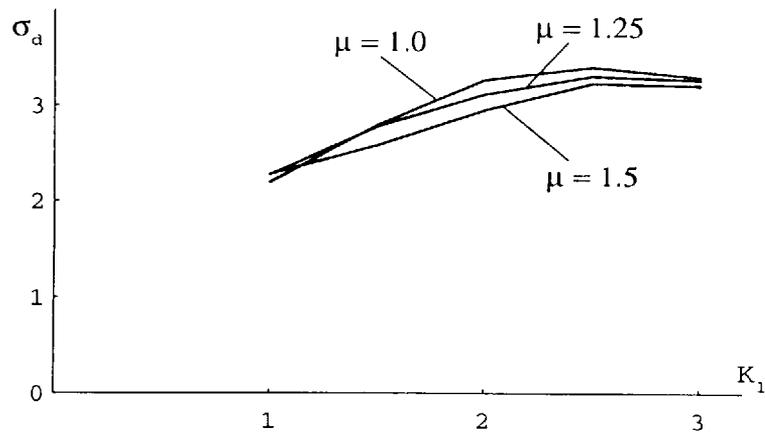


Fig. 3-16 Standard deviation of manipulability

最終的に、平行マニピュレータ型手首機構を製作するに当たっては、 μ として1.0 ~ 1.5, K_1 として1.5 ~ 2.0, K_2 として1.0 ~ 1.25を使用すればよい。例えば、 $K_1 = 2.0$, $K_2 = 1.25$, $\mu = 1.25$, $L_s = 0.04$ [m] とすれば、機構パラメータは $L_1 = 0.03$, $L_2 = 0.08$, $L_3 = 0.04$, $L_4 = 0.05$ [m] となる。

また以下では、 $K_1 = 2.0$, $K_2 = 1.25$ として $\mu = 1.0 \sim 1.5$, $\lambda = 0.0 \sim 1.0$ と変化させた場合について計算を行なった例を示す。

可動範囲内における可操作度の平均をFig. 3-17, 標準偏差をFig. 3-18に示す。図より、

μ の値に関わらず λ が小さくなると可操作度の平均，標準偏差ともに小さくなっていることがわかる． λ を小さく設定すると可操作度のレベルは落ちるが可動範囲内の可操作度の変動を小さく抑えられる機構を製作することができる．

よって，可動範囲の形状との兼ね合いを考えて $\mu = 1.25$ 付近， λ として0.6 ~ 0.8を使用すればよい．例えば， $L_5 = 0.04[\text{m}]$ ， $K_1 = 2.0$ ， $K_2 = 1.25$ ， $\mu = 1.25$ とし，機構パラメータを $L_1 = 0.03$ ， $L_2 = 0.08$ ， $L_3 = 0.04$ ， $L_4 = 0.05$ ， $L_5 = 0.03[\text{m}]$ として足首機構を製作するとよい．

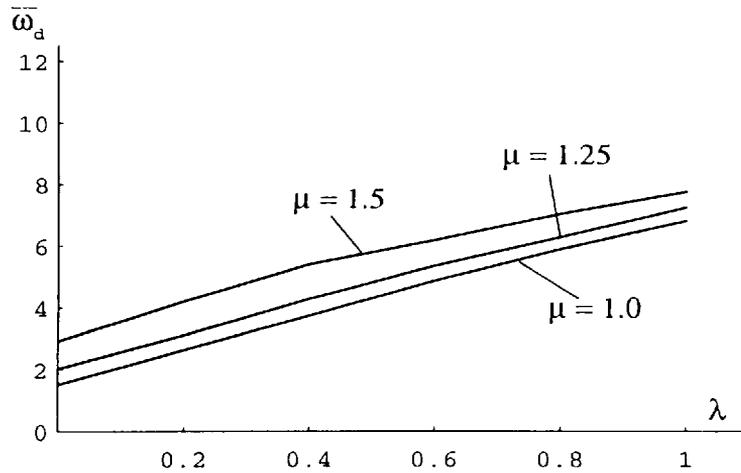


Fig. 3-17 Average of manipulability in accessible space

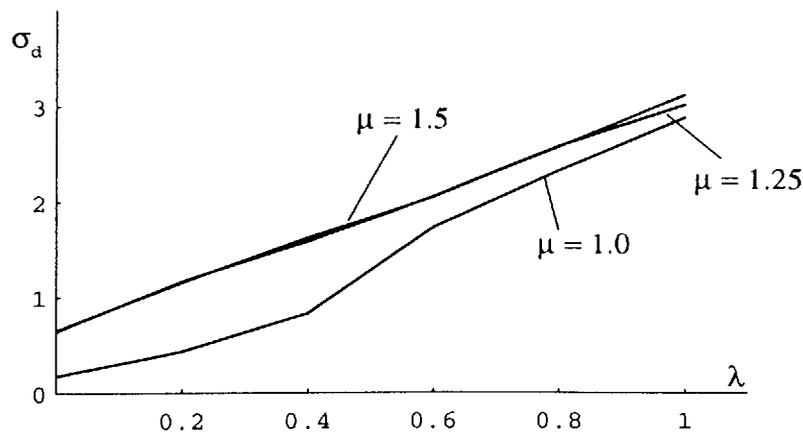


Fig. 3-18 Standard deviation of manipulability

第 4 章

腱制御機構の制御

4.1 はじめに

本章では、腱制御機構を制御するのに適した制御システムの構造について検討する。また、実際の実験装置を用いて制御実験を行い、その結果を考察する。

以下では、実験に使用する機構の説明を4.2節において述べた後、4.3節において関節運動と関節剛性が与えられた際の腱張力の算出法を述べる。次に、4.4節において腱制御機構を動作させることに適した制御系の構成について述べる。最後に試作した腱制御手首機構における実験によって制御システムの有効性を示す。

4.2 機構の概要

本節では、制御システムの検証に使用する3自由度腱制御手首機構の概要及び剛性調整特性について述べる。

本章で対象とする手首機構の概要をFig. 4-1に、各リンクへの腱の張り方をFig. 4-2に示す。本機構は4本の腱によって z_1 軸、 z_2 軸、 z_3 軸回りの回転運動を制御する機構である。各腱はアクチュエータ上の点 p_i を起点としてリンク0上のNSTを經由し、リンク1上の点 q_i 及びリンク2上の r_i で支持され、リンク3上の点 s_i で固定される($i=A, B, C, D$)。

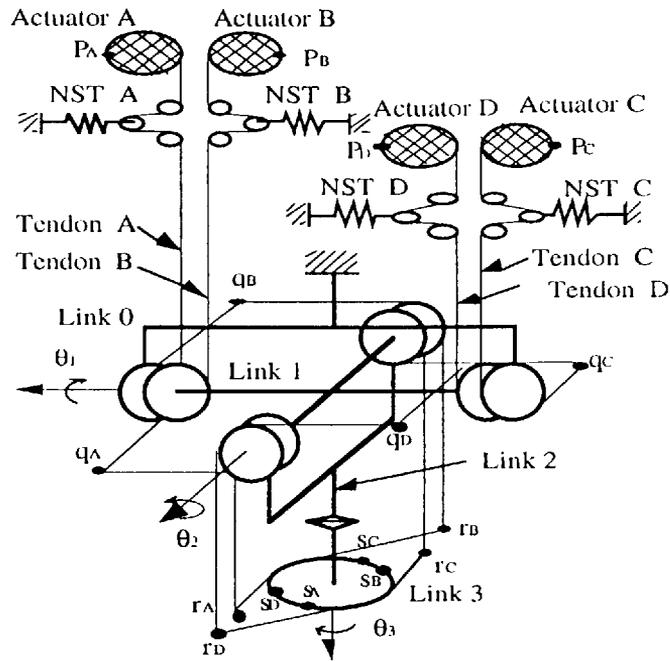


Fig. 4-1 Tendon-controlled wrist mechanism

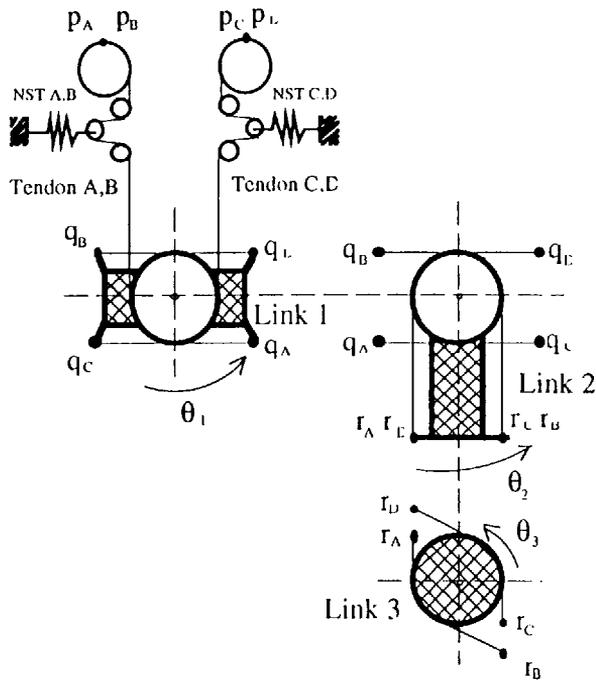


Fig. 4-2 Wiring of wrist mechanism

本手首機構の駆動方法は以下の通りである.

- (a):第1関節の回転(z_1): 腱C,Dを縮め, 腱A,Bを伸ばす.
- (b):第2関節の回転(z_2): 腱B,Cを縮め, 腱A,Dを伸ばす.
- (c):第3関節の回転(z_3): 腱B,Dを縮め, 腱A,Cを伸ばす.

また, 始点 p_i と終点 s_i との間の腱の長さを l_i とすると, 腱長ベクトル $l = (l_A, l_B, l_C, l_D)$ と手首関節変位ベクトル $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ の微小変位間の関係を示す腱制御機構ヤコビ行列 J_f は次のようになる.

$$J_f = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ R_1 & -R_2 & -R_3 \\ -R_1 & -R_2 & R_3 \\ -R_1 & R_2 & -R_3 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

本手首機構では R_1, R_2, R_3 は定数であり, J_f は常にフルランクな定数行列となる. 次に, 第2章で述べた方法で剛性調整を行うための零化空間ベクトルを導入する. 本手首機構の場合関節空間での剛性行列 $K_j = J_f' K_m J_f$ は腱 i のNSTの剛性を E_i とすると

$$\begin{bmatrix} R_1^2(E_1 + E_2 + E_3 + E_4) & R_1 R_2(E_1 - E_2 + E_3 - E_4) & R_1 R_3(E_1 - E_2 - E_3 + E_4) \\ R_1 R_2(E_1 - E_2 + E_3 - E_4) & R_2^2(E_1 + E_2 + E_3 + E_4) & R_2 R_3(E_1 + E_2 - E_3 - E_4) \\ R_1 R_3(E_1 - E_2 - E_3 + E_4) & R_2 R_3(E_1 + E_2 - E_3 - E_4) & R_3^2(E_1 + E_2 + E_3 + E_4) \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

と表せる. そこで,

$$n' = (R_1^2, R_2^2, R_3^2, R_3^2)(I - J_f' J_f) \quad (4-3)$$

として, 腱制御機構の拡張ヤコビ行列を構成する. この時バイアス張力は

$$(1/R_1^2, 1/R_2^2, 1/R_3^2, 1/R_3^2)' s \quad (4-4)$$

とパラメータ化される. このバイアス張力によって剛性行列は

$$\begin{bmatrix} \frac{R_1^2}{R_3^2} s & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_2^2}{R_3^2} s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

と制御される.

4.3 腱張力の算出

本節では、関節の目標運動及び目標剛性が与えられた際の腱張力の算出法を述べる。序論で述べたように、冗長なアクチュエータによって駆動される腱制御機構では与えられた関節トルクを発生する腱張力を定めるには何らかの規範が必要である。これまでに、張力の線形関数⁴⁸⁾、自乗和⁴⁹⁾を最小にするという規範の下に腱張力を求める方法が提案されている。これに対し本章で提案する方法は剛性調整変数の上昇を抑えるという規範を用いるものである。その際、動作中のアクチュエータの行き過ぎによる腱の緩みを防止するために、腱張力の下限値を零よりも大きな定数 f_m で制限することにする。よってこの問題を、目標剛性を達成するための \hat{s} よりも大きな $n'f$ を発生しつつ $f_i \geq f_m$ ($i=1,2,\dots,m$) である腱張力 f によって目標トルク τ を発生するという拘束の下で、目標剛性 \hat{s} からの差を最小化する最適化問題に帰着して解く。従って、腱張力を求める問題は以下のような最適化問題として定式化される。ここでは、簡単のため $m = n+1$ の場合を述べる。

<問題>

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } n'f - \hat{s} \\
 & \text{Subject to } -J_f'f = \tau \\
 & \quad n'f \geq \hat{s} \\
 & \quad f_i \geq f_m \quad i = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{4-6}$$

ここで、次式のように腱制御機構の拡張ヤコビ行列の逆行列を最初の n 列と残りの 1 列に分解しておく。

$$\begin{bmatrix} -J_f' \\ n' \end{bmatrix}^{-1} = [B_1 \ b_2] \tag{4-7}$$

(4-6) の問題に対し、以下のようにして $n'f - \hat{s}$ を最小化する腱張力 f を求める。

(4-7) より腱張力 f は

$$\begin{aligned} f &= B_1 \tau + b_2 s \\ &= \begin{bmatrix} f_{i1} \\ f_{i2} \\ \vdots \\ f_{im} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{22} \\ \vdots \\ b_{2m} \end{bmatrix} s \end{aligned} \quad (4-8)$$

となる。そこで、 s を \hat{s} に対して

$$s^* = \max \left\{ \frac{f_m - f_{i1}}{b_{21}}, \frac{f_m - f_{i2}}{b_{22}}, \dots, \frac{f_m - f_{im}}{b_{2m}}, \hat{s} \right\} \quad (4-9)$$

とすることにより、 $f_i \geq f_m$ ($i=1,2,\dots,m$) であり、かつ $n'f - \hat{s}$ が最小となる腱張力 f を得る。

これを、1関節-2駆動系の腱制御機構において図示すると次のようになる。

この場合、問題は

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } (f_1 + f_2) - \hat{s} \\ &\text{Subject to } f_1 - f_2 = \tau \\ &\quad f_1 + f_2 \geq \hat{s} \\ &\quad f_1 \geq f_m \quad f_2 \geq f_m \end{aligned} \quad (4-10)$$

のようになる。まず不等式条件に対する許容解集合は **Fig. 4-3(a)** のようになる。これに関節トルクの条件を加える。**Fig. 4-3(b)** のような場合には点Aにおいて目的関数が最小となる。この時目的関数の値は零となる。この状態となる関節トルクの上限は同図の直線 t が点 B を通る場合であり、関節トルクの下限は直線 t が点 C を通る場合である。また、上記の関節トルクの上限よりも大きな関節トルクが要求される **Fig. 4-3(c)** のような場合には点Dにおいて目的関数が最小となる。この場合には各々の腱張力 f_i を f_m よりも大きくとらなければならないという条件のため関節剛性は設定値 \hat{s} よりも大きくなる。逆に関節トルクが前記の関節トルクの下限よりも小さくなるように設定された**Fig. 4-3(d)**

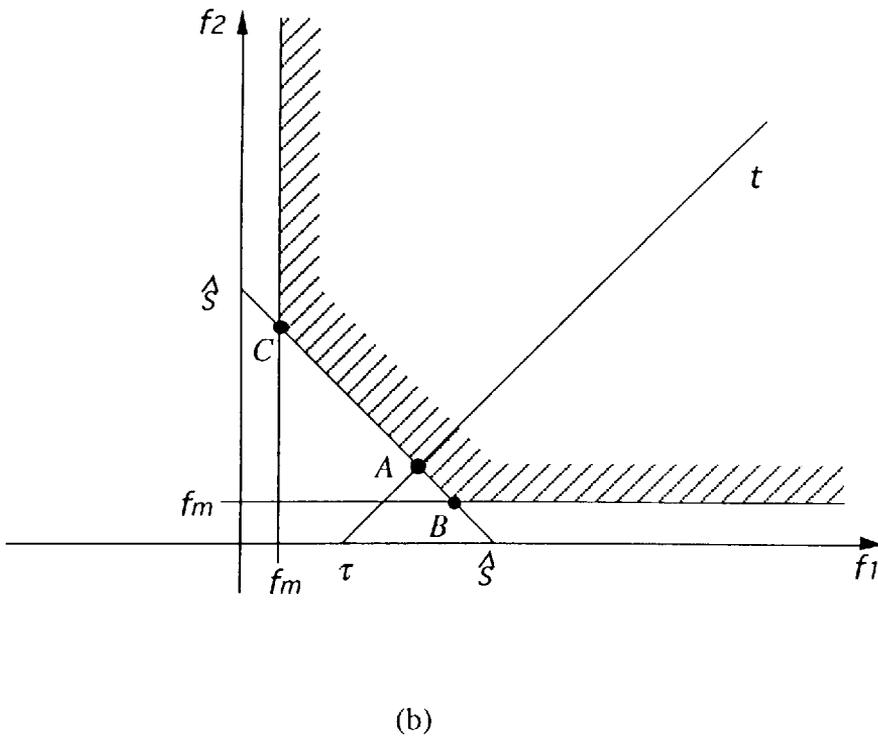
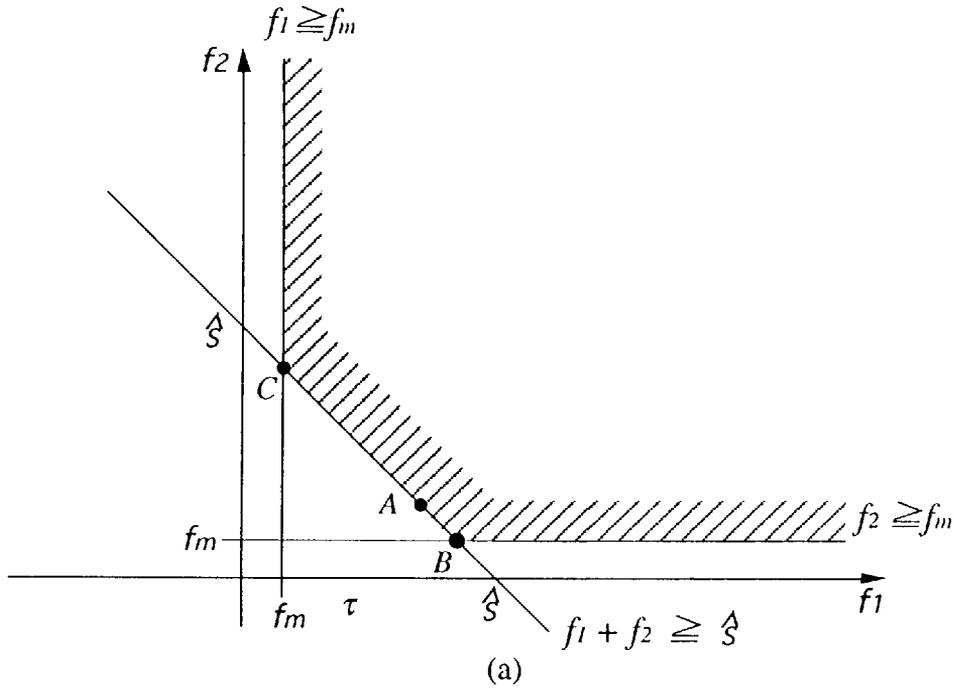
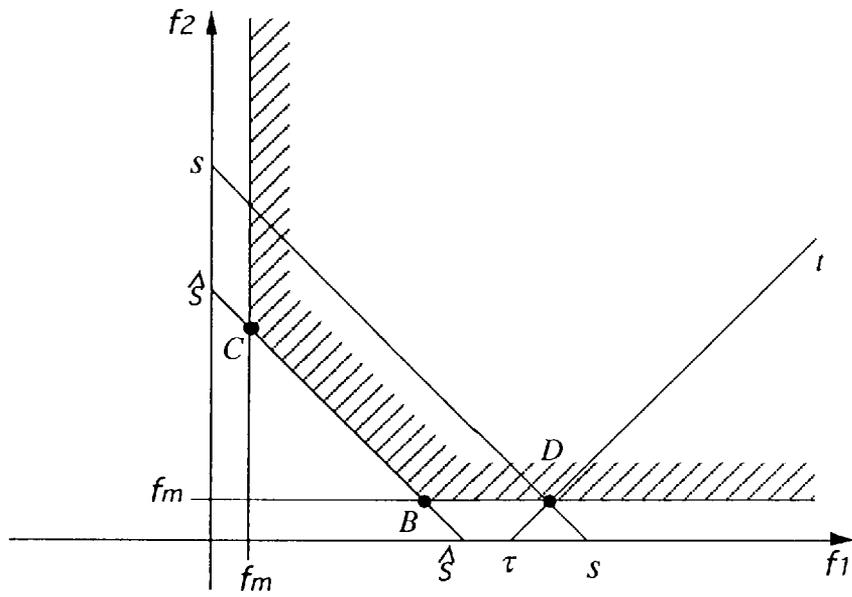
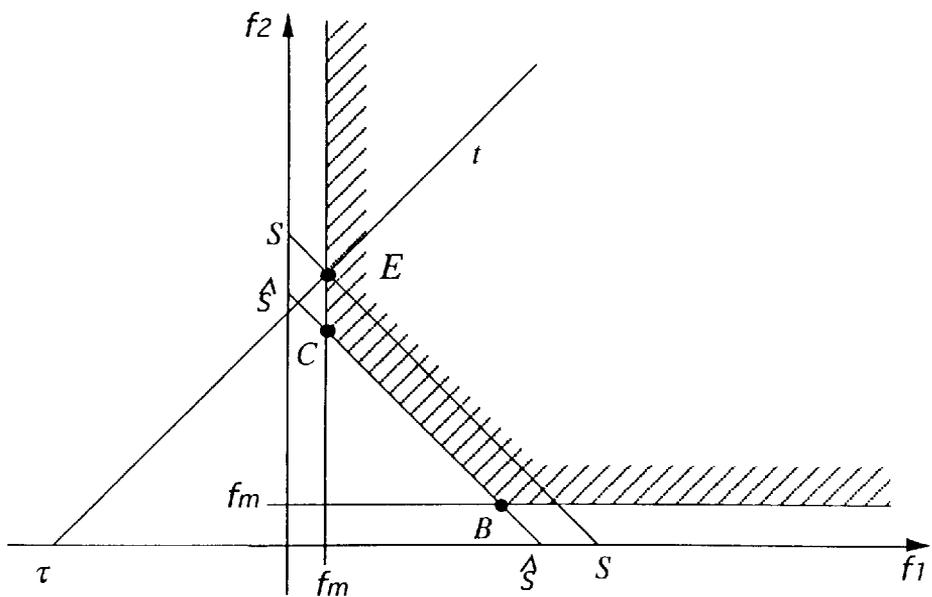


Fig. 4-3 Tendon force problem



(c)



(d)

Fig. 4-3 Tendon force problem

のような場合には点Eにおいて目的関数が最小となる。この場合も Fig. 4-3(c) の場合と同様に腱張力 f_i の下限の条件のため関節剛性は設定値 \hat{s} よりも大きくなる。

4.4 制御系の構成

本章では、2.3で示した関節運動と関節剛性の制御の独立性を生かすための制御系を構成する。まず、手首機構を制御する際の基本ユニットとなる非線形要素(NST)を含んだ張力制御系について述べる。次に、1関節-2駆動系モデルにおいて制御系の構造の検討を行い、その結果を n 関節- m 駆動系の腱制御機構へ拡張する。

4.4.1 張力制御系の構成

本節で扱う張力制御ユニットを Fig. 4-4に示す。この系に対し Fig. 4-5の制御系を組むと、系は漸近安定な線形ブロック(同図の網掛け部)に非線形フィードバック ($-N(\theta)$) が加わった閉ループ系となる。

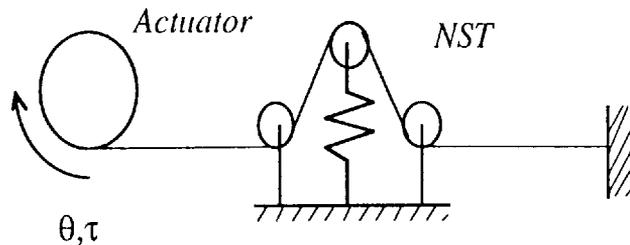


Fig. 4-4 Tension Control unit

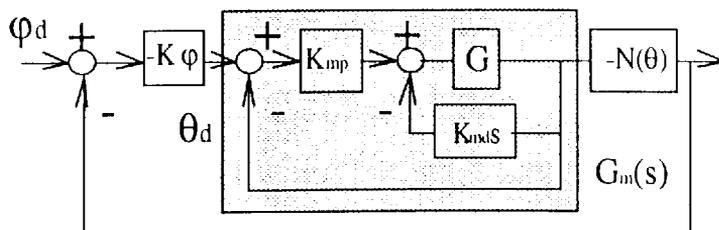


Fig. 4-5 Tension Control System

一方、非線形部は Fig. 4-6に示すように、 $\theta_c = 0$ の時 $-N(\theta_c) = 0$ で $\theta_c \neq 0$ の時 $0 \leq -N(\theta_c) / \theta_c \leq$

$k(=0.17)$ を満たしており、傾きが零と k の直線からなるセクタ内に入る。ここで、 θ_e は平衡点 $\bar{\theta}$ からの変位である。従って、Popovの安定定理⁵⁰⁾を適用することによってフィードバックゲイン K_ϕ の安定限界が求まり、制御系の設計ができる。

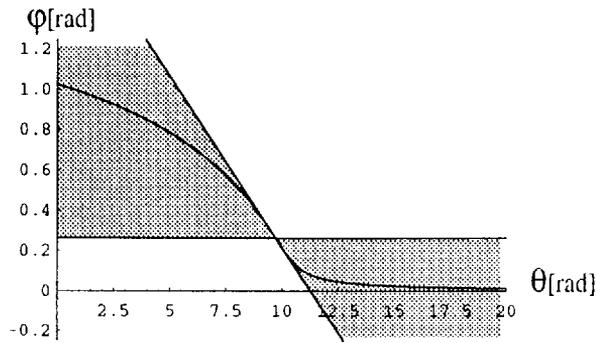


Fig.4-6 Nonlinear characteristic function

$G_m = \omega_n^2 / (s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2)$ とし $\omega_n = 30.0$ [Rad/s], $\zeta=1.0$ と設定した場合のポポフ軌跡を Fig. 4-7 に示す。この場合の安定限界は $K_\phi = 50.5$ となる。

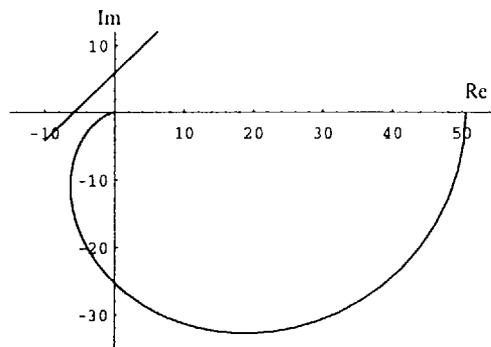


Fig.4-7 Popov locus

4.4.2 1関節-2駆動系モデルでの制御系の構成

本節では、Fig.4-8の1関節舵制御機構に対する制御系を検討する。Fig.4-8の機構の場合 J_f 及びその零空間ベクトル n は次式で表される。

$$J_f = [R \quad -R]^T \quad n = [1 \quad 1] \tag{4-11}$$

ここで、 R は関節部のモーメントアームである。

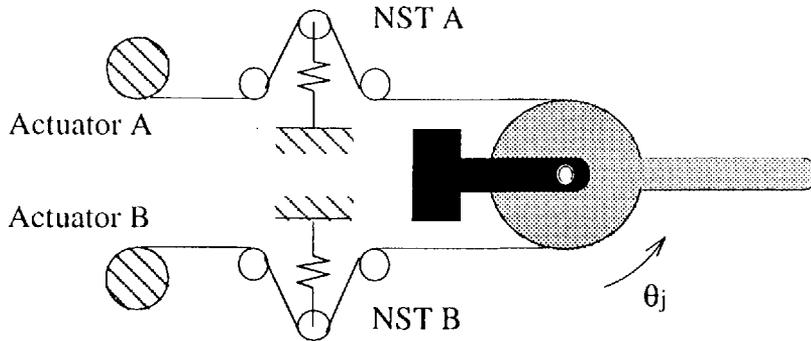


Fig. 4-8 1 D.O.F.tendon-controlled manipulator

さらに、この J_f , n に対して B_1 , b_2 を次のように定義する。

$$[B_1 \ b_2] = [-J_f^t \ n^t]^{-1} \tag{4-12}$$

この B_1 , b_2 を使用して、Fig. 4-9に示すような制御系を構成する⁵¹⁾。まず、次式のように関節運動指令と剛性制御指令の和として目標張力 $v = (v_A, v_B)^t$ を生成する。

$$v = B_1 K_p \theta_e + b_2 s \tag{4-13}$$

ここで θ_e は関節誤差であり、 K_p は位置フィードバックゲインである。さらに、この v に対して、次のような力制御系を構成する。

$$u = K_f (v - f) + b_2 s \tag{4-14}$$

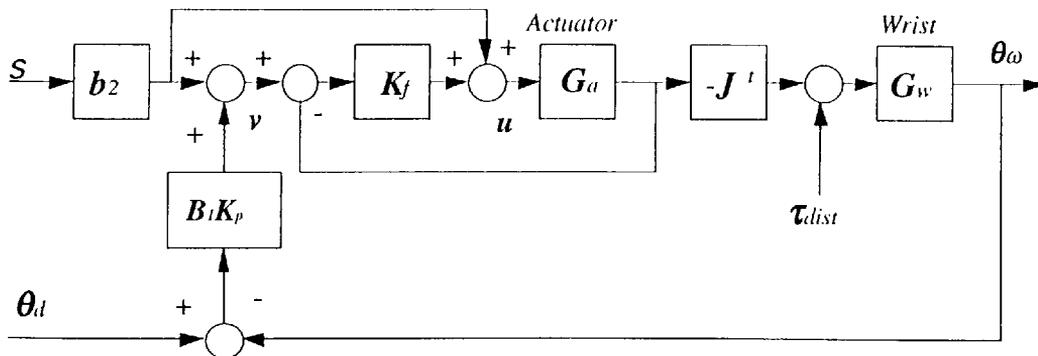


Fig. 4-9 Control System

ここで、 $u = (u_A, u_B)^t$ はアクチュエータへの制御入力で、 $f = (f_A, f_B)^t$ は腱張力の現在値

であり、 K_f は力制御ゲインである。このとき、

$$u_A = K_f \left(-\frac{K_p}{2R} \theta_c + \frac{1}{2} s - f_A \right) + \frac{1}{2} s$$

$$u_B = K_f \left(\frac{K_p}{2R} \theta_c + \frac{1}{2} s - f_B \right) + \frac{1}{2} s$$

となる。アクチュエータ部の慣性及び粘性係数を I_a 、 B_a とし、 K_o がバイアス張力によって指定されるNSTの剛性であるとするれば、各艇張力は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \hat{f}_A &= K_o (r \hat{\theta}_A + R \hat{\theta}_w) \\ &= K_o (r G_a (r \hat{u}_A - r f_A) + R \hat{\theta}_w) \\ &= \frac{G_a}{1 + K_m G_a} \left(-\frac{r^2 K_o K_f K_p}{2R} \hat{\theta}_c + \frac{K_m \hat{s}}{2} \right) + \frac{R K_o}{1 + K_m G_a} \hat{\theta}_w \\ \hat{f}_B &= \frac{G_a}{1 + K_m G_a} \left(\frac{r^2 K_o K_f K_p}{2R} \hat{\theta}_c + \frac{K_m \hat{s}}{2} \right) - \frac{R K_o}{1 + K_m G_a} \hat{\theta}_w \end{aligned}$$

ここで、 $K_m = r^2 (1 + K_f) K_o$ であり、 $G_a (= 1 / (I_a s^2 + B_a s))$ はアクチュエータ部の伝達関数を示しており、 \hat{x} は変数 x をラプラス変換したものを示す。さらに、関節変位 θ は

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_w &= G_w (R \hat{f}_B - R \hat{f}_A - \hat{\tau}_{dist}) \\ &= \frac{G_w G_a r^2 K_o K_f K_p}{1 + K_m G_a + K_o G_w (r^2 K_f K_p G_a + 2R^2)} \hat{\theta}_c \\ &\quad - \frac{G_w (1 + K_m G_a)}{1 + K_m G_a + K_o G_w (r^2 K_f K_p G_a + 2R^2)} \hat{\tau}_{dist} \\ &= G_d \hat{\theta}_c - G_d \hat{\tau}_{dist} \end{aligned} \tag{4-15}$$

となる。ここで $G_w = 1 / (I_w s^2 + B_w s)$ であり、 I_w と B_w は関節部の慣性と粘性係数である。この系に対しては、目標値に対するレギュレーション特性 G_{rw} 及び外乱抑制特性 G_{dw} は最終値定理⁵²⁾より

$$G_{rw} = \lim_{s \rightarrow 0} s G_r \frac{1}{s} = 1 \tag{4-16}$$

$$G_{dw} = \lim_{s \rightarrow 0} s G_d \frac{1}{s} = \frac{1 + K_f}{K_f K_p} \tag{4-17}$$

となる。よって、一定な目標入力に対して定常偏差なく追従でき、一定外乱に対しては K_p を十分大きく取ることによって定常偏差をゼロとできる。

4.4.3 n 自由度腱制御機構での制御系の構成

本節では、前節において得られた制御系を n 関節- m 駆動系の腱制御機構へ拡張する。アーム機構部及びアクチュエータの運動方程式は次式で表される。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) + \tau_{ext} = -J'f \quad (4-18-a)$$

$$I_a\ddot{\theta}_a + B_a\dot{\theta}_a + rf = ru \quad (4-18-b)$$

ここで、 $M(\theta)$ はアーム部の慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta})$ はコリオリ・遠心力項、 $g(\theta)$ は重力項、 τ_{ext} は外部トルクであり、 I_a はアクチュエータの慣性、 B_a は粘性摩擦係数、 u は出力トルクである。

前節で構成した制御系を使用し、さらにアクチュエータ及びアーム部の動特性を補償するために次のようにする。

$$\begin{aligned} v &= B_1u_w + b_2s \\ u &= K_f(v - f) + B_2s + u_w \\ u_w &= (1 + K_p)K_f^{-1} \{ M(\theta)u_m + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) + \tau_{ext} \} \\ u_a &= r^{-1} \{ -r^{-1}I_a(J_f u_m + \dot{B}z) + B_a\theta_a \} \end{aligned} \quad (4-19)$$

ここで、 $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)'$ は NST におけるバネの変位ベクトルであり、 $B = \text{diag}\left\{ \frac{\partial z_{w1}}{\partial z_1}, \frac{\partial z_{w2}}{\partial z_2}, \dots, \frac{\partial z_{wm}}{\partial z_m} \right\}$ である。この制御系では、 $\dot{z} \equiv 0$ であれば、補償後のシステムは次のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= u_m \\ n'f &= s \end{aligned} \quad (4-20)$$

従って、 u_m 及び s によってアーム部の動作と機械的剛性を独立に制御することができる。ただし、目標張力 v の全要素を正の値にするため s に下限を設ける。

4.5 制御

4.5.1 実験システムの概要

ハードウェアによる検証を行うために、**Fig. 4-1**の腱制御手首機構を試作した。試作機では、 $R_1 = R_2 = R_3 = 0.01[m]$ とした。手首部の総重量は1 kg未満である。

Fig.4-10に実験用ロボット (Puma260)の先端に搭載した試作機を示す。アクチュエータとして4台のDCモータ(20W)を使用しボールネジを介して腱を駆動している。関節角は関節軸に付けたエンコーダで、腱の長さはモータ軸に付けたエンコーダで検出する。また、非線形バネ要素に取り付けたポテンショメータにより腱の角度を測定し、その値から腱張力を算出している。**Fig. 4-11**に実験システムの構成図を示す。制御用コントローラにはトランスピュータを用いて構築した並列処理システムを使用している。**Fig. 4-11**における T_i $i=0,1,\dots,4$ はそれぞれ1つのトランスピュータを示している。 T_1 は目標軌道の算出を、 T_2 は目標関節トルク及び目標張力の算出を行っている。 T_3 は張力制御演算を行い、 T_4 と T_0 は入出力処理、モニター機能を受け持っている。このように機能分散を行うことにより1.5 [msec]の張力制御系のサーボサイクルを実現している。

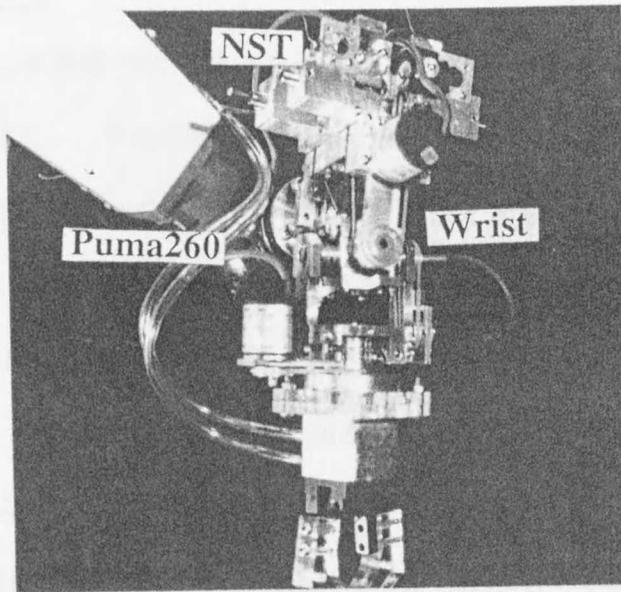


Fig. 4-10 Experiment System

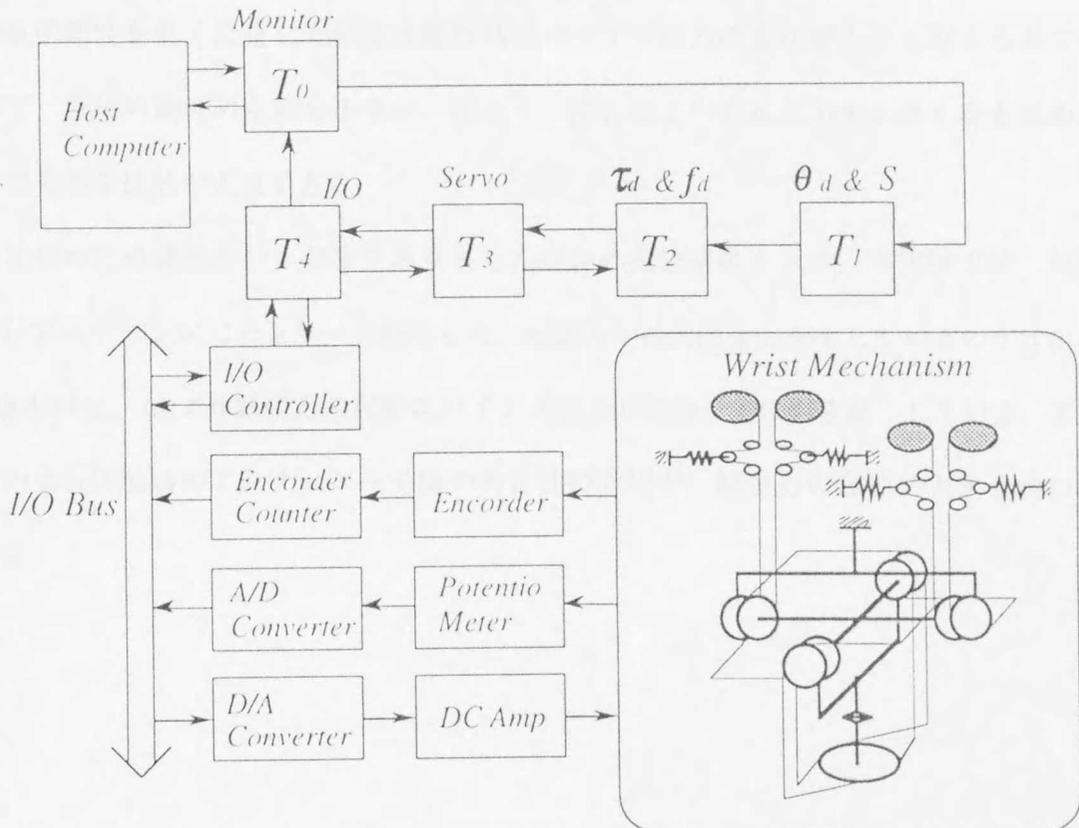


Fig. 4-11 Controller System

4.5.2 実験結果

実験によって、本機構の制御性能を検討した。手首機構の各軸回りの機械的剛性を5.0[N.m/Rad]に指定し、手首機構を第一軸回りに運動させた実験をFig. 4-12に示す。運動空間中には障害物が置いてあり運動中の手首機構と接触するようにしてある。同図(a)は θ の応答を示しており、破線は目標軌道を、実線は手首機構の実際の動作を表している。また、Fig.4-12(b)は腱張力の応答を、(c)は $-J_f' f = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)'$ の応答を、(d)は $n'f$ (バイアス張力)の応答を示している。図から分かるように、手首機構が障害物と接触した際もNSTによって外力が吸収され、腱張力は滑らかな応答を示している。

Fig.4-13には機械的剛性を0.5[N.m/Rad]に指定した場合の実験結果を示している。機械的剛性が5.0[N.m/Rad]の場合と同様に腱の緩みもなく動作が遂行されている。さらに機械的剛性を低く設定した場合は接触時のバイアス張力の変化が小さく抑えられているので、機械的剛性の変動も小さい。従って、障害物との相互作用が小さくなるため、より柔らかな接触が実現できる。

比較のため非線形バネ要素を取り外した場合の実験結果を示す。本実験では、腱張力はひずみゲージ式力センサーで測定した。腱張力が振動的な応答をしているのが分かる。Fig.4-14(c), (d)より腱張力の振動はバイアス張力の振動を主に引き起こしている。また、この場合接触時のアクチュエータ間の動特性の差異が、腱張力の応答に大きく現われている。

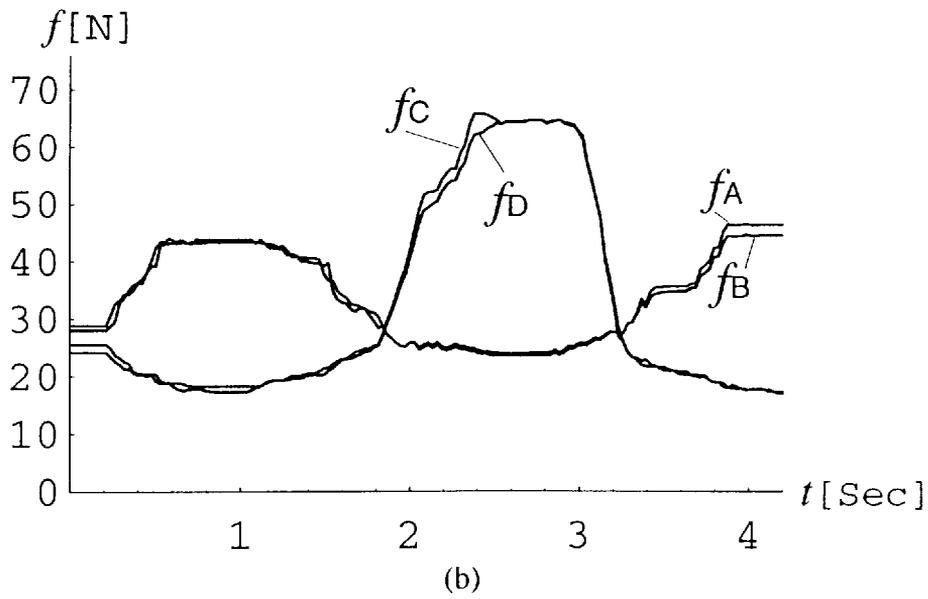
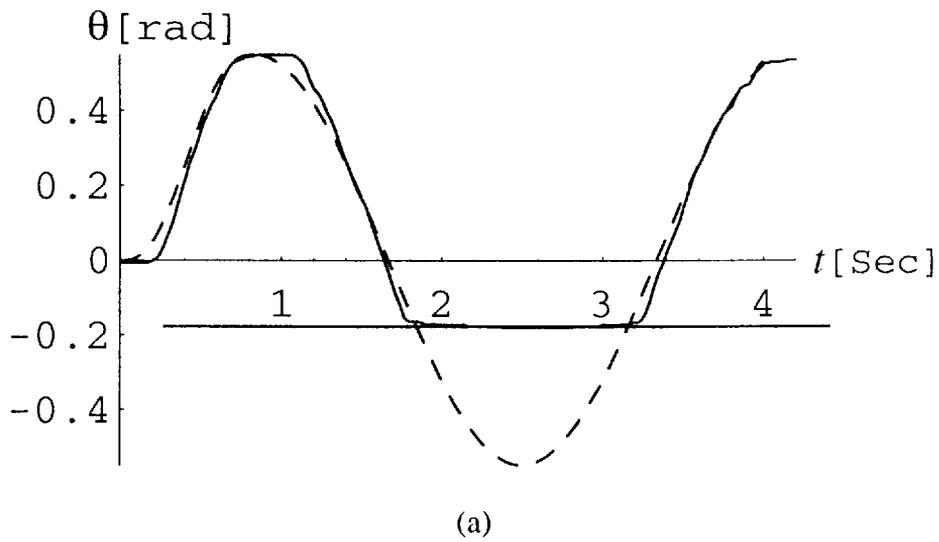
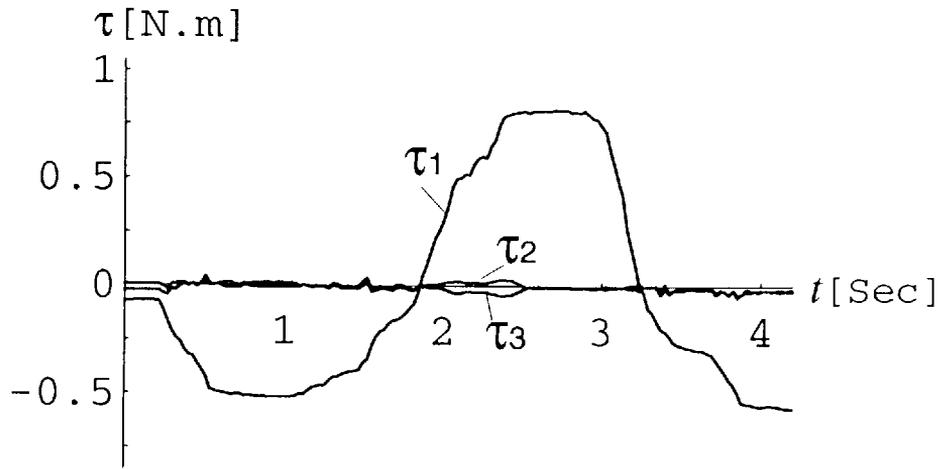
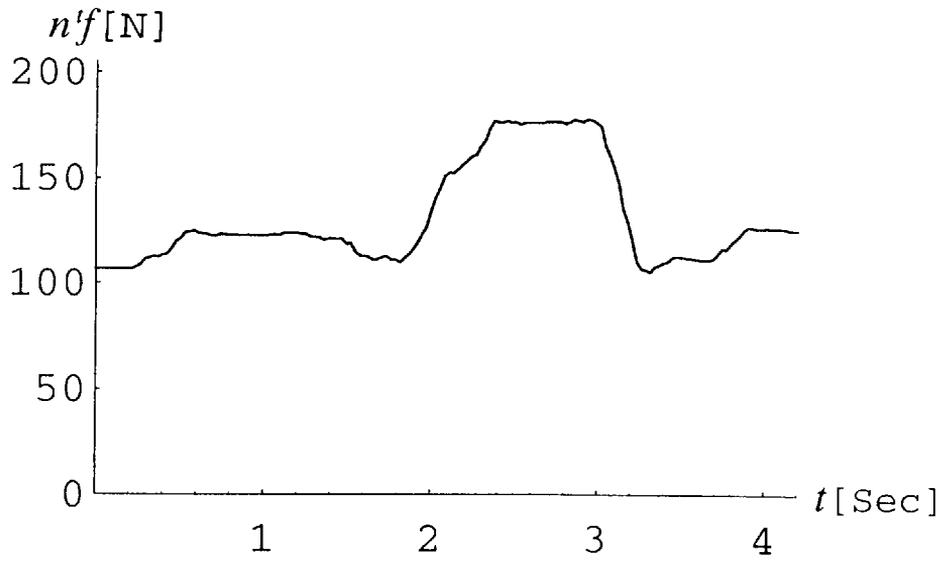


Fig. 4-12 Experiment result case 1



(c)



(d)

Fig. 4-12 Experiment result case 1

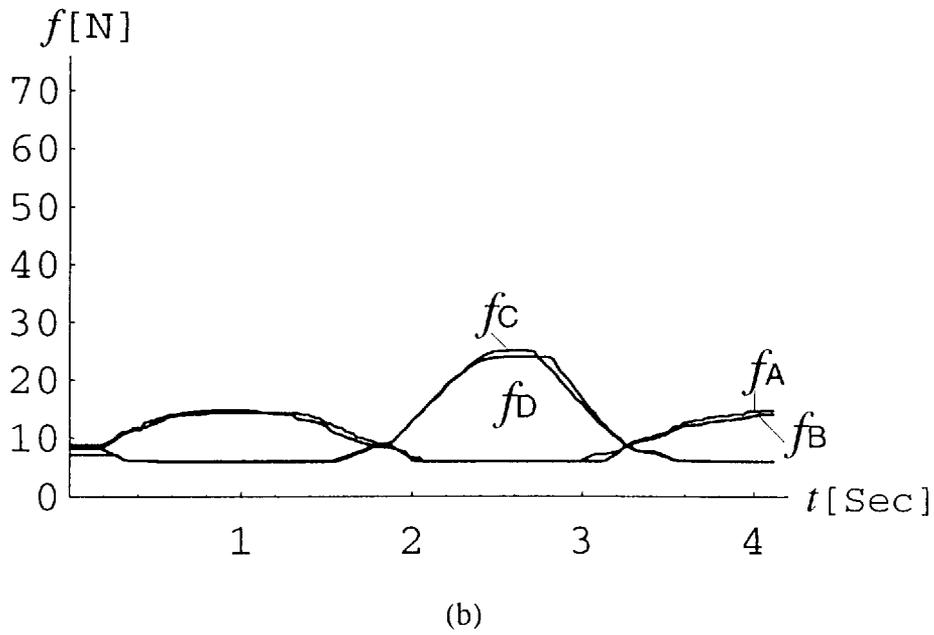
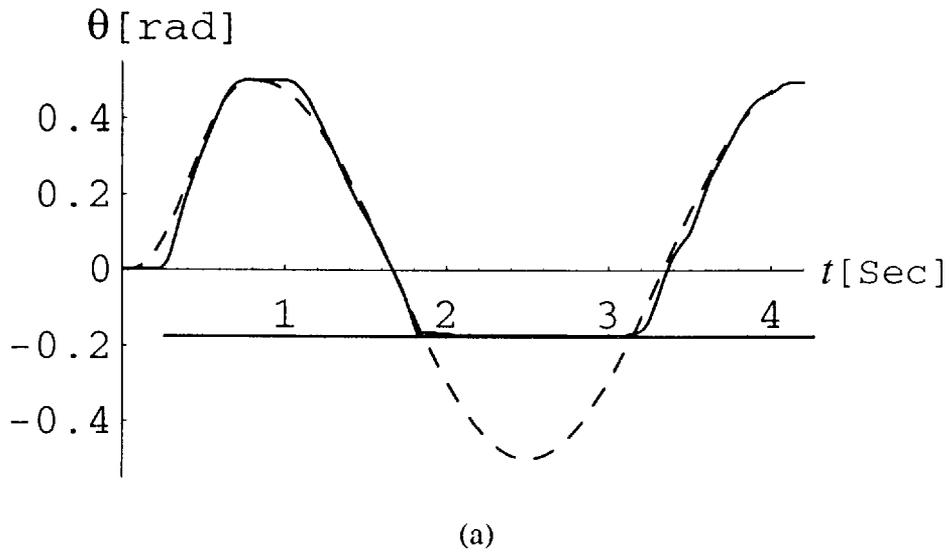
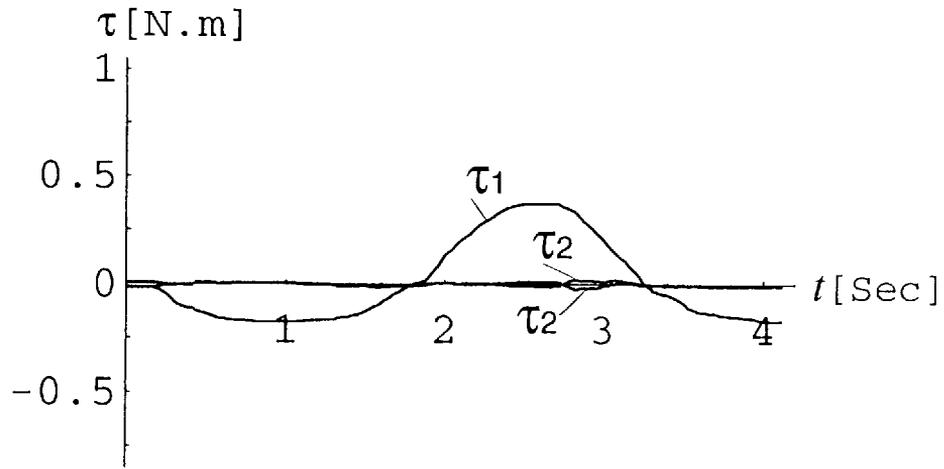
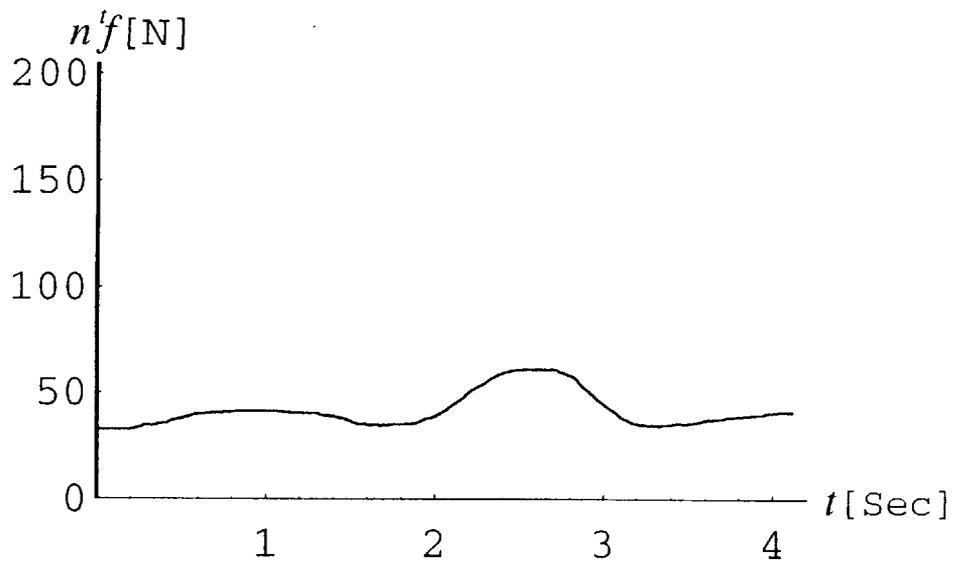


Fig. 4-13 Experiment result case 2

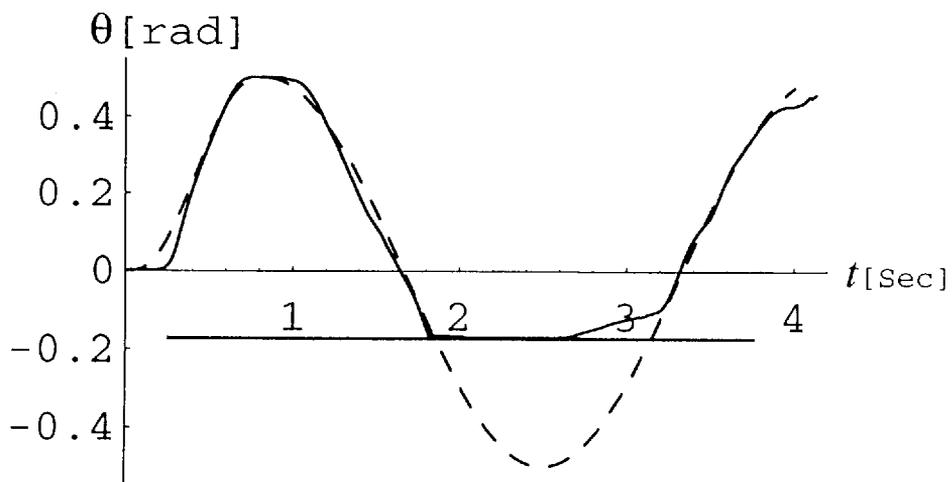


(c)

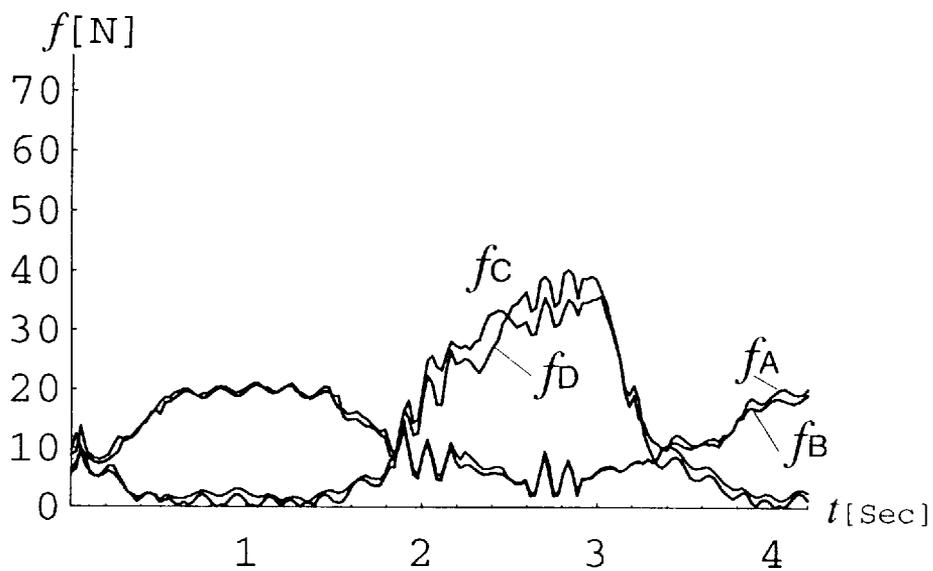


(d)

Fig. 4-13 Experiment result case 2

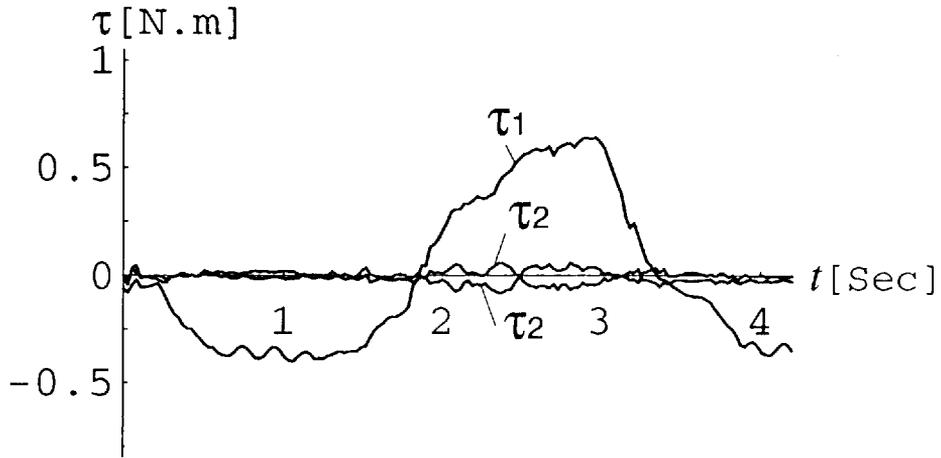


(a)

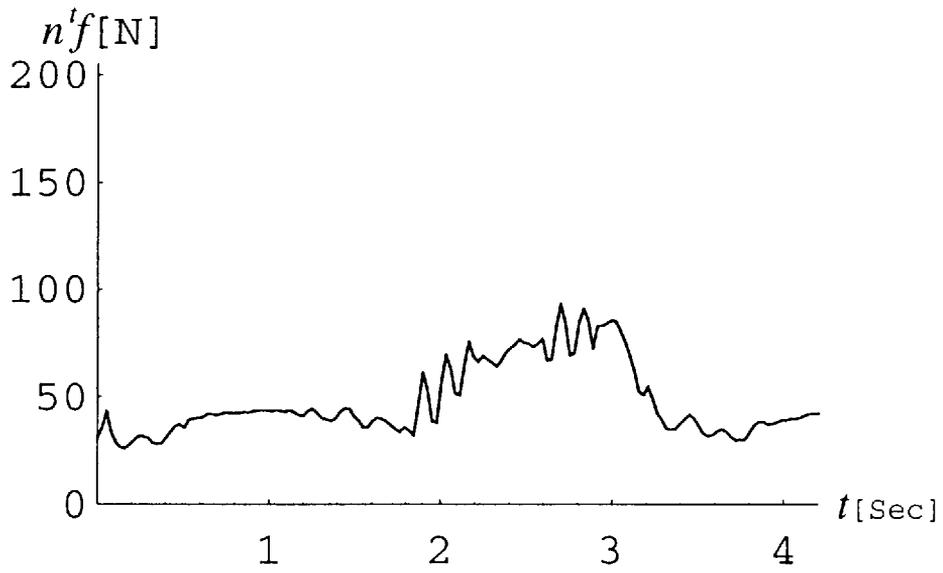


(b)

Fig. 4-14 Experiment result case 3



(c)



(d)

Fig. 4-14 Experiment result case 3

第 2 部

腱制御機構の応用

第 5 章 小型腱制御アームと産業用ロボットの 協調制御

第 6 章 7自由度腱制御アームの制御

第2部では腱制御機構を使用した応用制御として、小型腱制御アームと産業用ロボット・アームとを動作周波数によってそれぞれの役割を分担・協調する制御系（第5章）及び7自由度腱制御アームの制御（第6章）について述べる。

第5章

小型腱制御アームと産業用ロボットの協調制御

5.1 はじめに

本章では、小型腱制御アーム（マイクロ・アーム）と産業用ロボット（マクロ・アーム）との協調制御について述べる。腱制御機構では序論でも述べたようにアクチュエータを関節と離れた場所に設置し、その間を腱（ワイヤ）で結び駆動力を伝達するという構成が採れる。そのため関節部を軽量かつ小型にすることができる。そこで、通常の産業用ロボットの先端に腱制御アームを搭載し、ロボットシステムとしての運動性能を向上させることが考えられる。以下の節では、まずマイクロ・アームとマクロ・アームを協調動作させる際に、それぞれ動作をそれらの持つ周波数特性に基づいて制御する方法を5.2節で述べる。次に、5.3節において、1自由度のマクロ・マイクロ・システム対して協調制御系を構成し、シミュレーションによってその有効性を示す。最後に、3自由度の腱制御マイクロ・アームと6自由度の産業用ロボット・アームの場合へ協調制御系の拡張を行う。

5.2 問題設定

本節では、可動範囲は広いが動作速度が慣性のために制限を受けるマクロ・アームと、高速運動は可能であるが可動範囲の狭いマイクロ・アームを協調動作させるための制御系の構造について述べる。

これまでも、マニピュレータの先端に付加的な機構を取り付けることにより特性を

改善する研究は、ラバー製の手首センサを使用した位置/力ハイブリッド制御⁵³⁾、小型軽量ナリストデバイスとマクロ・アームの非干渉化制御⁵⁴⁾、インピーダンス制御に基づくマクロ・マイクロ・アームの協調制御⁵⁵⁾、マイクロ・アームによりフレキシブル・アームの弾性変位の補正をする⁵⁶⁾等が行われている。これに対し本章で提案する制御系はマクロ及びマイクロ・アームの動作をそれぞれの物理的特性に見合った周波数領域において行わせるためのものである⁵⁷⁾。

マクロ・アームとマイクロ・アームの持つ特性から、移動距離が大きい動作速度は遅いような動作をマクロ・アームが、動作速度は速いが移動距離が小さいような動作をマイクロ・アームが担当することができれば、広範囲な作業領域を持ちかつ速応性にも優れたシステムとできる。従って、両者の動作をそれぞれの周波数特性に見合った周波数領域において成されるような周波数分離制御によって協調動作を実現する。

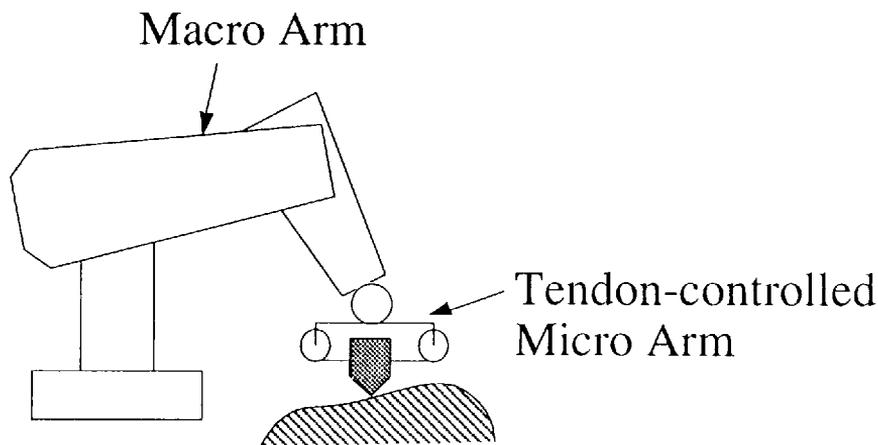


Fig. 5-1 Macro - micro Arm system

マクロ・アームとマイクロ・アームの周波数特性（ゲイン特性）がFig.5-2のようになっている場合、それぞれのアームに対し動作周波数領域を設定する。この動作周波数領域で各々のアームが主に作動するような制御系を H_{∞} 理論を用いて構成する。

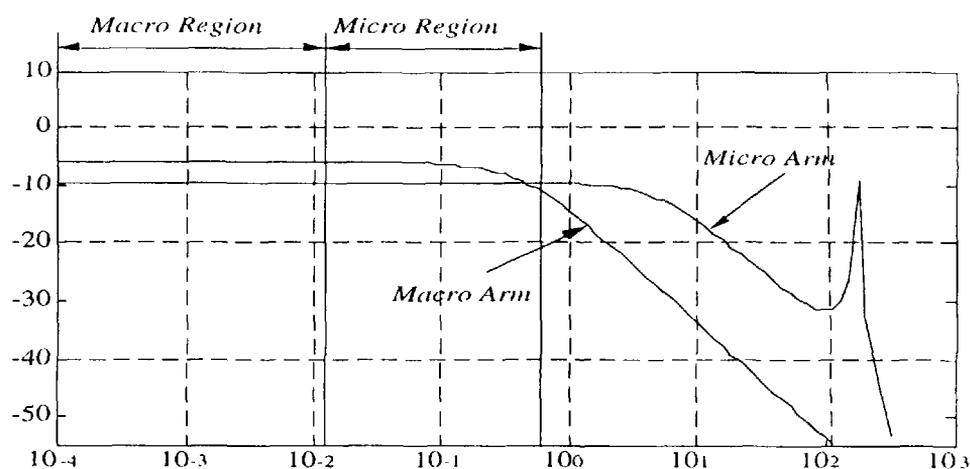


Fig.5-2 Frequency Performance of Macro and Micro Arm

周波数分離制御系の定式化

以下では、マクロ・マイクロアームに対する周波数分離問題を H_∞ 制御問題に帰着して解く。線形化されたマクロ・マイクロアームのシステム方程式を次式で表す。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_a \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ x_a \\ x_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ 0 \\ B_{31} \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} B_{211} & 0 \\ 0 & B_{222} \\ B_{231} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ u_f \end{bmatrix} \quad (5-1-a)$$

$$\begin{bmatrix} y_c \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{211} & 0 & 0 \\ C_{221} & 0 & C_{223} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ x_a \\ x_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{211} \\ D_{212} \end{bmatrix} w \quad (5-1-b)$$

ここで、 x_c はマクロ・アーム状態量であり、 x_a と x_f はそれぞれ艇制御マイクロ・アームのアクチュエータと関節部の状態量である。 w は参照入力及び外乱からなる外部入力ベクトルであり、 u_c と u_f はそれぞれマクロ・アームとマイクロ・アームの制御入力である。 y_c と y_f はマクロ・アームとマイクロ・アームにおける観測量である。(5-1)式を $x = (x_c', x_a', x_f)'$ 、 $u = (u_c', u_f)'$ 、 $y = (y_c', y_f)'$ としてまとめたものを(5-2)式とする。

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \quad (5-2-a)$$

$$y = C_2 x + D_2 w \quad (5-2-b)$$

このシステムに対し周波数分離制御系を構成するために、Fig.5-2のような周波数依存重

み関数を導入する。同図において w_1 はマクロ・アームの軌道誤差に対する重み関数であり、 w_2 はロボットシステム全体の軌道誤差に対する重み関数である。また、 w_3 はマクロ・アームの制御入力に対する重み関数であり、 w_4 はマクロ・アームの制御入力に対する重み関数である。マクロ・アームの動作周波数領域において、マクロ・アームの軌道誤差に対するペナルティである w_1 を大きく、制御入力に対するペナルティである w_3 を小さくとる。一方、マクロ・アームの動作周波数領域においては、 w_2 を大きく、 w_4 を小さくとる。

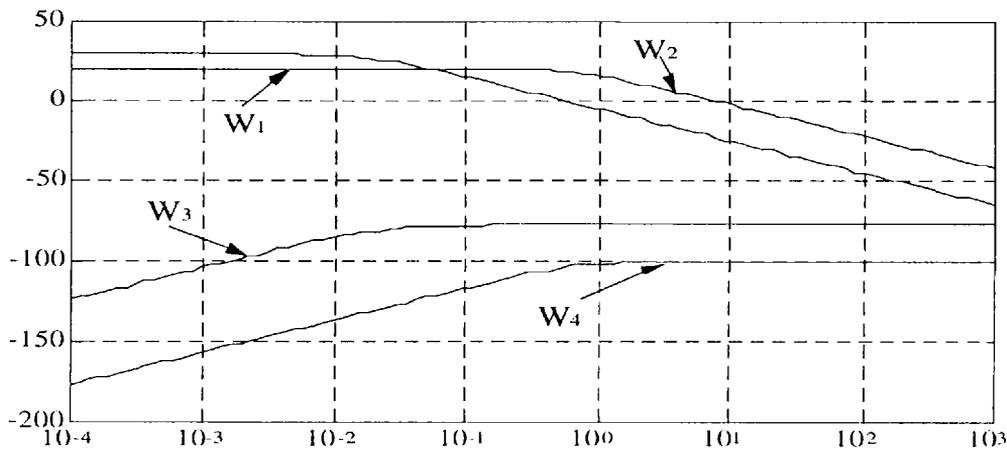


Fig.5-3 Weighting functions

この時、制御出力及び重み関数は以下のように定式化できる。

$$z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \quad (5-3)$$

$$\dot{x}_w = W_A x_w + W_B z \quad (5-4-a)$$

$$\bar{z} = W_C x_w + W_D z \quad (5-4-b)$$

ここで、 x_w は重み関数の状態量である。 $\bar{x} = (x', x_w)'$ として(5-2)~(5-4)をまとめることにより、以下の拡張システムを得る。

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ W_B C & W_A \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} B_1 \\ W_B D_{11} \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} B_2 \\ W_B D_{12} \end{bmatrix} u \\ &= \bar{A} \bar{x} + \bar{B}_1 w + \bar{B}_2 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \bar{A}\bar{x} + \bar{B}_1\mathbf{w} + \bar{B}_2\mathbf{u} \\
 \bar{z} &= [\bar{W}_D\mathbf{C}_1 \ \bar{W}_C]\bar{x} + \bar{W}_D\mathbf{D}_{11}\mathbf{w} + \bar{W}_D\mathbf{D}_{12}\mathbf{u} \\
 &= \bar{C}_1\bar{x} + \bar{D}_{11}\mathbf{w} + \bar{D}_{12}\mathbf{u} \\
 \mathbf{y} &= [\mathbf{C}_2 \ \mathbf{0}]\bar{x} + \mathbf{D}_{12}\mathbf{w} \tag{5-5}
 \end{aligned}$$

問題は、以下のような H_∞ ノルムの条件を満足する安定化出力フィードバック制御器 $\mathbf{u} = \mathbf{K}(s)\mathbf{y}$ を見つける H_∞ 問題に帰着される^{58),59)}.

$$\|\phi(s)\|_\infty < 1 \tag{5-6}$$

ここで、 $\phi(s)$ は外部入力 \mathbf{w} から制御出力 \mathbf{y} への閉ループ伝達関数である.

$$\phi(s) = (\bar{C}_1 + \bar{D}_{12}\mathbf{K}(s))(s\mathbf{I} - (\bar{A} + \bar{B}_2\mathbf{K}(s)))^{-1}\bar{B}_1 + \bar{D}_{11}$$

5.3 協調制御系の構成

マクロ・マイクロアームの協調動作のためにFig.5-4に示すような制御系を組む。

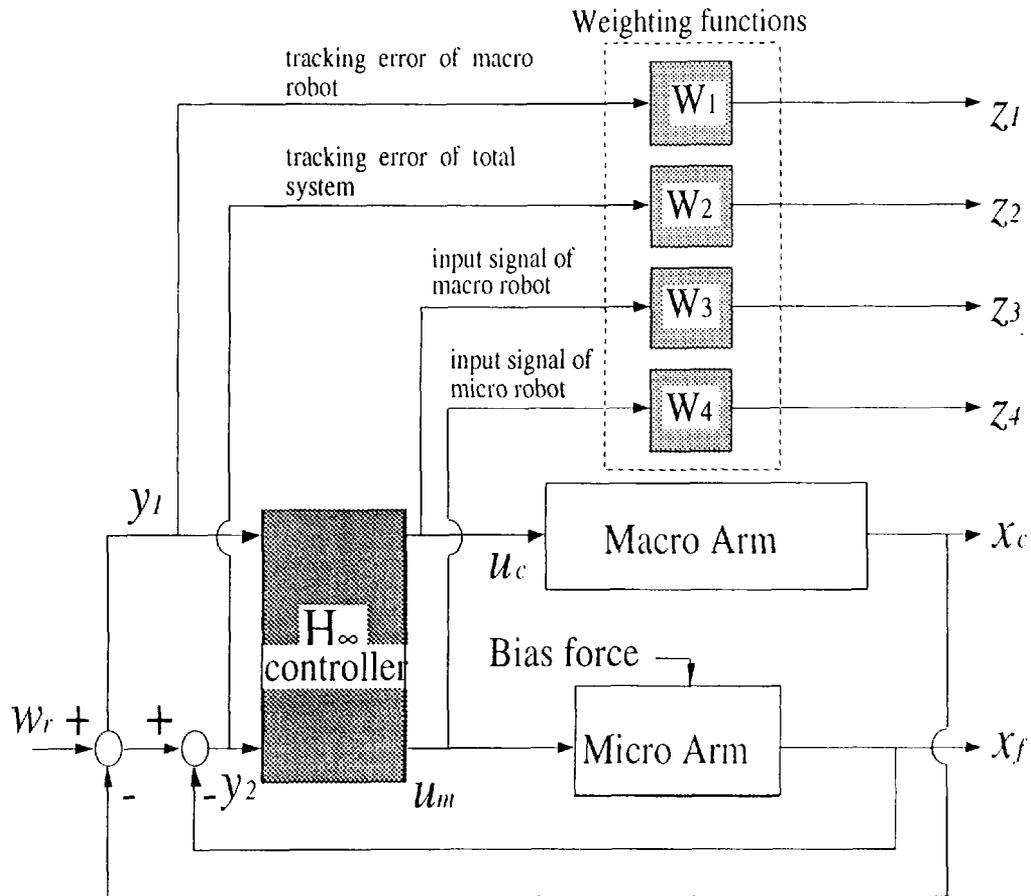


Fig. 5-4 Control System Diagram

以下では、Fig.5-5に示されるマクロ・マイクロシステムについて考える。マイクロ・アームは、2つのアクチュエータを備えた1自由度装置としてモデル化する。また、マクロ・アームは、ダンパーを備えた隼制御装置としてモデル化する。なお、次元を拡張することは容易に可能である。

システム方程式は、以下のようになる。

マクロ・アーム

$$M_c \ddot{x}_c + B_c \dot{x}_c = u_c + f_a - f_b - w_d \tag{5-7-a}$$

マイクロ・アーム

$$m_f \ddot{x}_f = f_b - f_a - m_f \ddot{x}_c + w_d \quad (5-7-b)$$

$$m_a \ddot{x}_a + B_a \dot{x}_a + f_a = u_a \quad (5-7-c)$$

$$m_b \ddot{x}_b + B_b \dot{x}_b + f_b = u_b \quad (5-7-d)$$

$$f_a = \widehat{K}(x_a + x_f) : f_b = \widehat{K}(x_b - x_f) \quad (5-8)$$

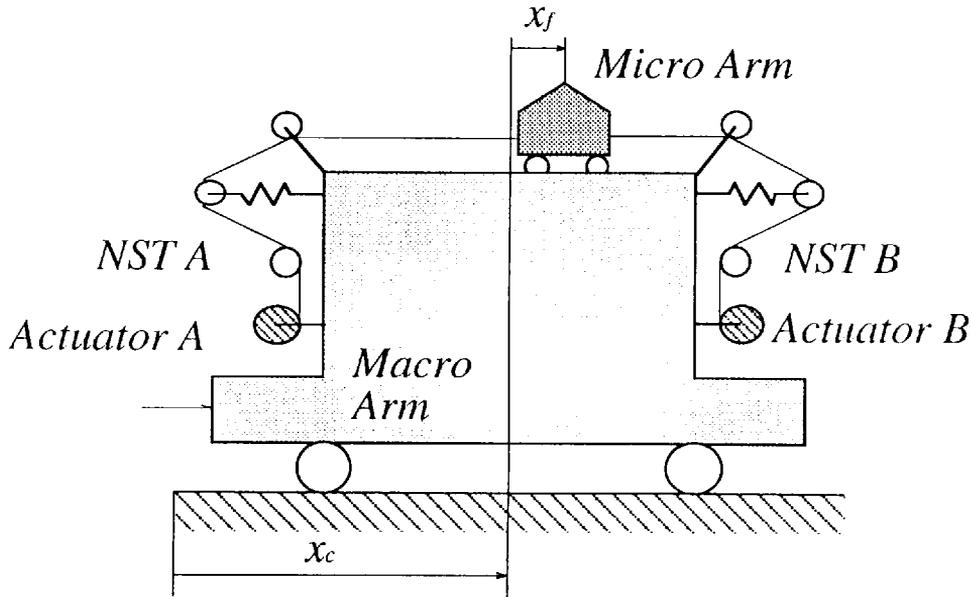


Fig.5-5 1D.O.F model of macro - micro manipulator

ここで、 x_c, x_f, x_a, x_b はそれぞれマクロ・アームの変位、マイクロ・アームの変位、アクチュエータAの変位、アクチュエータBの変位である。また、 M_c, m_f, m_a はそれぞれマクロ・アームの質量、マイクロ・アームの質量、アクチュエータの質量である。 w_d は外乱である。

以下の変数変換を上式に施すと、

$$x_p = x_b + x_a, \quad x_m = x_b - x_a, \quad u_p = u_b + u_a, \quad u_m = u_b - u_a \quad (5-9)$$

システム方程式は次のようになる。

$$M_c \ddot{x}_c + B_c \dot{x}_c = u_c + \widehat{K}x_m - 2\widehat{K}x_f - w_d$$

$$\begin{aligned}
 m_a \ddot{x}_m + B_a \dot{x}_m + \widehat{K}x_m - 2\widehat{K}x_f &= u_m \\
 m_f \ddot{x}_f &= \widehat{K}x_m - 2\widehat{K}x_f - m_f \ddot{x}_c + w_d \\
 m_a \ddot{x}_p + B_a \dot{x}_p + \widehat{K}x_p &= u_p
 \end{aligned} \tag{5-10}$$

ここで使用している艇制御機構の拡張ヤコビ行列は

$$\begin{bmatrix} -J_f \\ \mathbf{n}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

となる。よって、剛性制御変数は

$$s = (f_a + f_b) = \widehat{K}x_p$$

となり、(5-10)の第4式より

$$m_a \ddot{s} + B_a \dot{s} + \widehat{K}s = \widehat{K}u_p$$

を得る。そのため、 x_p が x_c と x_f から非干渉化されているので、 x_p を他の変数より速く制御することにより \widehat{K} が定数とみなせるものと仮定する。

このシステムの制御出力 z は以下のようになる。ここで、 w_{rc} はマクロ・アームの目標位置であり、 w_p は基準に関するロボット先端の目標位置である。

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \\ x_m \\ \dot{x}_m \\ x_f \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{rc} \\ w_r \\ w_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ u_m \end{bmatrix}$$

$$\tag{5-11}$$

以下では、この1自由度マクロ・マイクロ・アームに対するシミュレーション結果を示す。まず、重み関数としてFig.5-6のものを使用し、遅い参照入力として $\sin(t)$ 、速い参照入力として $0.1 \sin(15t)$ を使用したものを示す。Fig.5-7は $\sin(t)$ に対する結果であり同図(a)はそれぞれのアームの応答、アーム先端の応答及び参照入力を示している。同図(b)はそれぞれのアームへの制御入力を示している。この場合は、マクロ・アームが主に動作していてマクロ・アームの位置誤差をマイクロ・アームによって補正できていること

が分かる。

0.1 Sin(15t) に対する結果をFig.5-8 に示す。速い参照入力に対してはマイクロ・アームが主に動作していることが分かる。

このことから、各アームの周波数特性に応じて動作周波数領域を設定することに両アームの動作を周波数分離でき、移動距離が大きい動作速度は遅いような動作をマクロ・アームが、動作速度は速いが移動距離が小さいような動作をマイクロ・アームが担当することができることが分かる。

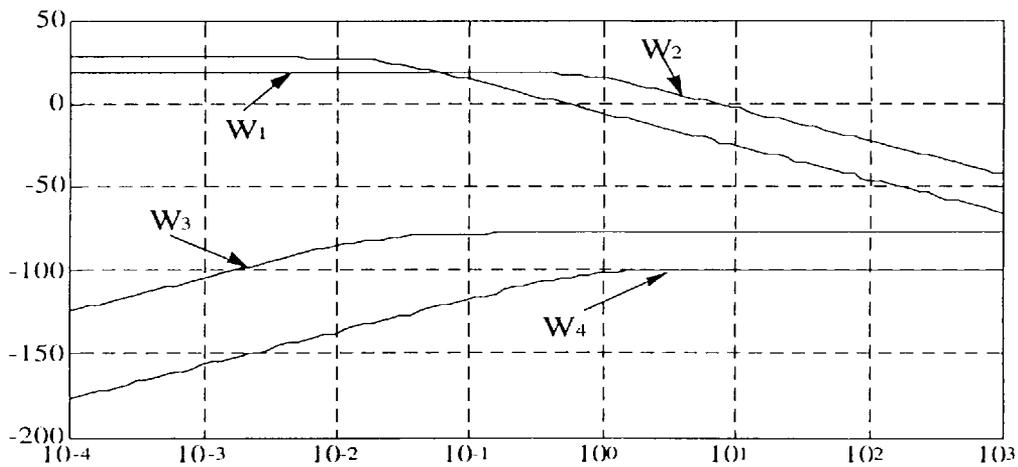
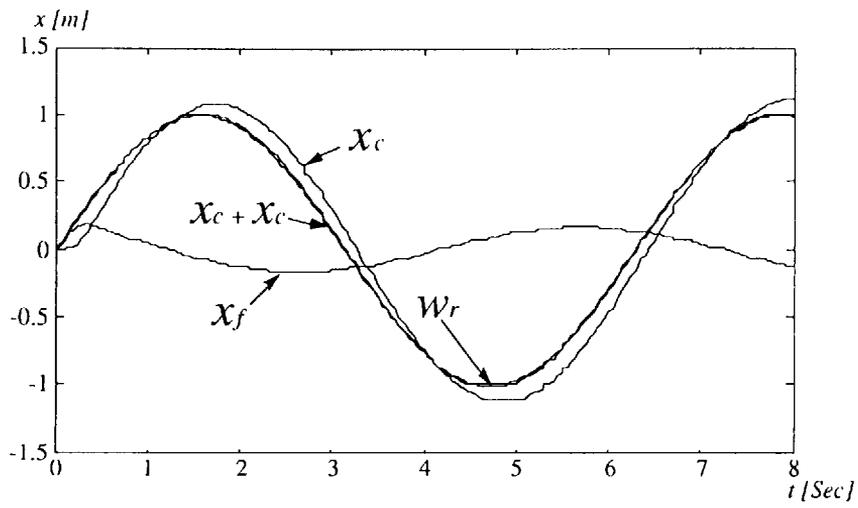
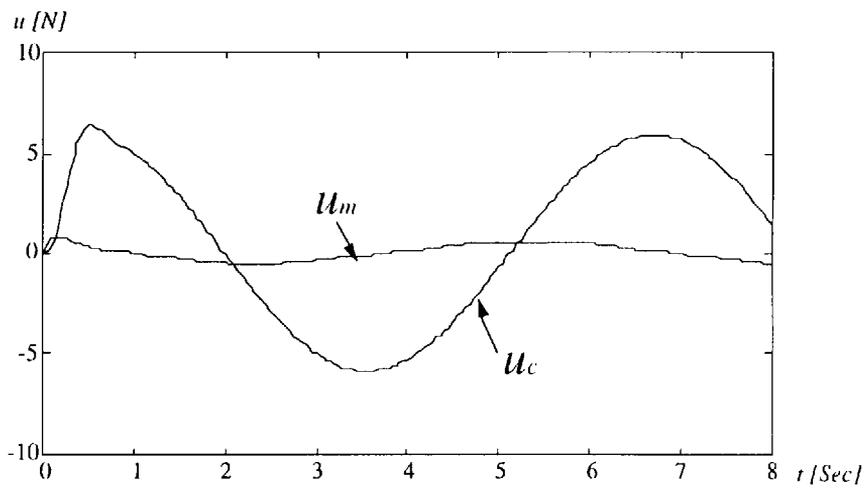


Fig. 5-6 Weighting functions for simulation 1

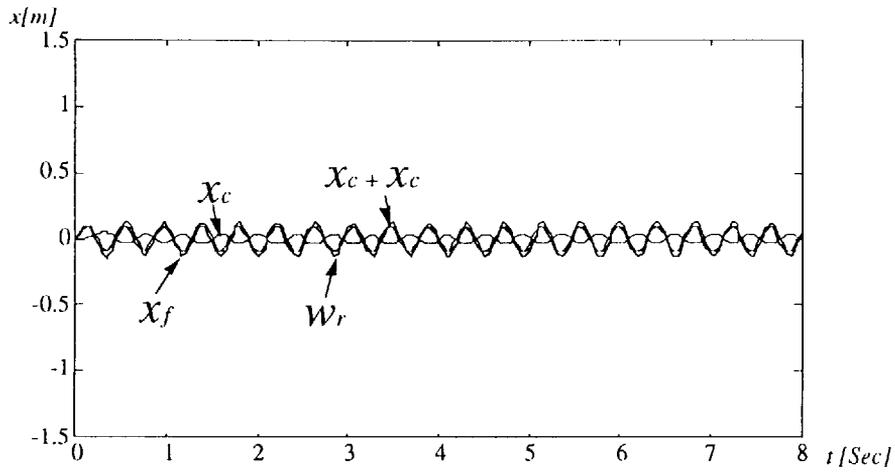


(a)

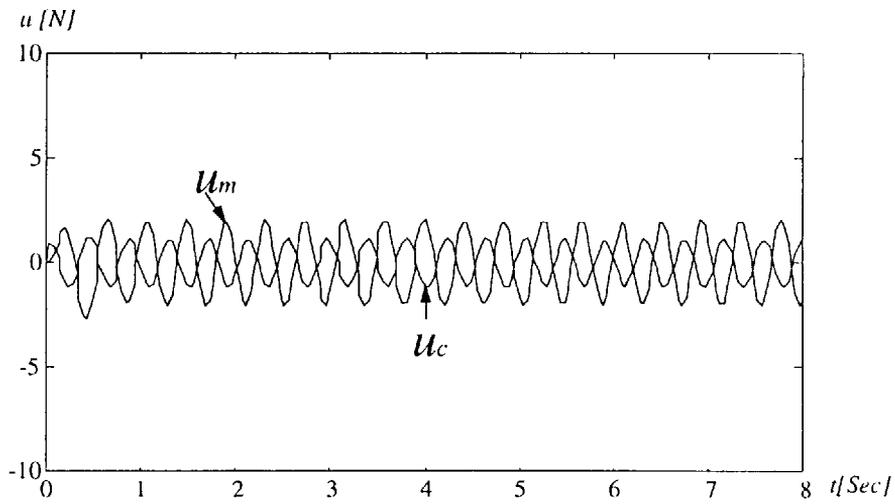


(b)

Fig. 5-7 Simulation results for slow reference (case1)



(a)



(b)

Fig. 5-8 Simulation results for fast reference (case 1)

次に、重み関数として**Fig.5-9**のものを使用し、遅い参照入力として $\text{Sin}(t)$ 、速い参照入力として $0.1 \text{Sin}(10t)$ を使用したものを示す。**Fig.5-10**は $\text{Sin}(t)$ に対する結果である。マクロ・アームに対する重み関数を先の例より高周波側にシフトさせているので、マクロ・アームの動作によってほとんど目標軌道に追従している。そのため、マイクロ・アームの動作が小さくなっている。

$0.1 \text{Sin}(15t)$ に対する結果を**Fig.5-11**に示す。この場合マクロ・アームが速い参照入力に対しても追従しようとしているため、その遅れからマイクロ・アームが先の例より大きく動作することにより軌道への追従を行っている。各アームの制御入力から高周波域においてマクロ・アームが動作することによるマイクロ・アームの制御入力の増大が見られる。

従って、各アームの周波数特性に見合った動作周波数領域を設定しなければ周波数分離による協調制御は有効に働かないことがわかる。

次節では、協調制御を3自由度の艇制御マイクロ・アームと6自由度の産業用ロボット・アームの場合へ拡張を行う。

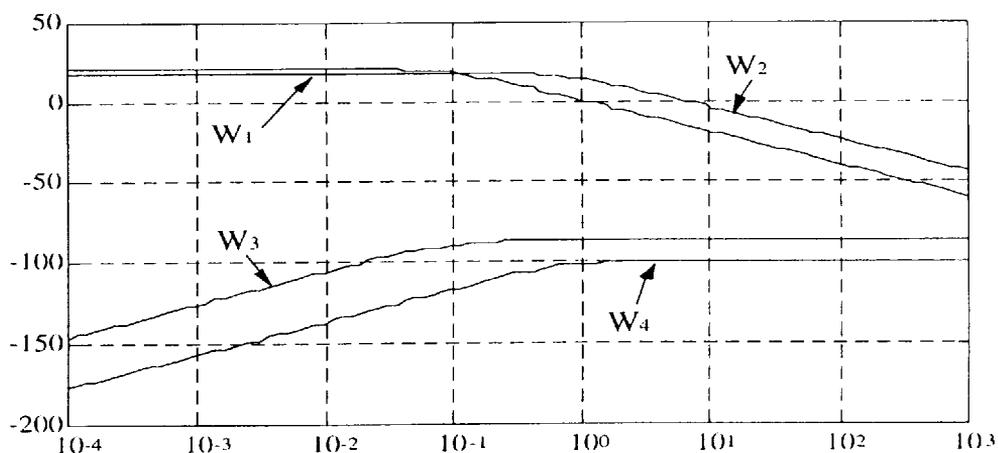
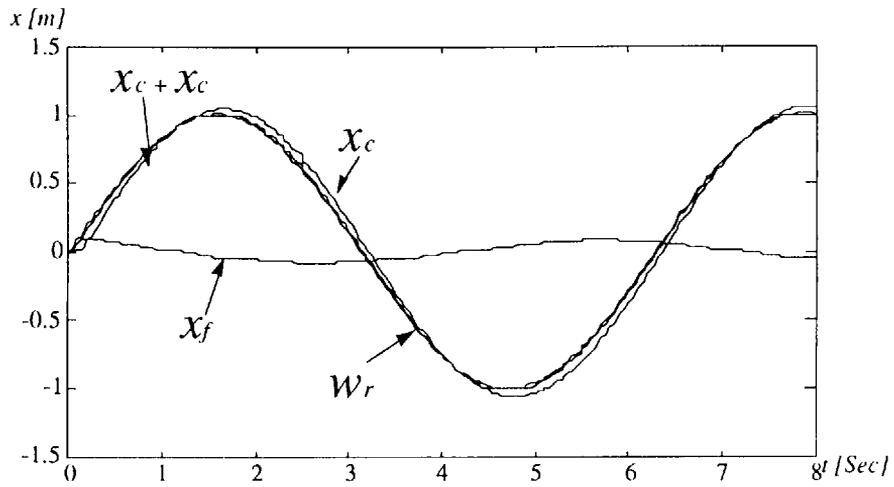
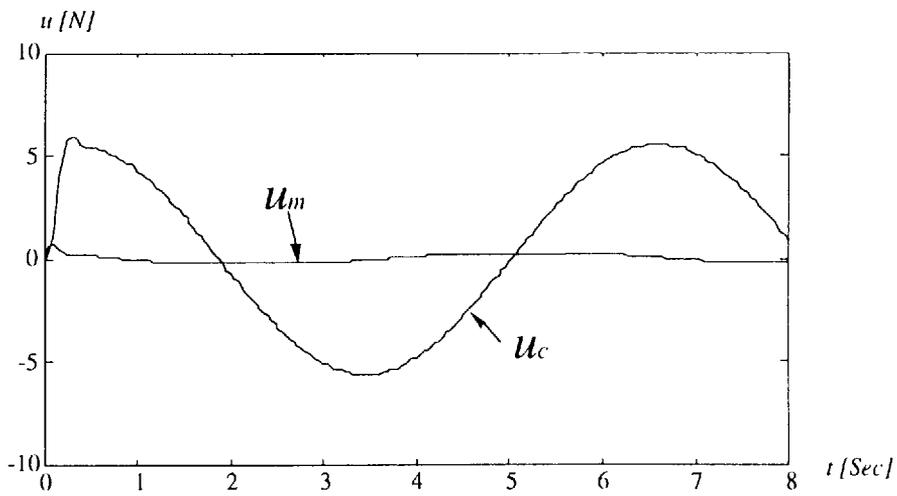


Fig. 5-9 Weighting functions for simulation 2

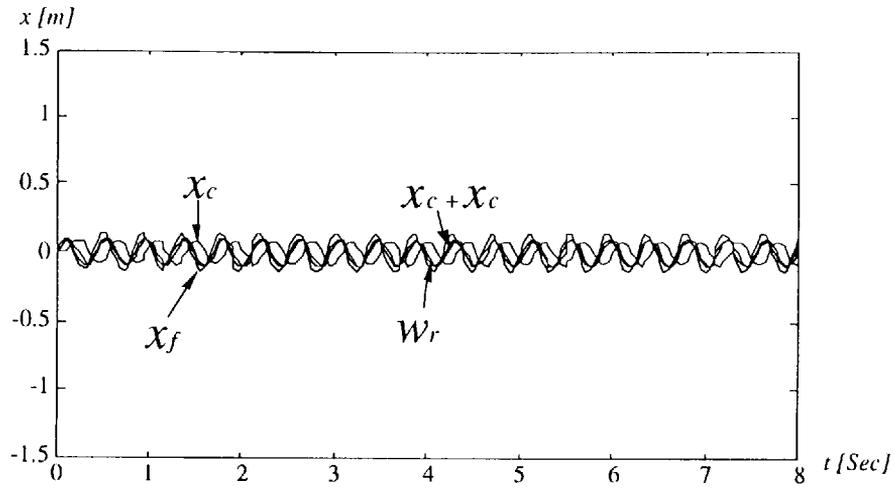


(a)

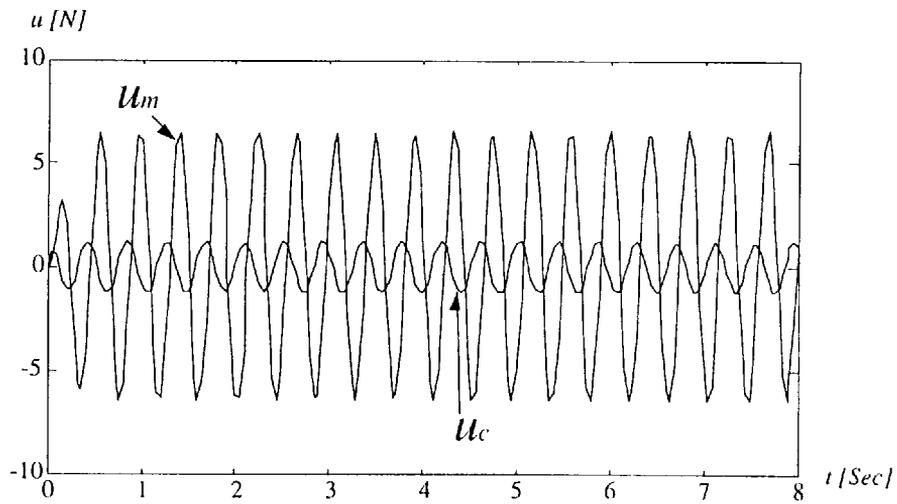


(b)

Fig. 5-10 Simulation results for slow reference (case2)



(a)



(b)

Fig. 5-11 Simulation results for fast reference (case2)

5.4 制御システムの拡張

前節で示した周波数分離による協調制御を、平面内での作業特性の改善のために3自由度の腕制御アーム（マイクロ・アーム）を6自由度の産業用ロボット・アーム（マクロ・アーム）の先端に装着した場合に拡張する。

実験用ロボット・システムの構成をFig. 5-12 に示す。またマイクロ・アームの機構の概要をFig. 5-13 に示す。Fig. 5-13 に示す通り、このマイクロ・アームは4個のアクチュエータによって3個の関節を駆動する機構である。

3次元空間において作業変数を $\mathbf{x} = (x, y, z, \phi_x, \phi_y, \phi_z)'$ とし、 x - y 平面に平行な平面における作業を行うことを考える。この時、作業変数に x, y, ϕ_z に対しては本章で提案する周波数分離によるマクロ-マイクロ・アームの協調制御を行う。一方、作業変数 z, ϕ_x, ϕ_y に対しては作業平面を設定し維持する目的に使用するものとし、マクロ・アームのみによる制御を行う。

マクロ-マイクロ・アームの運動方程式が次式のように表されているとする。

$$\mathbf{M}_M(\boldsymbol{\theta}_c)\ddot{\boldsymbol{\theta}}_c + \mathbf{h}_M(\boldsymbol{\theta}_c, \dot{\boldsymbol{\theta}}_c) + \mathbf{g}_M(\boldsymbol{\theta}_c) + \mathbf{B}_M\dot{\boldsymbol{\theta}}_c = \mathbf{u}_M + \mathbf{J}'_M(\boldsymbol{\theta}_c)F_c \quad (5-12-a)$$

$$\mathbf{M}_m(\boldsymbol{\theta}_f)\ddot{\boldsymbol{\theta}}_f + \mathbf{h}_m(\boldsymbol{\theta}_f, \dot{\boldsymbol{\theta}}_f) + \mathbf{g}_m(\boldsymbol{\theta}_f) = -\mathbf{J}'_f\mathbf{f} + \mathbf{J}'_m(\boldsymbol{\theta}_f)F_f \quad (5-12-b)$$

$$\mathbf{I}_a\ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + \mathbf{B}_a\dot{\boldsymbol{\theta}}_a + r\mathbf{f} = r\mathbf{u}_m \quad (5-12-c)$$

ここで、 $\boldsymbol{\theta}_c, \boldsymbol{\theta}_f, \boldsymbol{\theta}_a$ はそれぞれマクロ・アーム、マイクロ・アーム及びアクチュエータの変位ベクトルであり、 $\mathbf{M}_M, \mathbf{h}_M, \mathbf{g}_M, \mathbf{B}_M, \mathbf{J}_M, \mathbf{u}_M$ はそれぞれマクロ・アームの慣性行列、コリオリ力項ベクトル、重力項ベクトル、粘性摩擦係数、ヤコビ行列及び駆動トルクベクトルである。また $\mathbf{M}_m, \mathbf{h}_m, \mathbf{g}_m, \mathbf{J}_m, \mathbf{J}_f$ はそれぞれマイクロ・アームの慣性行列、コリオリ力項ベクトル、重力項ベクトル、ヤコビ行列及び腕制御機構のヤコビ行列であり、 $\mathbf{I}_a, \mathbf{B}_a, \mathbf{u}_m$ はアクチュエータの慣性、粘性摩擦係数及び駆動トルクベクトルである。さらに、

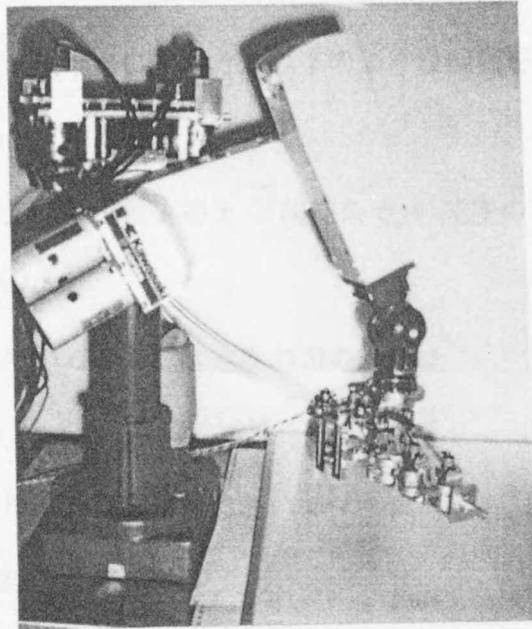


Fig. 5-12 Experiment System

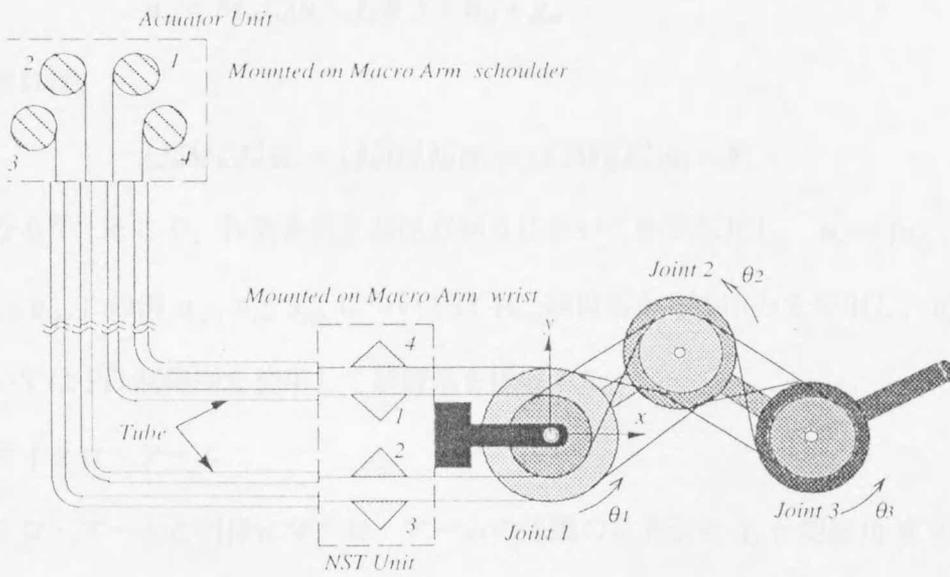


Fig. 5-13 Micro Arm Mechanism

F_f はマイクロ・アームに加わる外力ベクトルであり、 F_c はマイクロ・アームからマクロ・アームに加わる力・トルクベクトルである。

まず、コリオリ力・重力項影響を取り除き作業空間における制御を行いやすいようにマクロ・マイクロ・アームにそれぞれ以下のような制御を行う。

マクロ・アーム：

マクロ・アームの先端の位置姿勢 x_c と関節角 θ_c の速度の間にはヤコビ行列を介して

$$\dot{x}_c = J_M \dot{\theta}_c \quad (5-13)$$

なる関係が成立しているので、加速度の間の関係は

$$\ddot{x}_c = J_M \ddot{\theta}_c + \dot{J}_M \dot{\theta}_c \quad (5-14)$$

となる。よって、作業を行う領域においてマクロ・アームのヤコビ行列 J_M が正則であると仮定すると(5-12-a)式から

$$(J_M^T M_M J_M^T) \ddot{x}_c + J_M^T B_M J_M^T \dot{x}_c + J_M^T (h_M + g_M - M_M J_M^T \dot{J}_M \dot{\theta}_c) = J_M^T u_M + F_c \quad (5-15)$$

を得る。そこで、制御入力 u_M を新しい制御入力 u_c を用いて

$$u_M = M_M J_M^T (u_c - \dot{J}_M \dot{\theta}_c) + h_M + g_M \quad (5-16)$$

とすれば、

$$(J_M^T M_M^T J_M^T) \ddot{x}_c + (J_M^T B_M^T J_M^T) \dot{x}_c = (J_M^T M_M^T J_M^T) u_c + F_c \quad (5-17)$$

となる⁶⁰⁾。そこで、作業を行う基準点回りにおいてを線形化し、 $u_c = (u_{cx}, u_{cy}, u_{cz}, u_{c\phi}, u_{c\psi}, u_{c\theta_z})^T$ の内 $u_{cx}, u_{cy}, u_{c\theta_z}$ については H_∞ 制御器からの出力を使用し、 $u_{cz}, u_{c\phi}, u_{c\psi}$ については PD 制御則を使用して制御系を構成する。

マイクロ・アーム：

マクロ・アームと同様にマクロ・アームの先端の位置姿勢 x_f と関節角 θ_f の加速度の間には

$$\dot{\mathbf{x}}_f = \mathbf{J}_m \ddot{\boldsymbol{\theta}}_f + \dot{\mathbf{J}}_m \dot{\boldsymbol{\theta}}_f \quad (5-18)$$

が成立し、作業を行う領域においてマクロ・アームのヤコビ行列 \mathbf{J}_m が正則であると仮定すると(5-12-b)式から

$$(\mathbf{J}_m^T \mathbf{M}_m \mathbf{J}_m^{-1}) \dot{\mathbf{x}}_f + \mathbf{J}_m^{-1} (\mathbf{h}_m + \mathbf{g}_m - \mathbf{M}_m \mathbf{J}_m^{-1} \dot{\mathbf{J}}_m \dot{\boldsymbol{\theta}}_f) = -\mathbf{J}_m^{-1} \mathbf{J}_f^T \mathbf{f} + \mathbf{F}_f \quad (5-19)$$

であるので、

$$-\mathbf{J}_m^{-1} \mathbf{J}_f^T \mathbf{f} = \mathbf{M}_m \mathbf{J}_m^{-1} (\mathbf{u}_f - \dot{\mathbf{J}}_m \dot{\boldsymbol{\theta}}_f) + \mathbf{h}_m + \mathbf{g}_m \quad (5-20)$$

となるように制御を行えば

$$(\mathbf{J}_m^T \mathbf{M}_m^{-1} \mathbf{J}_m^{-1}) \dot{\mathbf{x}}_f = (\mathbf{J}_m^T \mathbf{M}_m^{-1} \mathbf{J}_m^{-1}) \mathbf{u}_f + \mathbf{F}_f \quad (5-21)$$

となる。そこで、 $\mathbf{u}_f = (u_{fx}, u_{fy}, u_{f\phi})^T$ を H_∞ 制御器によって生成されたものを使用する。

第6章

7自由度腱制御アームの制御

6.1 はじめに

第6章では、7自由度腱制御アームの制御について述べる。本章で対象とする腱制御アームは肩部に3自由度、肘部に1自由度、手首部に3自由度の計7自由度を有するロボットアームであり、人間の腕の形態・サイズとほぼ同じになっている。7つの関節は10個のアクチュエータによって駆動される。この腱制御アームに対し、第1部において述べた理論の拡張を行う。以下では、6.2節において7自由度腱制御アームの機構の概要を述べ、6.3節において本アームにおける剛性制御変数の導入及び腱張力の算出法を述べる。最後に6.4節において基礎実験により本アームの有効性を示す。

6.2 7自由度腱制御アームの概要

本章で、対象とする7自由度腱制御アームの関節配置をFig.6-1に示す。同図に示すように、本アームは人間の腕とほぼ同一の形態と同一のサイズを持つ7自由度アーム⁶¹⁾である。人間の腕とほぼ同一の形態・サイズを持つことにより、人間との協調動作を行う際の制御系の構築が容易となる。7自由度アームに関しては、従来より関節数の冗長性の利用法に関する研究が行われており^{62),63)}、本章で提案する可変剛性機能を備えることにより、作業に対する汎用性をさらに向上させることができる。

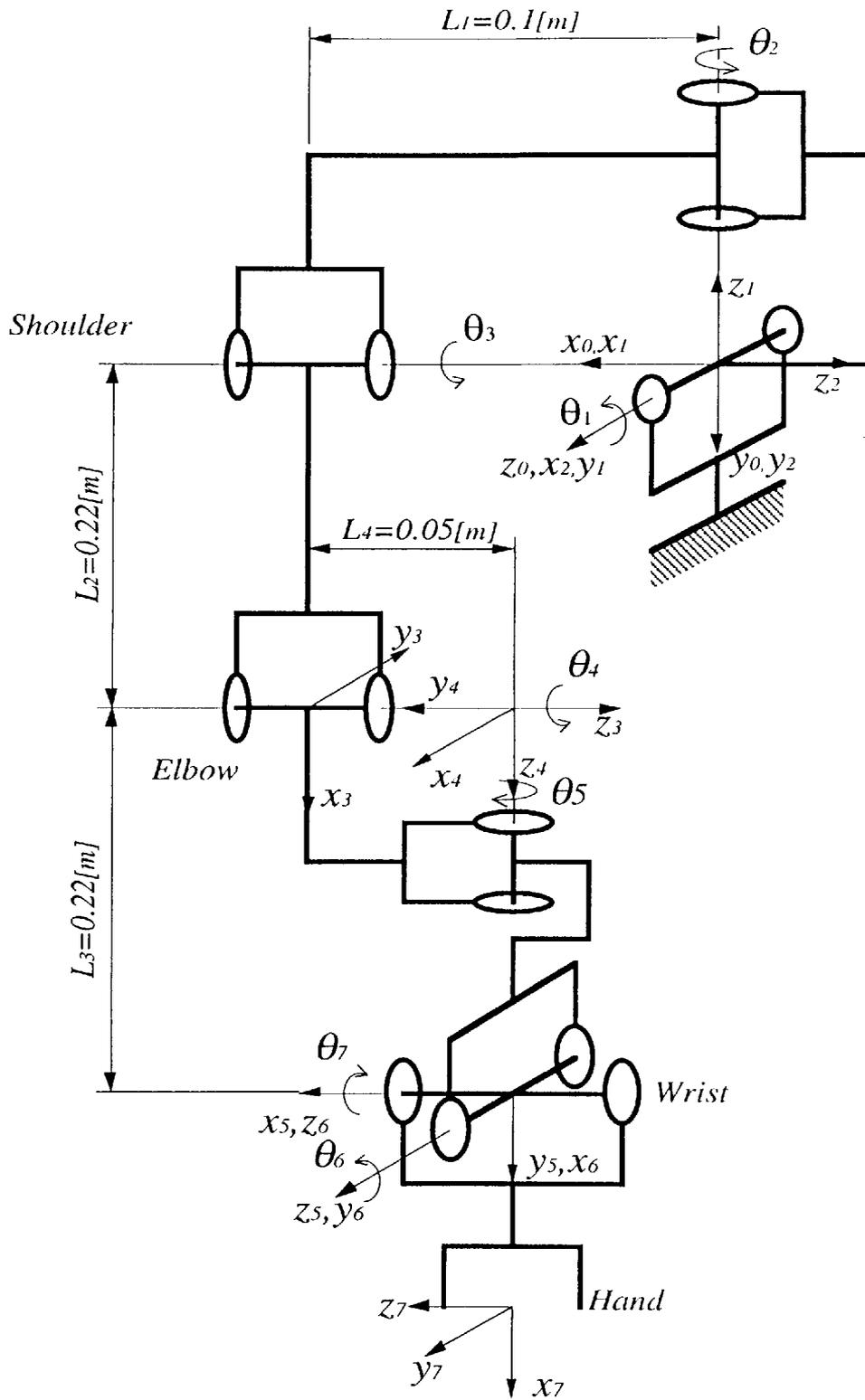


Fig. 6-1 Structure of 7D.O.F. Tendon-controlled Arm

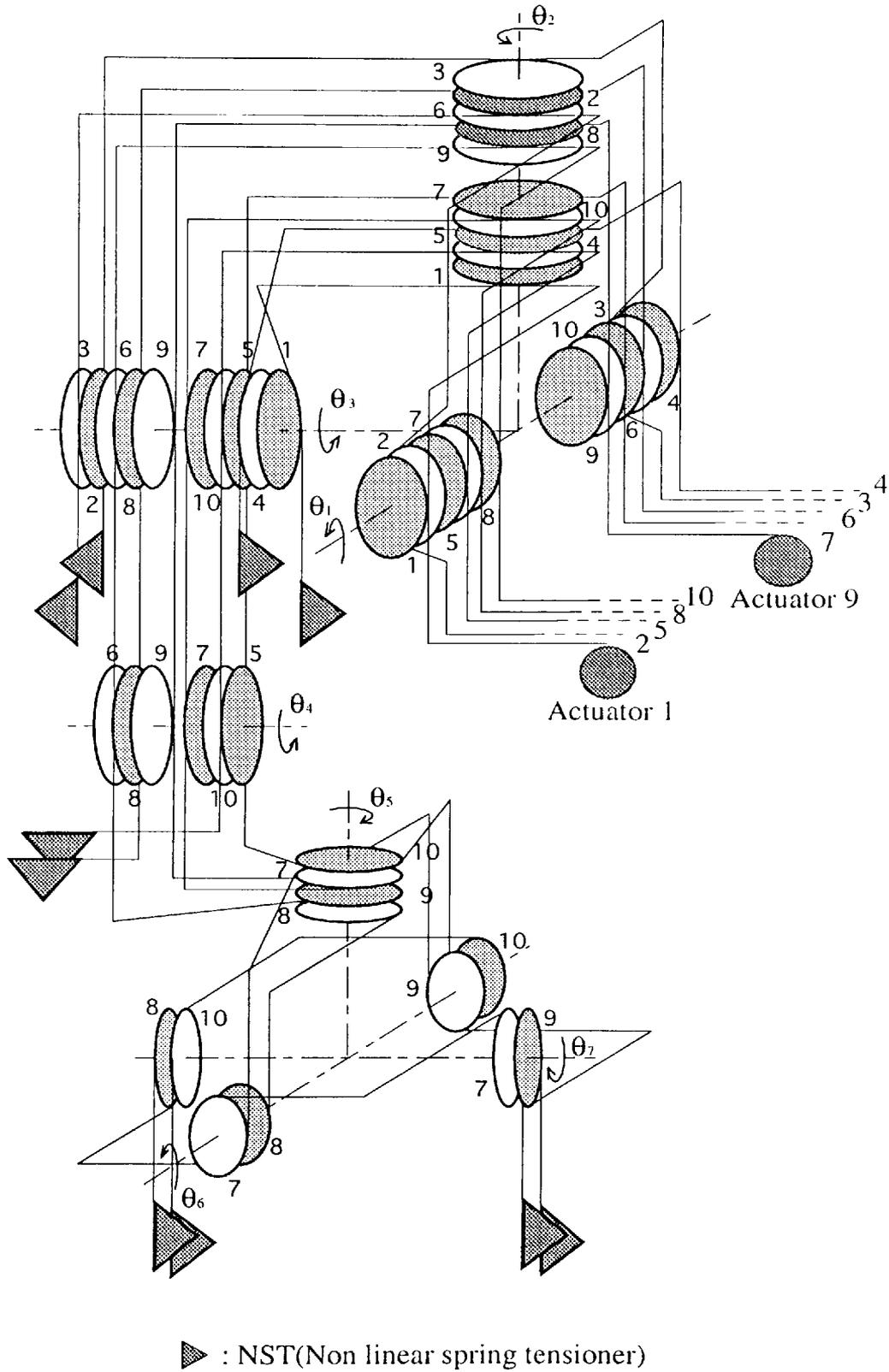


Fig. 6-2 Wire network of 7D.O.F. Tendon-controlled Arm

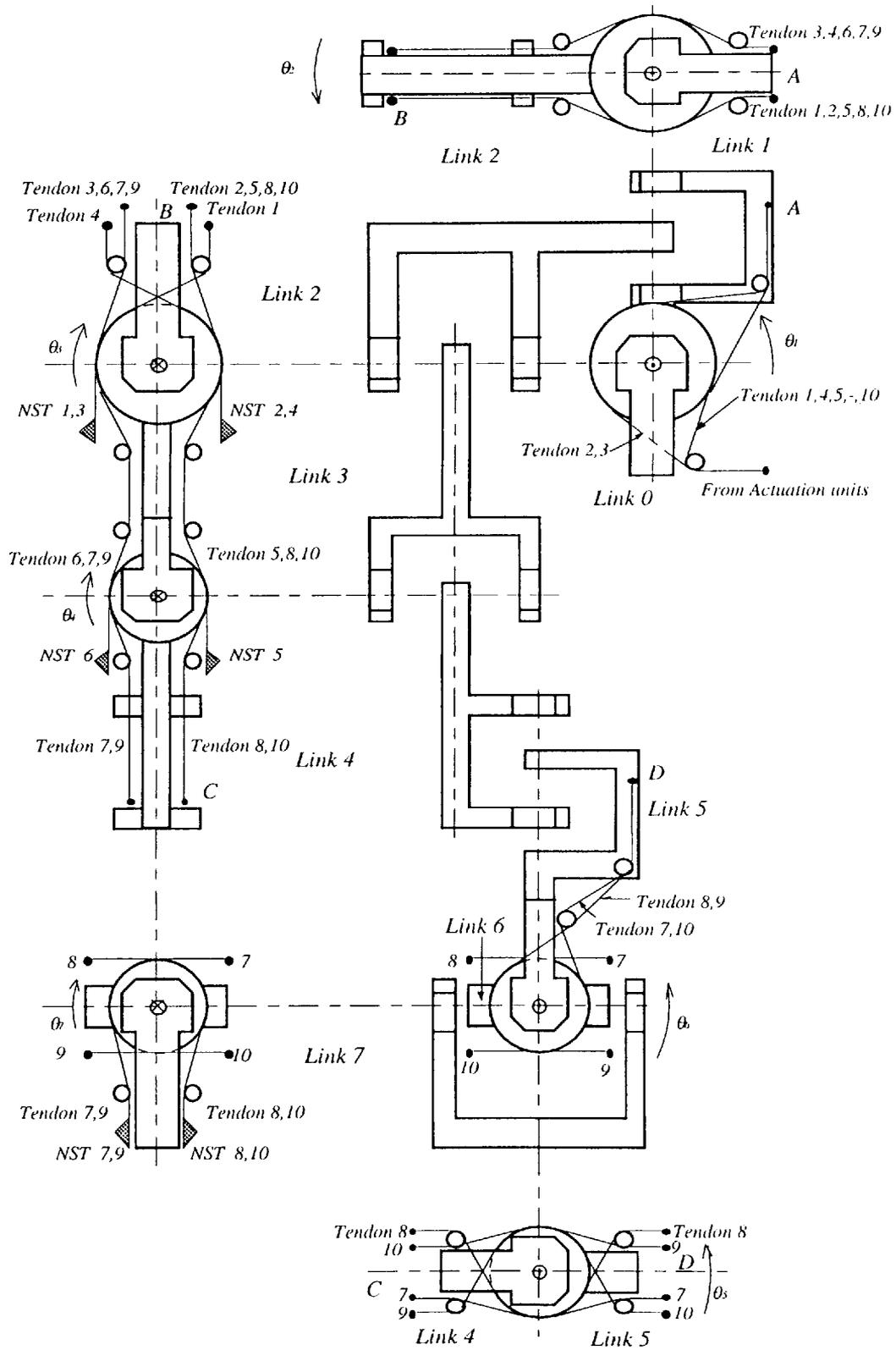


Fig. 6-3 Wiring of 7D.O.F. Tendon-controlled Arm

同アームを駆動するため10本の腱をFig. 6-2のように配置する。Fig. 6-3のように各関節軸回りの腱を配置し、肩部の3関節を駆動するために4本の腱、肘部の1関節を駆動するために2本の腱、手首部の3関節を駆動するために4本の腱を使用する構成を採っている。この時、本アームにおける腱制御機構のヤコビ行列は以下ようになる。

$$J_f = \begin{bmatrix} R_1 & -R_1 & -R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_1 & -R_1 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_1 & R_1 & -R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & R_1 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & -R_1 & R_1 & -R_2 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & R_1 & -R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ R_2 & R_2 & -R_2 & R_2 & R_3 & -R_3 & R_3 \\ R_2 & -R_2 & R_2 & -R_2 & R_3 & R_3 & -R_3 \\ R_2 & R_2 & -R_2 & R_2 & -R_3 & R_3 & R_3 \\ R_2 & -R_2 & R_2 & -R_2 & -R_3 & -R_3 & -R_3 \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

6.3 剛性制御変数の構成及び腱張力の算出

本節では7自由度腱制御アームの剛性制御変数の構成及び腱張力の算出について述べる。本アームでは、関節数7に対してアクチュエータ数10であるので、駆動冗長度は3である。従って、関節空間における剛性行列 $J_f^t K_m J_f$ (7×7)の28個の要素のうち3個の要素を調整することが可能である。そこで、剛性行列 $J_f^t K_m J_f$ の(1, 1)要素、(4, 4)要素及(5, 5)要素を調整量として選ぶ。それぞれの調整量は腱 i のNSTの剛性 e_i に対して次式のように表されている。

$$\begin{aligned} (J_f^t K_m J_f)_{1,1} &= \sum_{i=1}^6 R_1^2 e_i + \sum_{j=7}^{10} R_2^2 e_j \\ (J_f^t K_m J_f)_{4,4} &= \sum_{j=5}^{10} R_2^2 e_j \\ (J_f^t K_m J_f)_{5,5} &= \sum_{j=7}^{10} R_3^2 e_j \end{aligned} \quad (6-2)$$

そこで、剛性制御変数を構成するための n_1, n_2, n_3 を以下のようにする。

$$n_j^t = (R_1^2, R_1^2, R_1^2, R_1^2, R_2^2, R_2^2, R_2^2, R_2^2, R_2^2, R_2^2)(I_{10} - J_f^+ J_f^t),$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_2^t &= (0, 0, 0, 0, R_2^2, R_2^2, R_2^2, R_2^2, R_2^2, R_2^2)(I_{10} - \mathbf{J}_f^+ \mathbf{J}_f^t), \\ \mathbf{n}_3^t &= (0, 0, 0, 0, 0, 0, R_3^2, R_3^2, R_3^2, R_3^2)(I_{10} - \mathbf{J}_f^+ \mathbf{J}_f^t) \end{aligned} \quad (6-3)$$

この時、剛性制御を行うためのバイアス張力は

$$\mathbf{f}_b = \begin{bmatrix} \frac{1}{4R_1^2} & -\frac{1}{2R_2^2} & \frac{2R_1^2 - R_1R_2 - R_2^2}{4R_1^2 R_3^2} \\ \frac{1}{4R_1^2} & 0 & \frac{R_1R_2 - R_2^2}{4R_1^2 R_3^2} \\ \frac{1}{4R_1^2} & 0 & \frac{R_1R_2 - R_2^2}{4R_1^2 R_3^2} \\ \frac{1}{4R_1^2} & -\frac{1}{2R_2^2} & \frac{2R_1^2 - R_1R_2 - R_2^2}{4R_1^2 R_3^2} \\ 0 & \frac{1}{2R_2^2} & \frac{-1}{2R_3^2} \\ 0 & \frac{1}{2R_2^2} & \frac{-1}{2R_3^2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{4R_3^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

となり、剛性行列 $\mathbf{J}_f^t \mathbf{K}_m \mathbf{J}_f$ は以下のように調整される。

$$\mathbf{J}_f^t \mathbf{K}_m \mathbf{J}_f = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & K_{c1}s_2 + K_{c2}s_3 & K_{c3}s_2 + K_{c4}s_3 & 0 & 0 & K_{c5}s_3 \\ 0 & K_{c1}s_2 + K_{c2}s_3 & s_1 & -K_{c3}s_2 - K_{c4}s_3 & 0 & 0 & -K_{c5}s_3 \\ 0 & K_{c3}s_2 + K_{c4}s_3 & -K_{c3}s_2 - K_{c4}s_3 & s_2 & 0 & 0 & K_{c5}s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_3 & 0 \\ 0 & K_{c5}s_3 & -K_{c5}s_3 & K_{c5}s_3 & 0 & 0 & s_3 \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

ここで、 $K_{c1} = \frac{-2R_1^2}{R_2^2}$, $K_{c2} = \frac{2R_1^2 - R_1R_2 - R_2^2}{R_3^2}$, $K_{c3} = \frac{R_1}{R_2}$, $K_{c4} = \frac{R_1R_2 - R_2^2}{R_3^2}$, $K_{c5} = \frac{R_2}{R_3}$

である。

次に、腱張力の算出について述べる。腱張力 f と関節トルク τ 、剛性制御変数 s との間の関係が

$$\begin{bmatrix} \tau \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J' \\ N' \end{bmatrix} f = \begin{bmatrix} -J' \\ n_1' \\ n_2' \\ n_3' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_s \\ f_e \\ f_w \end{bmatrix} \quad (6-6)$$

ここで、 $f_s=(f_1, f_2, f_3, f_4)'$, $f_e=(f_5, f_6)'$, $f_w=(f_7, f_8, f_9, f_{10})'$

であるので、以下の(6-7)式の拘束を満足する腱張力を求める問題を考える。

$$\begin{aligned} \tau &= -J_f' f \\ n_1' f &\geq \hat{s}_1 \\ n_2' f &\geq \hat{s}_2 \\ n_3' f &\geq \hat{s}_3 \\ f_i &\geq f_m \quad i=1, 2, \dots, 10 \end{aligned} \quad (6-7)$$

ここで、腱制御機構のヤコビ行列の逆行列を

$$\begin{bmatrix} -J' \\ \dots \\ N' \end{bmatrix}^{-1} = [B_1 \quad \dots \quad B_2]$$

とすると、腱張力 f は関節トルク τ 、剛性制御変数 s に対して

$$\begin{bmatrix} f_s \\ f_e \\ f_w \end{bmatrix} = B_1 \tau + B_2 s = \begin{bmatrix} B_{1s} \\ B_{1e} \\ B_{1w} \end{bmatrix} \tau + \begin{bmatrix} b_{s1} & b_{s2} & b_{s3} \\ 0 & b_{e2} & b_{e3} \\ 0 & 0 & b_{w3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (6-8)$$

となる。(6-8)式の右辺第2項の係数行列がブロック三角構造をしているので、腱張力の算出は、拘束条件を満足する手首部の腱張力を最初に求め、次に肘部の腱張力を、最後に肩部の腱張力を求めるという、3個の部分に分けることができる。つまり、目標関節トルクを達成することを第1の目標に、手首部の剛性の目標値からの上昇を抑えることを第2の目標に、肘部及び肩部の剛性の上昇を抑えることをそれぞれ第3、第4の目標として、拘束を満足する腱張力を算出する。上記のような関節剛性の上昇に対する優先順位を設けることにより、環境との相互作用が大きく剛性制御の重要性が高い、アームの先端の

部位ほど目標剛性を達成し易くすることが可能となる。

a) 手首部の張力 f_w の算出

(6-8)の手首部に関する式は

$$\begin{aligned} f_w &= \mathbf{B}_{lw} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{b}_{w3} s_3 \\ &= \begin{bmatrix} f_{l7} \\ f_{l8} \\ f_{l9} \\ f_{l10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{w31} \\ b_{w32} \\ b_{w33} \\ b_{w34} \end{bmatrix} s_3 \end{aligned} \quad (6-9)$$

となるので、 s_3^* は以下のように求まる。

$$s_3^* = \max \left\{ \frac{f_m - f_{l7}}{b_{w31}}, \frac{f_m - f_{l8}}{b_{w32}}, \frac{f_m - f_{l9}}{b_{w33}}, \frac{f_m - f_{l10}}{b_{w34}}, \widehat{s}_3 \right\} \quad (6-10)$$

b) 肘部の張力 f_e の算出

(6-8)よりの肘部に関する式は

$$\begin{aligned} f_e &= (\mathbf{B}_{le} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{b}_{e3} s_3^*) + \mathbf{b}_{e2} s_2 \\ &= \begin{bmatrix} f_{l5} \\ f_{l6} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{e21} \\ b_{e22} \end{bmatrix} s_2 \end{aligned} \quad (6-11)$$

となるので、 s_2^* は以下のように求まる。

$$s_2^* = \max \left\{ \frac{f_m - f_{l5}}{b_{e21}}, \frac{f_m - f_{l6}}{b_{e22}}, \widehat{s}_2 \right\} \quad (6-12)$$

c) 肩部の張力 f_s の算出

$$\begin{aligned} f_s &= (\mathbf{B}_{ls} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{b}_{s3} s_3^* + \mathbf{b}_{s2} s_2^*) + \mathbf{b}_{s1} s_1 \\ &= \begin{bmatrix} f_{l1} \\ f_{l2} \\ f_{l3} \\ f_{l4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{s11} \\ b_{s12} \\ b_{s13} \\ b_{s14} \end{bmatrix} s_1 \end{aligned} \quad (6-13)$$

となるので、 s_1^* は以下のように求まる。

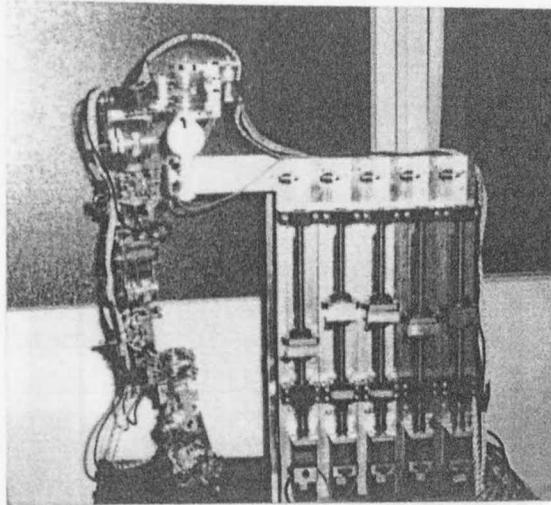
$$s_1^* = \max \left\{ \frac{f_m - f_{l1}}{b_{s11}}, \frac{f_m - f_{l2}}{b_{s12}}, \frac{f_m - f_{l3}}{b_{s13}}, \frac{f_m - f_{l4}}{b_{s14}}, \widehat{s}_1 \right\} \quad (6-14)$$

以上のようにして、拘束条件を満足する腱張力 f 算出することができる。

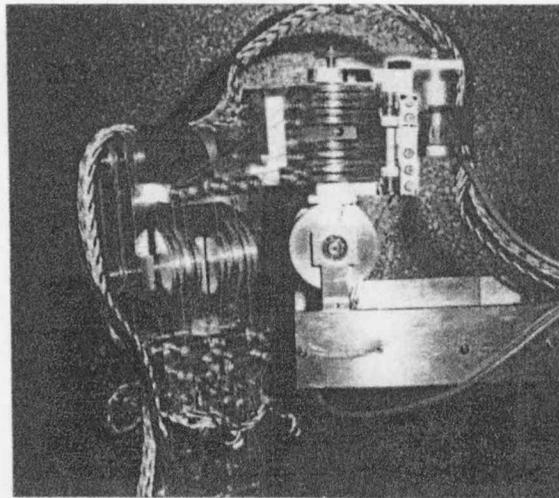
6.4 制御

6.4.1 実験システムの概要

Fig. 6-4 に試作した7自由度腱制御アームを、**Fig. 6-5** に実験システムの構成図を示す。**Fig. 6-4 (a)** は試作した7自由度腱制御アーム・システムの全景を、同図**(b)~(d)**はそれぞれ肩部、肘部及び手首部の構造を示している。アクチュエータとして10台のDCモータ(20W)を使用しボールネジを介し腱を駆動している。関節角は関節軸に付けたエンコーダで、腱の長さはモータ軸に付けたエンコーダにて検出する。また、非線形バネ要素に取り付けたポテンシオメータによりNST内部のバネの変位を測定し、その値から腱張力を算出している。制御用コントローラにはトランスペュータを用いて構築した並列処理システムを使用している。**Fig. 6-5**における T_i ($i=0,1,\dots,8$)はそれぞれ1つのトランスペュータを示している。 T_1 及び T_2 は7自由度腱制御アームの動力学計算を行い、 T_3 は7自由度腱制御アームのヤコビ行列の算出を行っている。また、 T_4 は目標軌道の算出を、 T_5 は目標関節トルクの算出を、 T_7 は目標張力の算出を行い、 T_6 は張力制御演算を行っている。さらに、 T_8 と T_0 は入出力処理、モニター機能を受け持っている。このように機能分散を行うことにより5[msec]のサーボサイクルを実現できている。

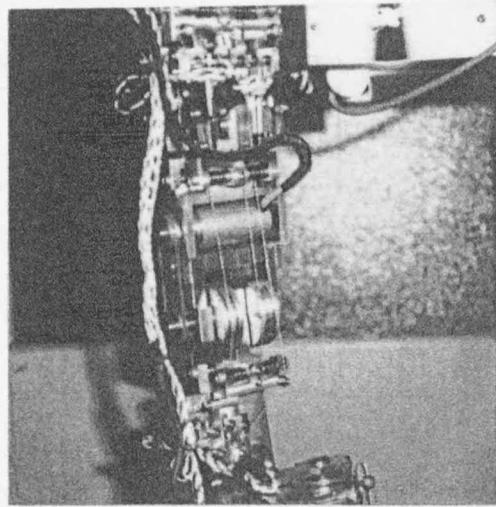


(a)

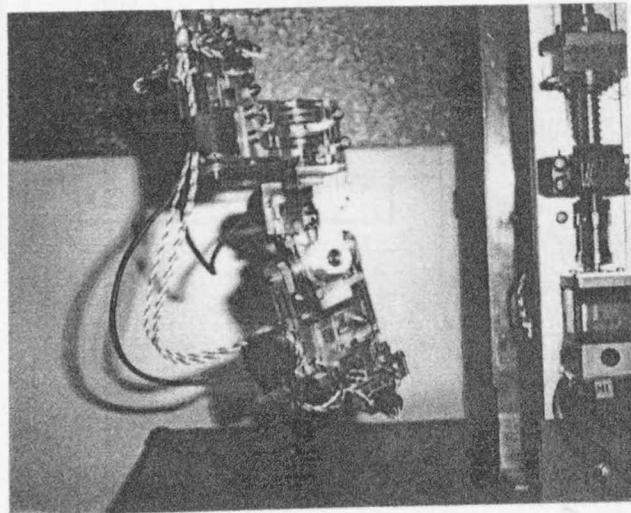


(b)

Fig. 6-4 7 D.O.F. Tendon-controlled Arm



(c)



(d)

Fig. 6-4 7 D.O.F. Tendon-controlled Arm

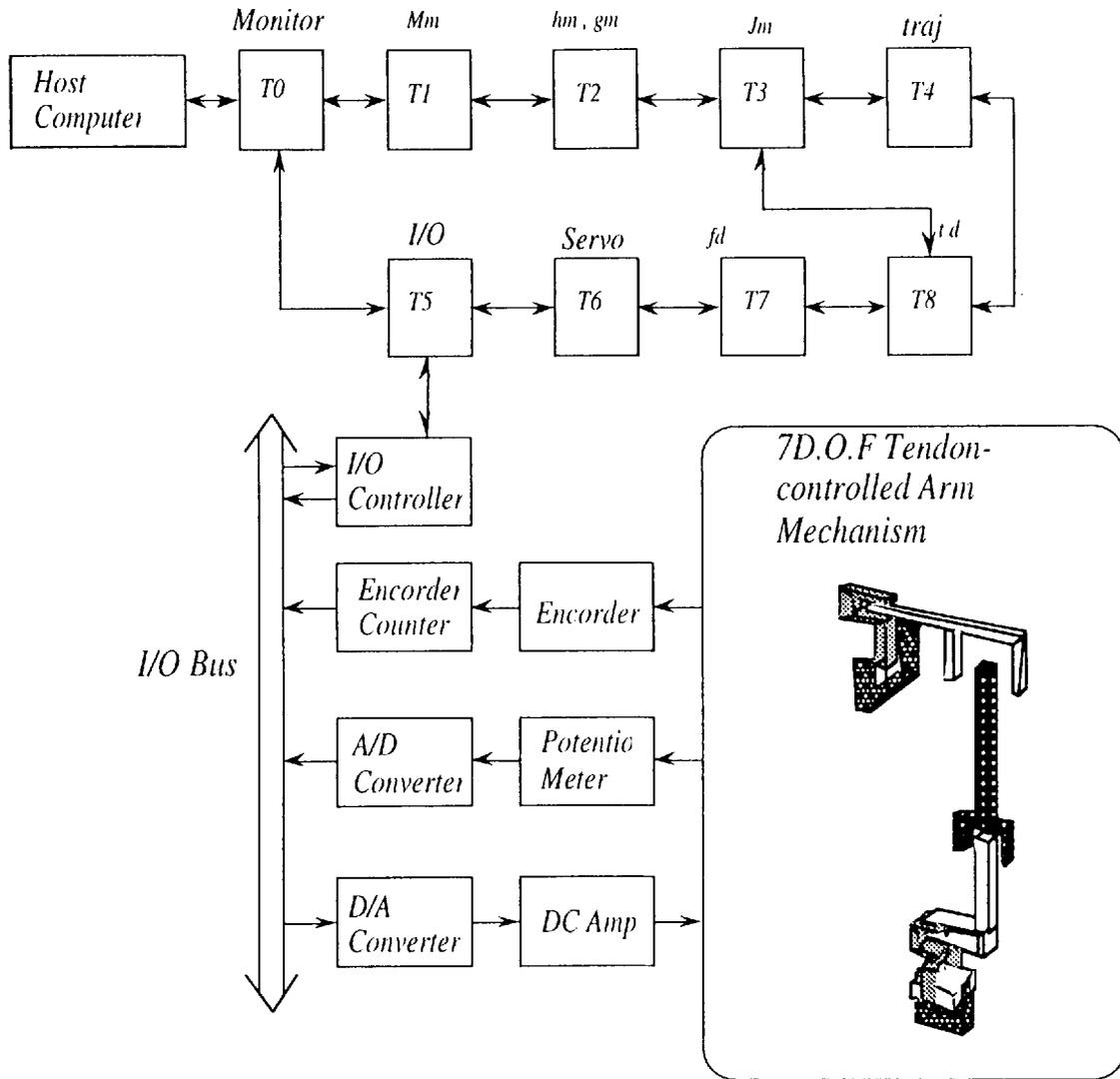


Fig. 6-5 Controller system for 7 D.O.F Tendon-controlled Arm

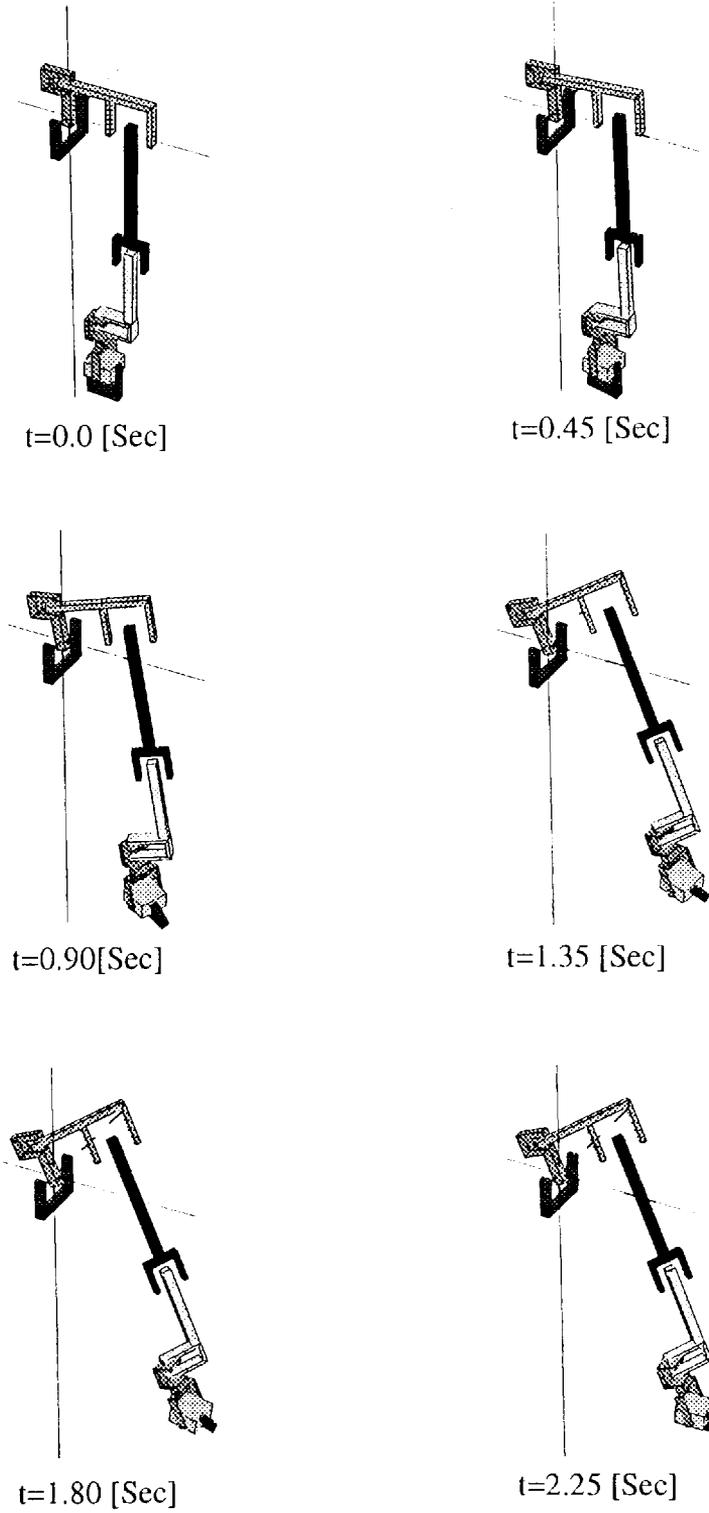
6.4.2 実験結果

以下では、試作した7自由度腕制御アームを用いた実験結果を述べる。本実験では試作した腕制御アームの位置制御性能と可変弾性性能を見るため、目標軌道への追従実験と衝撃的外乱に対する挙動を調べる。

目標軌道への追従実験の結果を Fig. 6-6 に示す。この時、剛性調整変数をそれぞれ $s_1 = 4.8$, $s_2 = 1.8$, $s_3 = 0.7$ [N.m/Rad] とした。Fig. 6-6 (a) は腕制御アームの動作の様子を示す。Fig. 6-6 (b)～(d) は腕制御アームの関節部の応答を示しており、破線は目標軌道を、実線は実際の関節部の動作を示している。また、Fig. 6-6 (e)～(g) は腕張力の応答を、Fig. 6-6 (h)～(j) はアクチュエータの変位の応答を示している。同図から分かるように、各関節軸とも目標軌道に精度良く追従できている。さらに、振動的な挙動もなく目標軌道への追従が行えている。

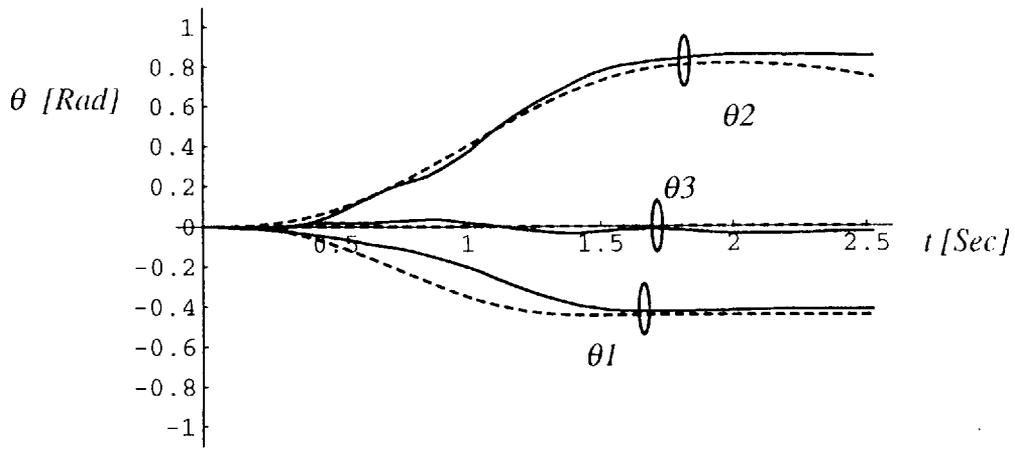
次に、可変弾性実験を行った結果を示す。関節剛性を高く設定した状態と低く設定した状態での、衝撃的外乱が作用した際の本アームの挙動の違いを Fig. 6-7 及び Fig. 6-8 に示す。Fig. 6-7 は剛性調整変数をそれぞれ $s_1 = 15.5$, $s_2 = 7.0$, $s_3 = 3.2$ [N.m/Rad] とした場合の外乱に対する応答を示しており、Fig. 6-8 は剛性調整変数をそれぞれ $s_1 = 4.0$, $s_2 = 1.8$, $s_3 = 0.7$ [N.m/Rad] とした場合の外乱に対する応答を示している。どちらの実験に対しても加えた外乱は $(0,0,4)^T$ [N] である。NSTによって外乱に対する初期応答が成されているので、アクチュエータが大きく変位することなく外乱に対して柔軟に応答している。また、関節部の応答の違いから s_1 , s_2 , s_3 によってアーム機構の機械的剛性の調整が可能であることが分かる。

上記の実験結果より、同一の機構で位置精度が要求される作業へも、柔軟性が要求される作業へも対応可能であると言える。

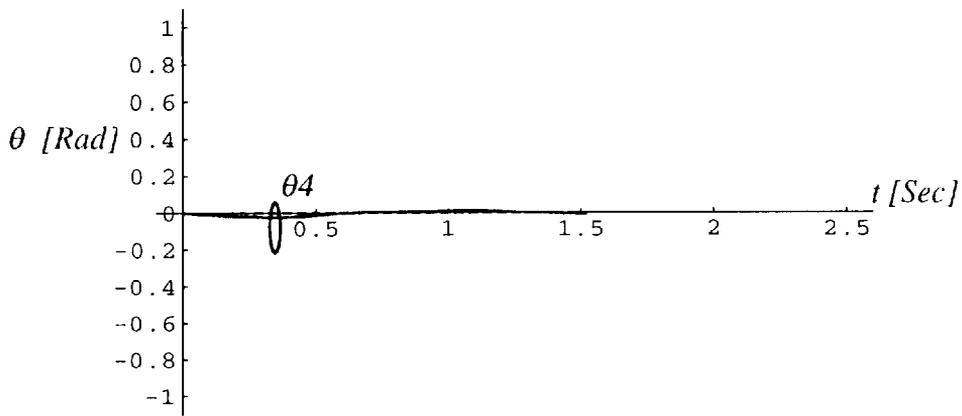


(a)

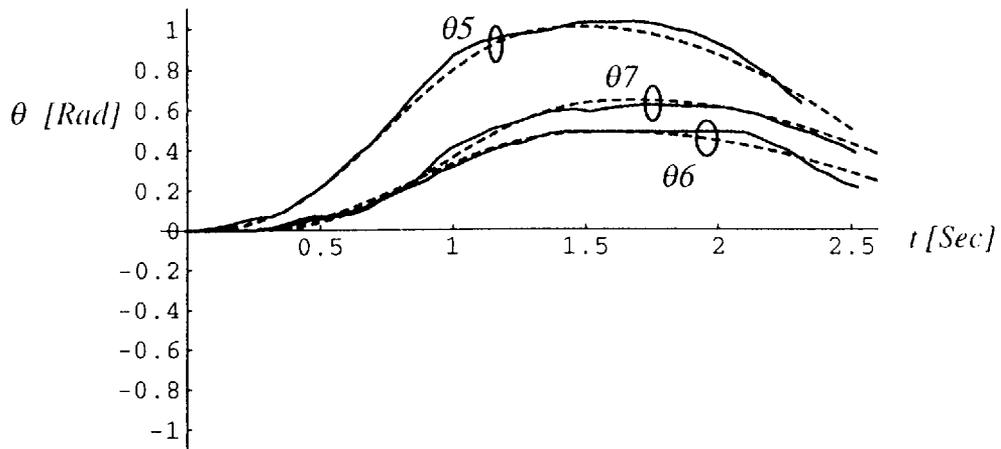
Fig. 6-6 Experiment results 1



(b)



(c)



(d)

Fig. 6-6 Experiment results 1

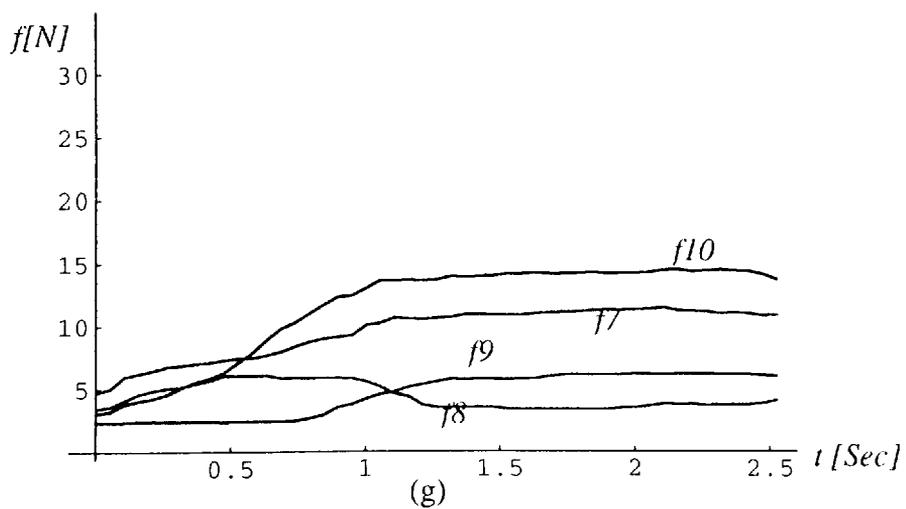
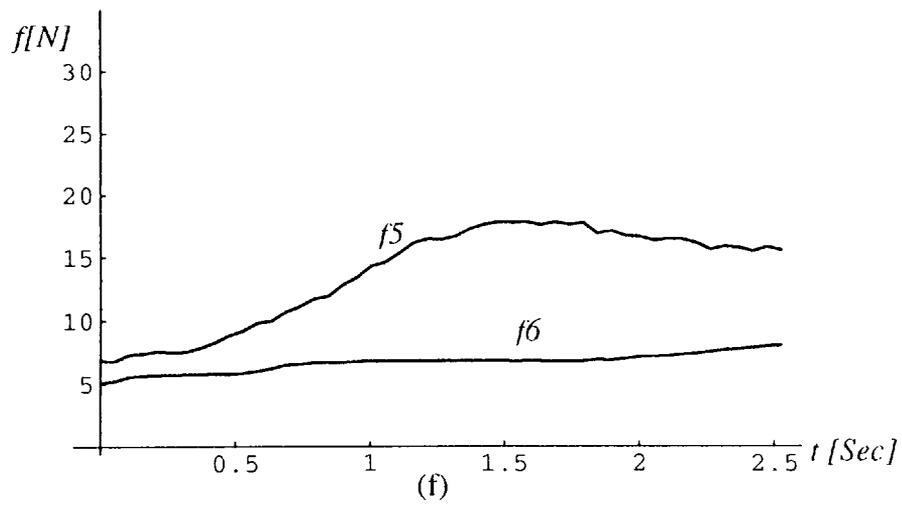
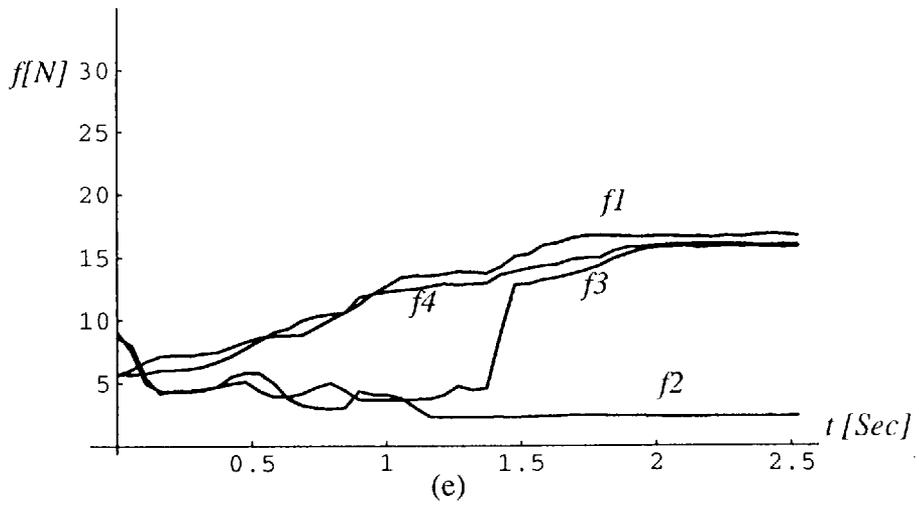
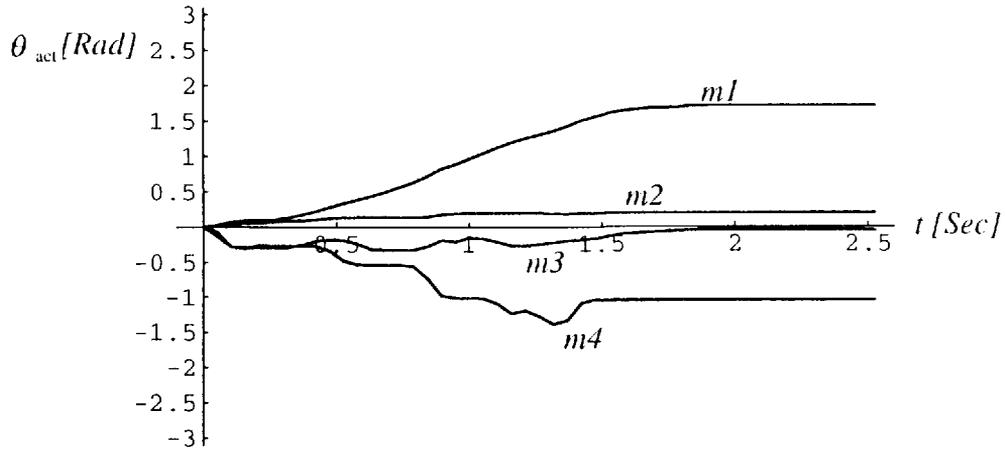
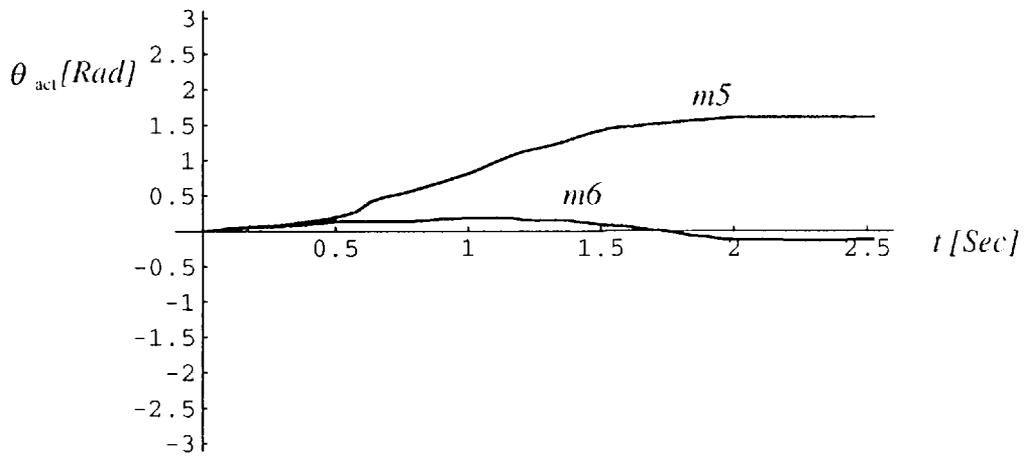


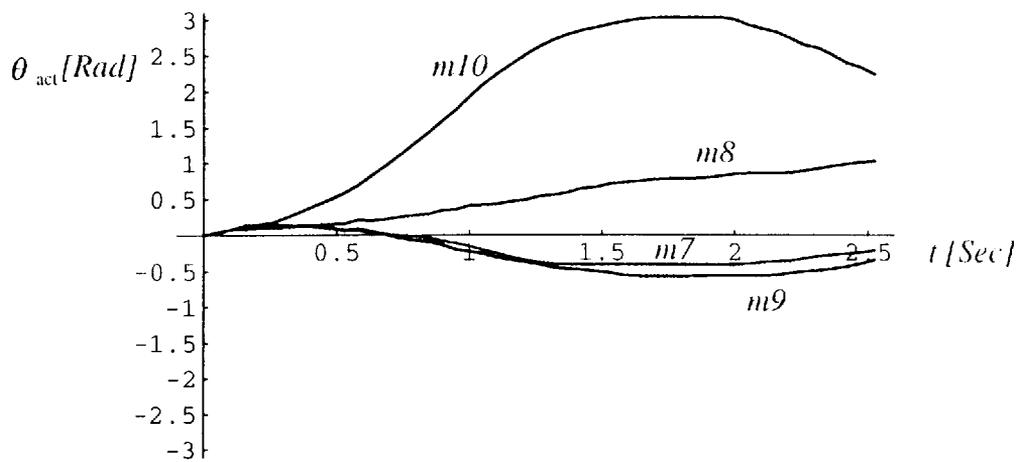
Fig.6-6 Experiment results 1



(h)

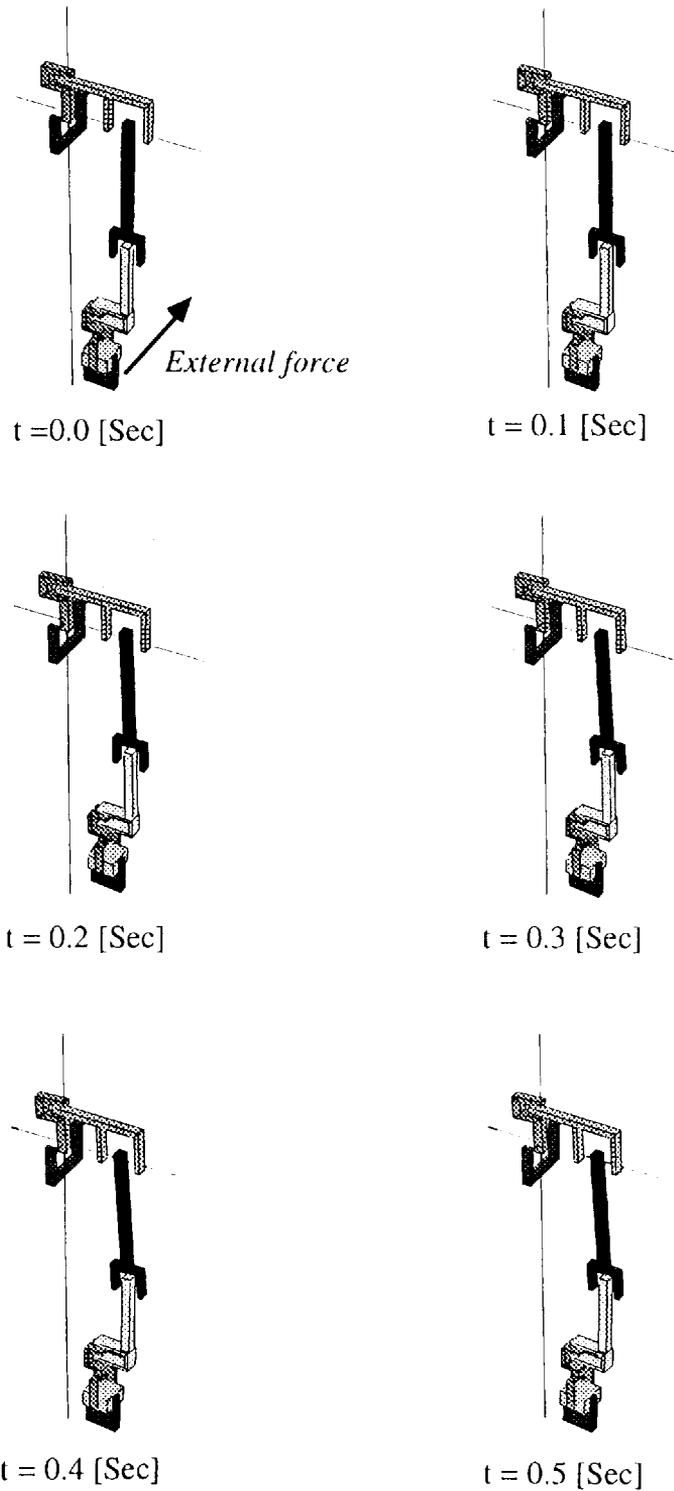


(i)



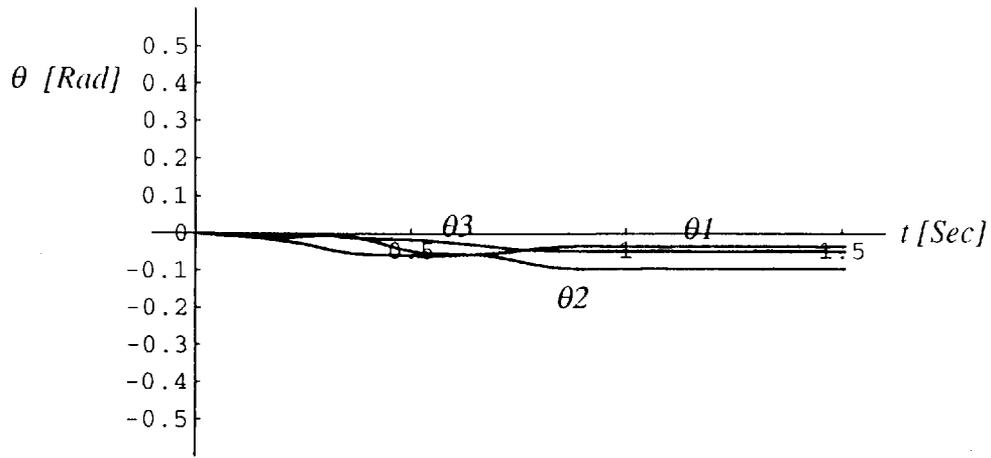
(j)

Fig.6-6 Experiment results 1

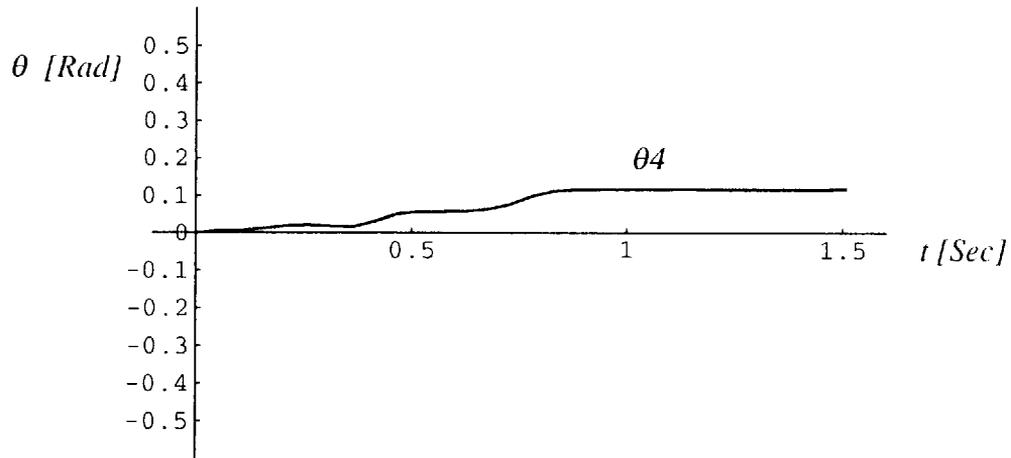


(a)

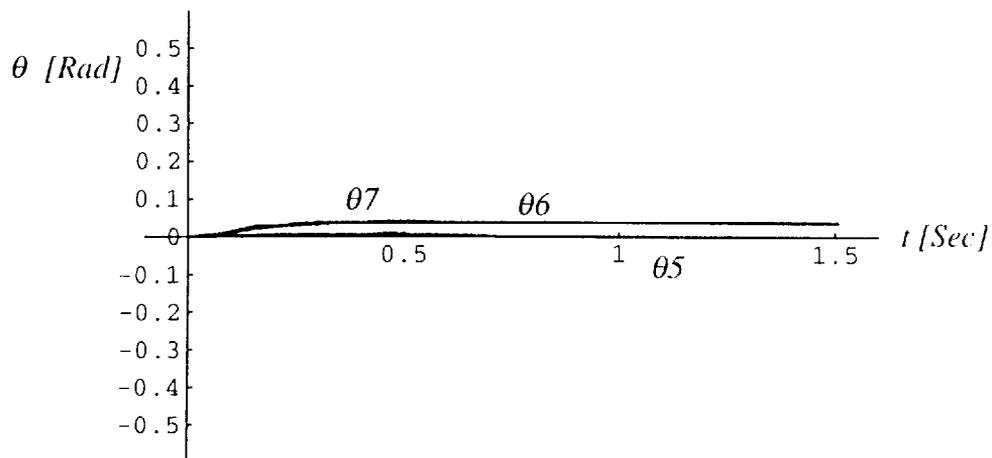
Fig. 6-6 Experiment results 2



(b)



(c)



(d)

Fig.6-7 Experiment results 2

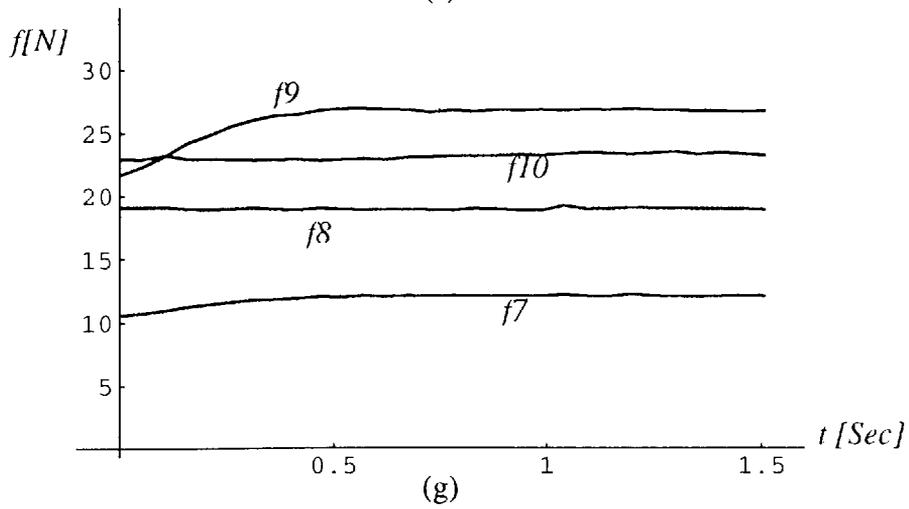
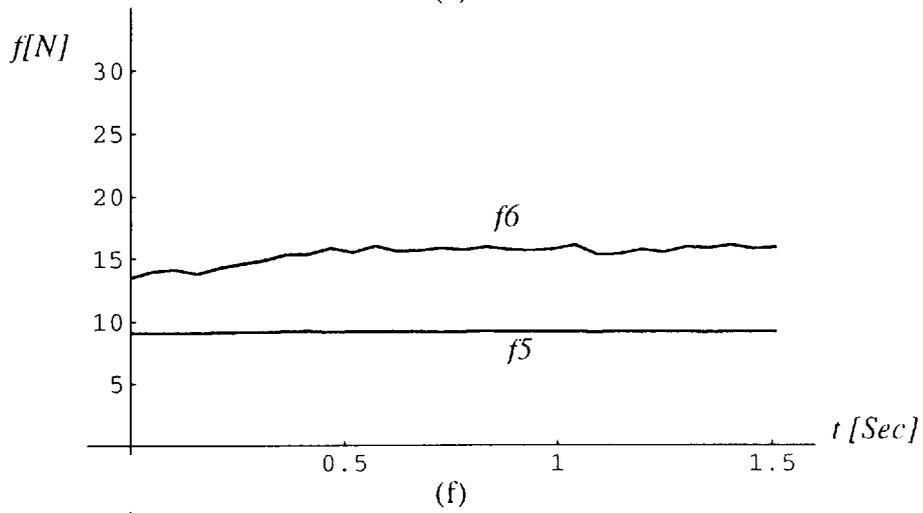
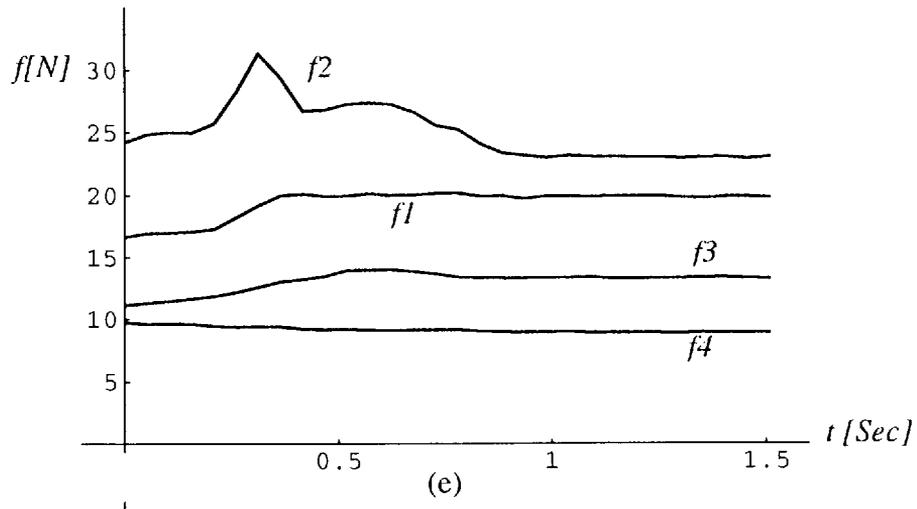
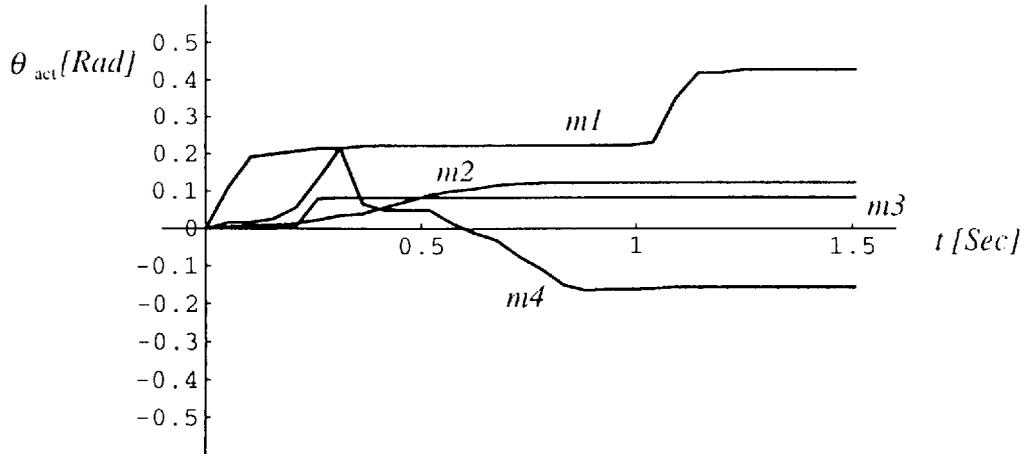
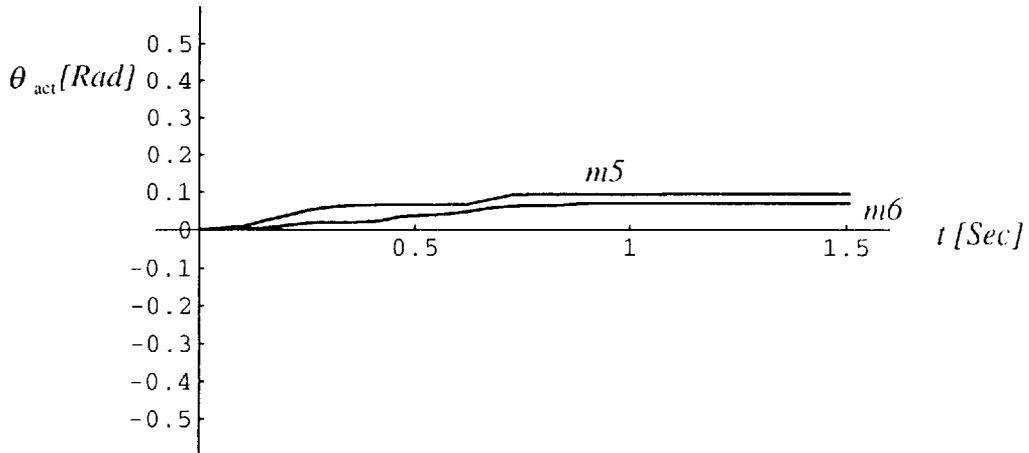


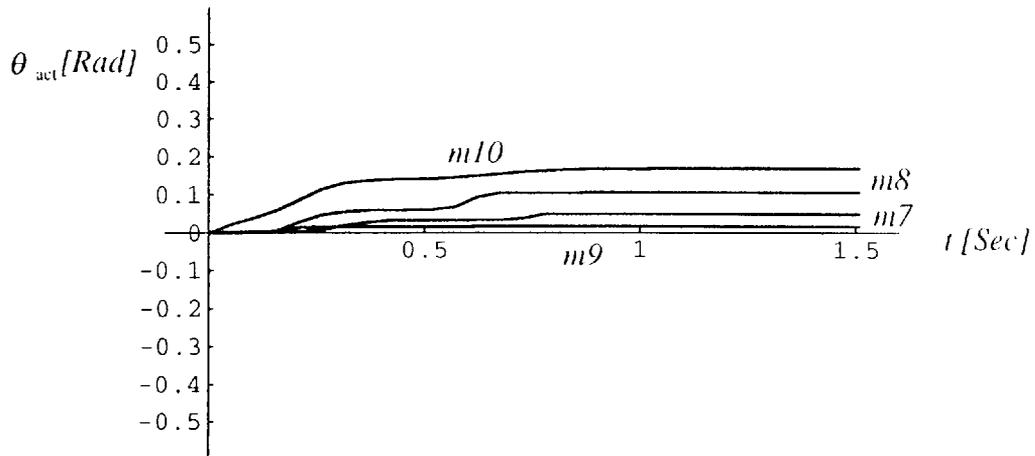
Fig.6-7 Experiment results 2



(h)

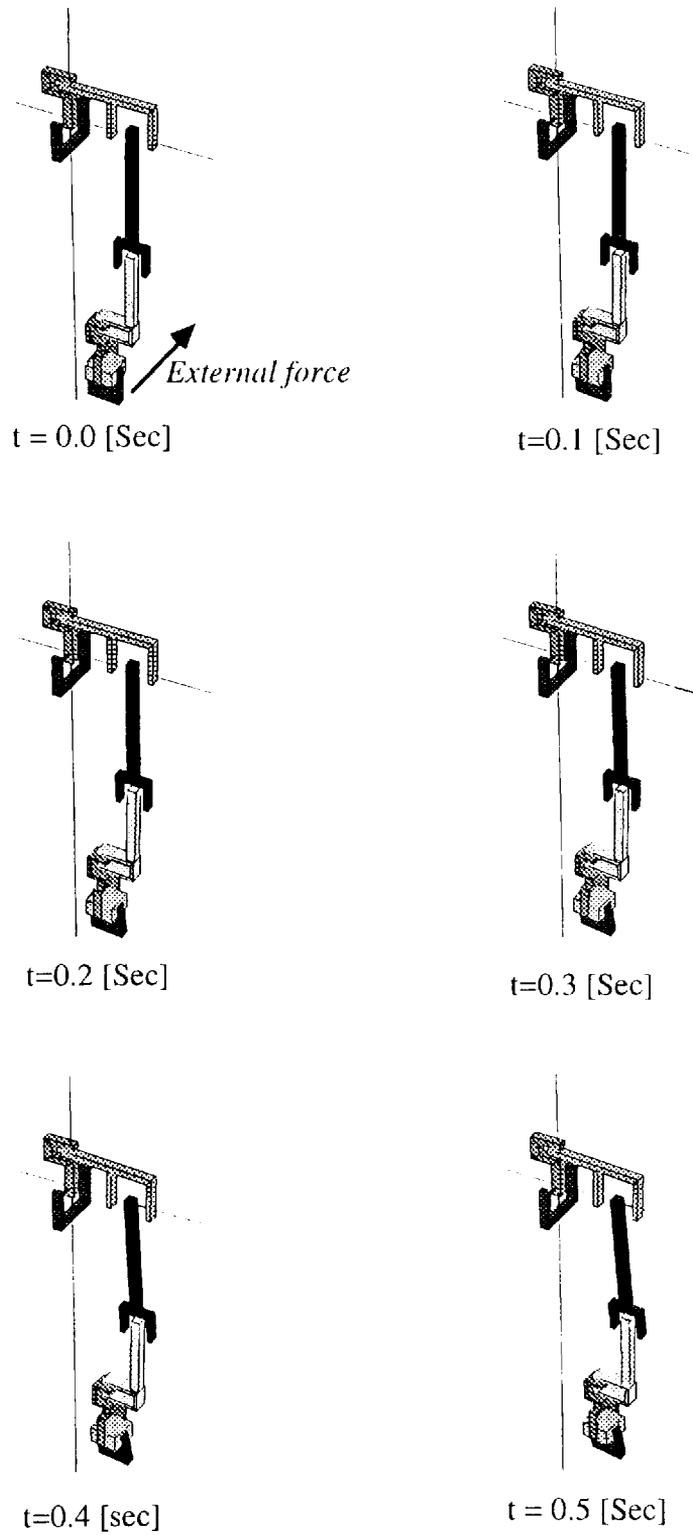


(i)



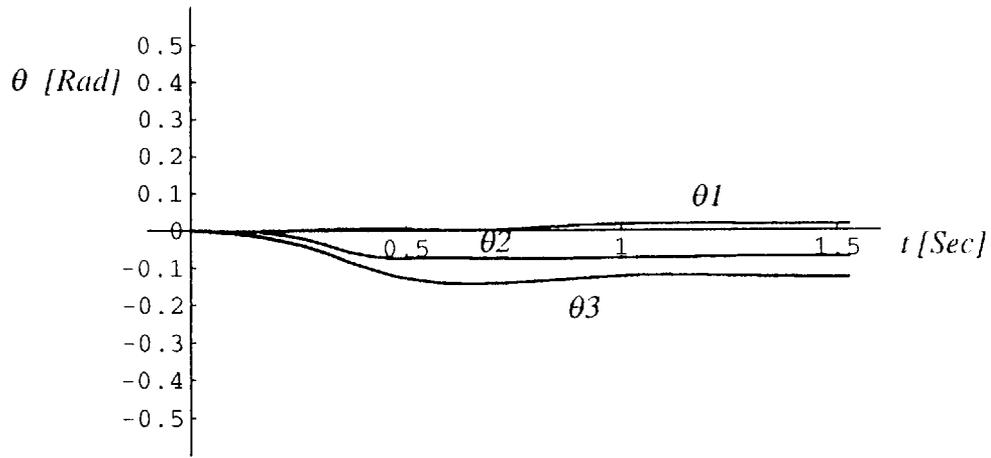
(j)

Fig.6-7 Experiment results 2

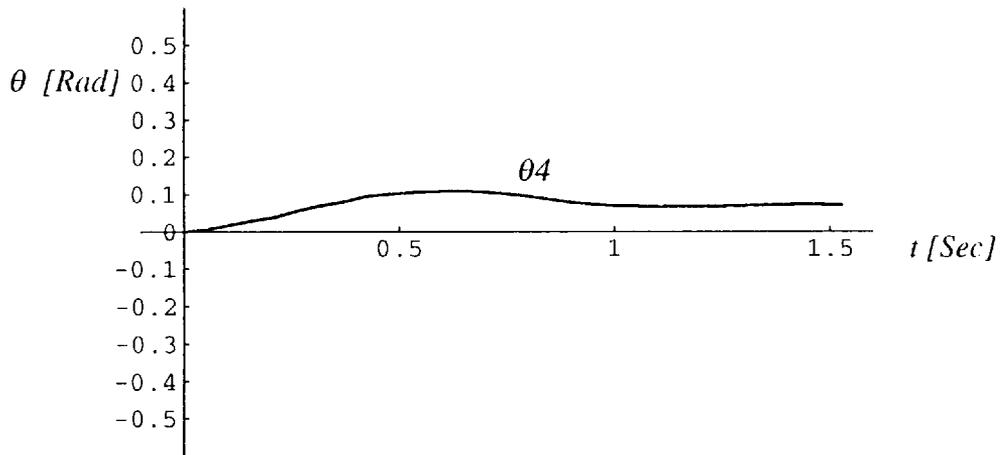


(a)

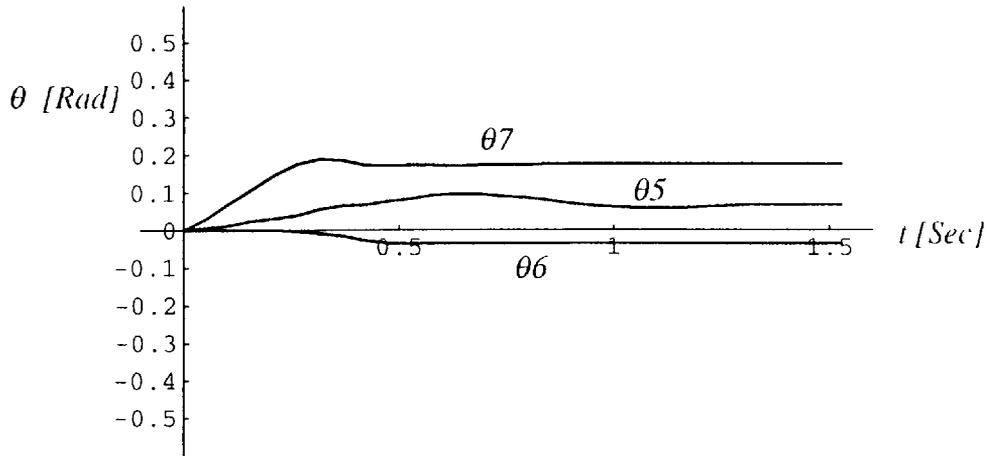
Fig. 6-6 Experiment results 3



(b)



(c)



(d)

Fig.6-8 Experiment results 3

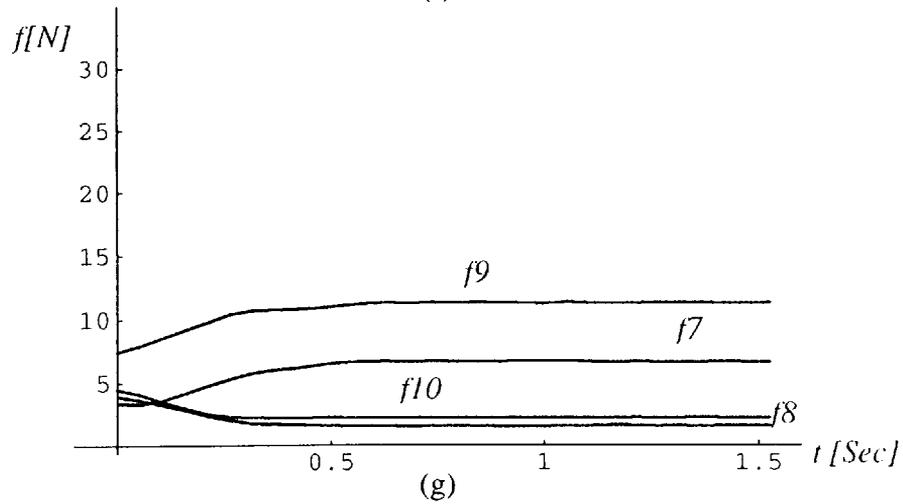
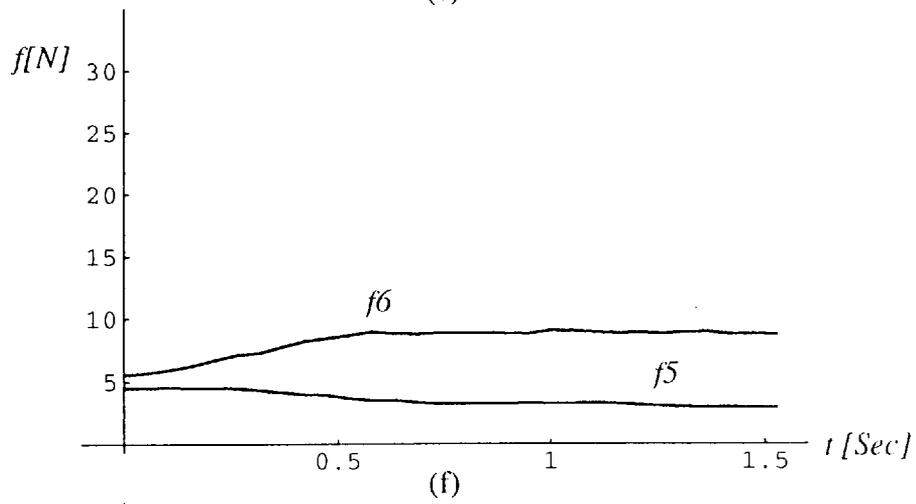
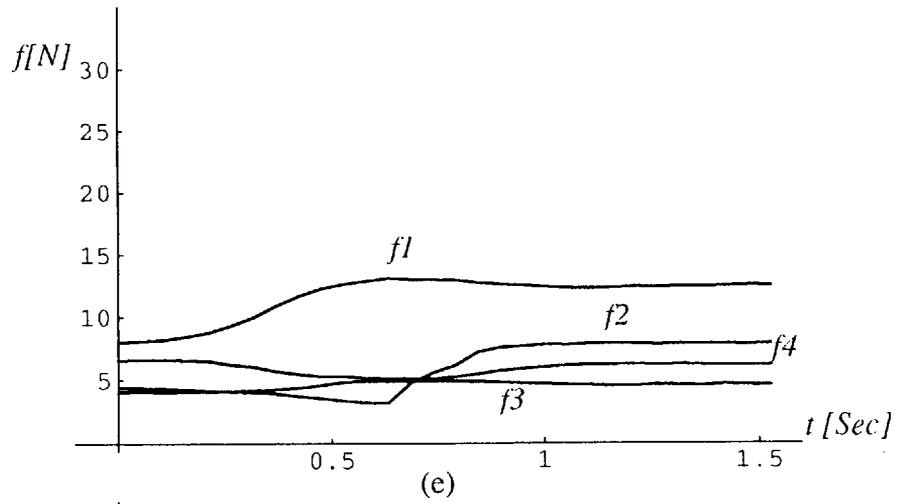
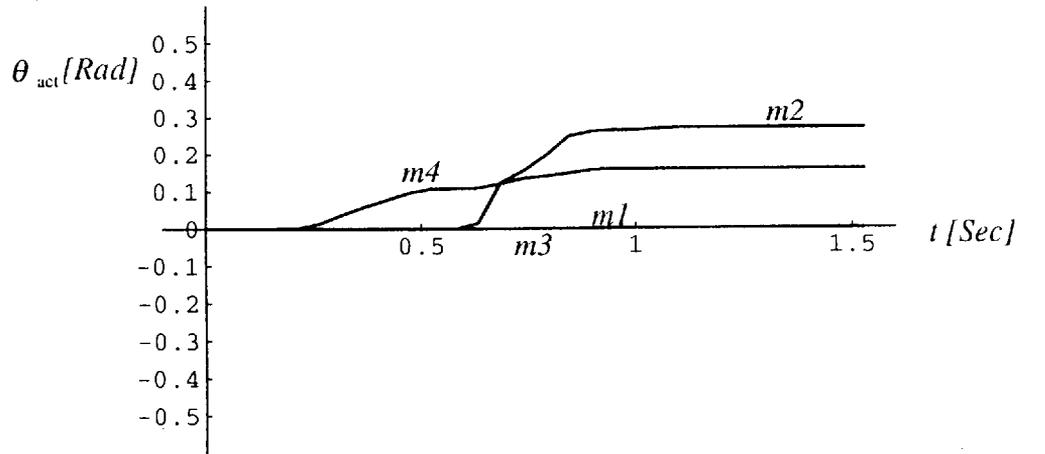
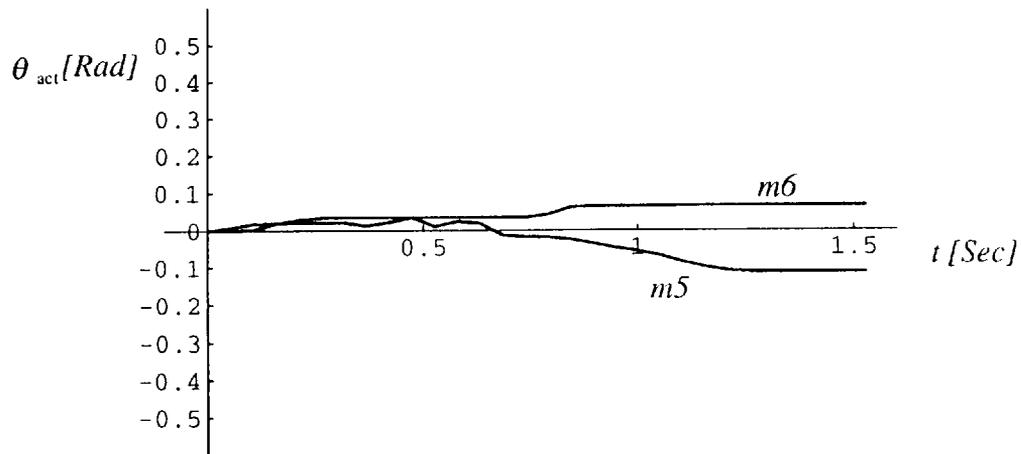


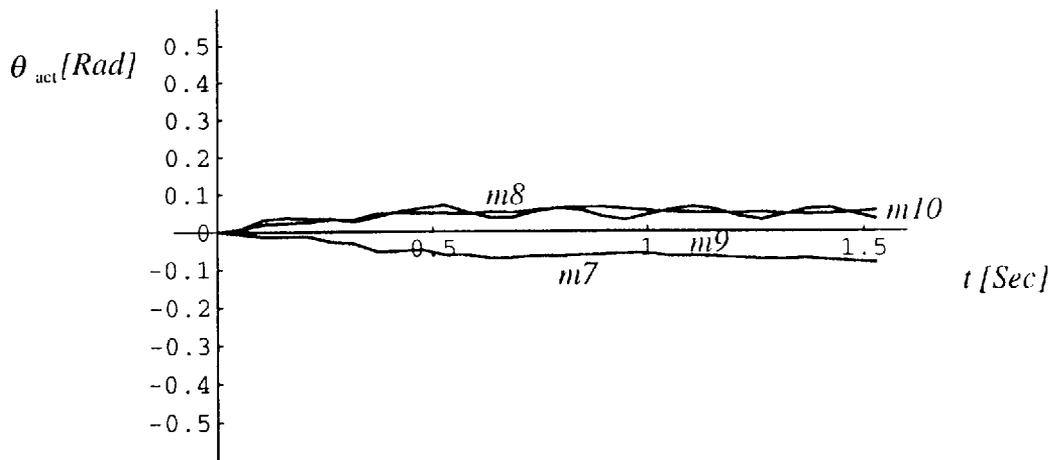
Fig.6-8 Experiment results 3



(h)



(i)



(j)

Fig.6-8 Experiment results 3

第 7 章

結論

本論文では、駆動冗長性と可変弾性特性を有する腱制御ロボットの運動制御について述べた。

駆動冗長性と NST の非線形弾性特性を有することに伴う問題点を解決し、効果的に使用するための制御理論の研究を行い、以下の結果を得た。

第 2 章 腱制御機構の運動学

腱制御機構の解析を行う際の基礎となる作業空間、関節空間と腱空間との関係などの基礎式の導出し、各空間の関係を用いることによって、腱空間における剛性を指定することにより、関節空間での剛性及び作業空間でのコンプライアンスを調整出来ることを示した。

次に、非線形弾性機構 (NST) の定式化を行い、NST の可変弾性機能を用いることにより関節剛性を機械的に調整出来ることを示した。

さらに、剛性調整を行うために必要かつ十分な次元を持つ変数を提案し、その取りうる範囲を定式化した。

第 3 章 腱制御機構の機構特性評価

腱制御機構の機構特性の評価としては、正の腱張力のみによって任意の関節トルクが

発生可能である可動範囲の解析及び腱による関節トルクの可操作性の解析を行い、機構設計の指針を示した。

可動範囲の解析においては正の腱張力のみによって任意の関節トルクが発生可能である必要十分条件を求め、それによって可動範囲の形状を評価した。

腱による関節トルクの可操作性においては可操作楕円体による解析、評価を行った。

第4章 腱制御機構の制御

腱制御機構の制御については、関節部の運動と剛性が与えられた時の腱張力の算出法、駆動冗長性と可変弾性要素を持つ機構を制御するのに適した制御系を提案し、実験による検証を行った。

腱張力の算出においてはバイアス及び初期張力を考慮した最適化問題として解くことを提案した。

制御系の構成では、非線形要素を持つ張力制御ユニットを安定化し、関節動作と関節剛性を制御するのに適した制御系を構成した。

最後に実験により、非線形バネ要素を用いた腱制御機構の有効性を示した。

第5章 小型腱制御アームと産業用ロボットの協調制御

小型腱制御アーム（マイクロアーム）と産業用ロボット（マクロアーム）の協調制御に対しては、マイクロアームとマクロアーム動作を各々の物理的特性に見合った周波数帯で行えるように分離するための制御系を提案制御法を提案した。

マクロ及びマイクロアームの動作を適切に分担するための制御系を、 H_{∞} 理論に基づいた周波数分離制御によって構成した。1次元の系におけるシミュレーション実験を行った後に、6自由度マクロアームと3自由度腱制御マイクロアームによる平面作業への拡張を

行った。

第6章 7自由度腱制御アームの制御

7自由度腱制御アームの制御については、人との協調動作を想定した人の腕とほぼ同じ形態を持つ7自由度腱制御アームを開発し、同腱制御アームの基礎実験により第2章～第4章において述べた理論の拡張性を示した。

7自由度腱制御アームに関しては、腱制御アームを肩部に3自由度、肘部に1自由度、手首部に3自由度の計7自由度を有する形態で構成し、7つの関節を10個のアクチュエータで駆動することにより、肩部、肘部、手首部の剛性調整を独立に行うことが可能なアームを実現した。また、駆動冗長度が3である系への制御手法の拡張を行い基礎実験によりその効果を示した。

本論文で述べた腱制御アームは、アクチュエータの駆動冗長性と可変弾性特性を有しておりロボット機構の機械的な剛性を調整することができる。

機械的な剛性を調整することが可能であることから、位置精度が要求される作業にも、柔らかさが要求される作業にも、同一の機構（ロボット）によって対応することができる。そのため、ロボットの作業に対する汎用性を向上することができ、ロボットの応用範囲の拡張が図れる。

本論文において展開した理論は、単に作業に対する汎用性の高い機構を構築することを可能にするのみでなく、従来独立した分野であった生体工学及びロボット工学の接点としての役割を果たすことが可能である。

謝辞

本論文を執筆するにあたって、親身の御指導と励ましを下さった、明治大学理工学部
の嘉納秀明教授、大滝厚教授ならびに小林博明教授に深甚の謝意を表します。

また、研究会等で貴重なご助言を賜りました、京都大学工学部の吉川恒夫教授、神奈
川工科大学工学部の山本圭治郎助教授、明治大学理工学部の伊藤光教授、小山紀講師、
阿部直人助手に感謝いたします。

最後に、実験装置の製作及び実験に御協力いただいた清水建設（株）伊藤健太郎氏、
明治大学大学院生の大鐘大介氏、田村賢白氏、渡邊智明氏、明治大学理工学部精密工学
科知能機械研究室の研究生の皆様感謝いたします。

参考文献

- 1) 羅 志偉, 伊藤 宏司 他 : 接触作業における関節インピーダンス制御の双線形モデル, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.9, 1170~1172 (1991)
- 2) 杉本 浩一 : ロボットアームの力フィードバック制御, 計測と制御, 25, 1, 45~50 (1986)
- 3) M.T.Mason : Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulator, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-11, 6, 418~432 (1981)
- 4) 菅野 重樹 他 : 力制御用指機構の試作, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 909~910 (1990)
- 5) 小金澤 鋼一他 : 堅さ制御可能な拮抗型アクチュエータとその制御, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1003~1004 (1992)
- 6) S. Himeno and H. Tumura : The Locomotive and Control Mechanism of The Human Finger and its Application to Robotics, International Conference on Advance Robotics, 261~268 (1983)
- 7) J. S. Albus : A New Approach to Manipyulator Control : The Cereblar Articulation Controller (CMAC), Trans. ASME J. Dynam., Syst., Meas., Contr., 97, 220~227- (1975)
- 8) Chi-haur Wu, et al. : Voluntary Movements for Robotic Control, IEEE Control Systems, 8~14 (1992)
- 9) 土川 浩史 他 : ファジィ加速度制御系による仮想コンプライアンス制御, 第8回日本

参考文献

ロボット学会学術講演会予稿集, 79~82 (1990)

- 10) 大石 潔 他 : H^∞ 制御に基づくセンサレス力制御, 電気学会論文集, D 112, 9, 852~861 (1992)
- 11) 田口 英郎, 藤井 克彦 : 前腕運動系における中枢系の統御機能モデル, 電子通信学会論文集, Vol. J64-A, No.1, 47~54 (1981)
- 12) 渡辺 格, 森田 弘道 他編 : 神経科学講座5 運動と制御, 理工学社 (1978)
- 13) D. Marr : Vision, W. H. Freeman & Company (1982)
- 14) 塚原 仲晃編 : 脳の情報処理, 朝倉書店 (1984)
- 15) 藤原 知 : 運動解剖学, 医歯薬出版 (1983)
- 16) You-Liang Gu : Dynamics And Control for Redundant Robot, Proc. 1988 IEEE International Conference , 194~199 (1988)
- 17) T. Yoshikawa : Analisis and Control of Robot Manipulators with Redundancy, Robotics Research : The First Int. Symp. , MIT press , 735~748 (1984)
- 18) Y. Nakamura and H. Hanafusa : Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators , Prep. of the 2nd Int. Symp. Robotics Research, 357~363 (1984)
- 19) 吉川 恒夫, 桐山 茂生 : ロボットアームの4関節手首機構, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.5, 111~113 (1985)
- 20) 彭 志新, 足立 紀彦 : 冗長マニピュレータのインピーダンス制御, 日本機械学会論文集 (C編) , 104~109 (1991)
- 21) 加藤 厚生, 伊藤 正美 : ヒトの粘弾性変化, バイオメカニズム 11, 213~220 (1991)
- 22) T. Okada : On a Versatile Finger System, Proc. 7th ISIR, 345~352 (1977)

参考文献

- 23) H. Hanafusa and H. Kobayashi : Fine Control of the Object with Articulated Multi-finger Robot Hands, International Conference on Advance Robotics, 261 ~ 268 (1983)
- 24) J. K. Salisbury and J. J. Craig : Articulated Hands : Force control and Kinematic Issues, Int. J. Robotics Research, Vol 1, No. 1, 4~17 (1982)
- 25) D. E. Whitney : Quasi-State Assembly of Compliance Supported Rigid Parts , Trans. ASME J. Dynam., Syst., MEas., Contr., 104, 65~77 (1982)
- 26) 吉村 允孝, 増井 浩司 : 上肢筋・骨格系における筋力配分と最適動作に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), 2270~2777 (1991)
- 27) 広瀬 茂男, 馬 書根 : ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.11, 1291~1298 (1990)
- 28) S. C. Jacobsen , et al. : Antagistic Control of a Tendon Drive Manipulator, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1334~1339 (1989)
- 29) J. K. Salisbury and B.Roth : Kinematic and force Analysis of Articulated Mechanical hand, ASME J. Mechanisms, Transmission and Automation in Design, Vol. 105. (1983)
- 30) S. C. Jacobsen , et al. : The Utah/MIT Dextrous Hand Work in Progress, Int. J. Robotics Res., Vol. 4, No. 3, 21~50 (1982)
- 31) 遠藤 博史, 和田 充雄 : 人の腕を模した肘前腕関節機構, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 669~672 (1990)
- 32) 赤沢, 藤井 : 筋運動制御機構を持つロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No.3, 63~67 (1988)
- 33) 横井 一仁他 : 7自由度ワイヤ干渉駆動アームの機構と制御, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 451~452 (1991)

- 34) S. C. Jacobsen, et al. : Control Strategies for Tendon Drive Manipulators, IEEE Cont. Syst. Mag., Vol. 10-2, 23~28 (1990)
- 35) K. Hyoudou and H. Kobayashi : Kinematic and Control Issues on a Tendon-Controlled Wrist Mechanism., Int. Symp. on RM²S., 67~72 (1992)
- 36) 吉川 恒夫 : ロボット制御基礎論, コロナ社 (1988)
- 37) ゴールドスタイン : 古典力学, 吉岡書店 (1983)
- 38) 児玉, 須田 : システム制御のためのマトリックス理論, 計測自動制御学会 (1974)
- 39) 久志本 茂 : 最適化問題の基礎, 森北出版 (1979)
- 40) 岩堀 長慶 : 線形不等式と応用, 岩波講座, 基礎数学 (1977)
- 41) 佐藤 茂信編 : 産業用ロボットのメカニズム, 日刊工業社 (1983)
- 42) K. Davey et al. : The Analysis of Fields and Torques in a Spherical Induction Motor, IEEE Trans. Magnetics, Vol.23, No. 1, 273~282 (1987)
- 43) G. J. Vachtsevanos et al. : Development of a Novel Intelligent Robot Manipulator, IEEE Contr. Syst. Mag., Vol.7-3, 9~15 (1992)
- 44) Ronald Kurtz and Vincent Hayward. : Multiple-Goal Kinematic Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundancy, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.8-5, 644~651 (1992)
- 45) 兵頭 和人, 小林 博明 : 腕制御手首機構の機構特性と制御に関する研究, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 6, 809~816 (1992)
- 46) 吉川 恒夫 : ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 4, 63~67 (1992)
- 47) C. A. Klen and B. E. Blaho : Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators, Int. J. Robotics Res., Vol. 6, No. 2, 72~83 (1987)

参考文献

- 48) D. Fredrick : Coordinating Control of a Two Degree of Freedom Universal Joint Structure Driven by Three Servo. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 817~821 (1989)
- 49) 横井 一仁他 : 7自由度ワイヤ干渉駆動アームの開発, 日本機械学会 ロボティクス, メカトロニクス講演会'92, 327~330 (1992)
- 50) V. M. Popov : Absolute Stability of Nonlinear Control System of Automatic Control, Automation and Remote Control , 22 , 857~875 (1962)
- 51) 兵頭 和人, 小林 博明 : 非線形バネ要素を有する腱制御手首機構に関する研究, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 8, 1244~1251 (1993)
- 52) 嘉納秀明他 : 動的システムの解析と制御, コロナ社, (1991)
- 53) R. P. Paul, et al. : The Implementation of Hybrid control in The Presence of Passive Compliance, Preprint of the 5th Int. Symp. of Robotics Research, 9 ~16 (1989)
- 54) S.Salcudean and C.An : On the Control of Redundant Coarse-Fine manipulator, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1834~1840 (1989)
- 55) 永井 清, 吉川 恒夫, "インピーダンス制御に基づく冗長マクロマイクロマニピュレータの運動制御", 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 267 ~270 (1993)
- 56) 吉川 恒夫他 : マクロ-マイクロシステムによるフレキシブルアームの準静的軌道制御-実験による検証, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1175~1178 (1992)
- 57) K. Hyoudou and H. Kobayashi : Cooperative Control of A Tendon-Controlled Wrist Device and A Robot Manipulator, Proc. of ICAM '93 JASM., 278~282 (1993)
- 58) J.C.Doyle, K.Glover, P.P.Khargonekar and B.A.Francis : State-Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems, IEEE, Trans. on Automatic Control.

- AC 34-8, 831~847 (1989)
- 59) B. A. Francis : A course in H_∞ control theory, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1987)
- 60) J. Y. S. Luh et al. : Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC -25, 468~474 (1980)
- 61) 大鐘 大介他 : 7自由度腿制御アームの機構と制御, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 651~652 (1993)
- 62) K. Kreutz-Delgado et al. : Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators, Int. J. Robotics Res., Vol. 11, No. 5, 469~475 (1992)
- 63) A. A. Maciejewski and C. A. Klein. : Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments, Int. J. Robotics Res., Vol. 4, No. 3, 109~117 (1985)