

### 第 3 章 多自由度システムへの適用

### 3. 1 はじめに

前章では、本研究で提案するパワーアシスト法の特徴及び有効性を簡便に論じるため、一自由度のシステムを例として取り上げた。このようなシステムにおいては、アーム手先に取り付けた負荷と、それをアシストするために必要なアクチュエータのトルクの関係は、式(2.3)に示したように、非常に平易な式で表すことができた。そのため、負荷操作時の操作者の挙動から、アクチュエータが出力すべき最大トルクを容易に導くことができ、これを基に動的負荷の操作者負担率を決定することで、提案する手法に基づくトルク飽和回避が比較的容易に行うことができた。

しかし、実際のパワーアシスト装置は、一般に多自由度システムで構成されると想定されるため、本論文においても、これより後、多自由度システムを対象として議論を進める。まず本章では、提案するパワーアシスト法を多自由度システムで実現する制御系の構成について論じる。そのため、まず始めに、多自由度パワーアシスト装置に用いる多関節アームの運動方程式を求め、次に、多自由度システムにおいて提案するパワーアシストを実現するにあたり、操作者と負荷がアームに加える力関係をどのようにするのが望ましいかについて議論し、その力関係を定式化する。さらに、アームの特性を考慮しながら、この力関係を實現する制御系の構成を示した後、新たに試作した多自由度パワーアシスト実験装置を用いた実験によりその制御系の有効性を確認する。提案手法に基づいて、トルク飽和を回避する制御系を構築するためには、さらに、動的負荷の負

担率をアクチュエータの出力すべきトルクを考慮しながら決定することが必要であるが、これについては次章において論じることとする。

### 3. 2 多自由度パワーアシスト装置の運動方程式

Fig.3-1 に多自由度パワーアシスト装置に用いられる多関節アームの一例を示す。アームはその手先において、任意の位置と姿勢を実現するため6自由度を有しているとする。また、アームには冗長自由度が無いとし、つまりアームは6関節を有しているとし、各関節にはアクチュエータ及び角度センサが配置されているとする。なお、本論文では、このような6自由度系を対象として議論を進めるが、これらの議論は、冗長自由度のない動力化された機械の全てを対象とする一般的な議論であることを始めに述べておく。

まず、アーム各関節のアクチュエータは、最大、最小トルク  $\tau_{imax}$ ,  $-\tau_{imax}$  の範囲内で、任意のトルク  $\tau_i$  を出力できるとする。ここで、これらアクチュエータのトルク  $\tau_i$  を成分とするベクトルを  $\tau=[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_6]^T$  とする。また、操作者及び負荷がアームに加える力・トルクを、ベース座標系に基づいて記述した  $6 \times 1$  のベクトルをそれぞれ  $F_h$ ,  $F_L$  とする。さらに、操作者と負荷がアームに力を加えている点を、ベース座標系に基づいて記述した  $6 \times 1$  の位置ベクトルを  $X$  とする。なお、厳密に言えば、この位置ベクトル  $X$  は、それぞれの力・トルクセンサの中心位置を表すため、操作者側と負荷側で微妙に値が異なるが、本研究では、これらのセンサの位置が非常に近い場合を想定しているため、本論文では一つのベクトル  $X$  で表す。ここで、アームの各関節の変位角  $\theta_i$  を成分とするベクトルを、 $\theta=[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6]^T$  とし、これと先ほどの位置ベクトル  $X$  を用いて、ヤコビアン

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial \dot{\mathbf{X}}}{\partial \dot{\boldsymbol{\theta}}} \quad (3.1)$$

を求める。このヤコビアン  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$  は、

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.2)$$

のように、アーム関節の角速度ベクトル  $\dot{\boldsymbol{\theta}}$  を、アーム手先の速度ベクトル  $\dot{\mathbf{X}}$  に変換する行列であり、本論文では、作業領域内で正則であるとする。このヤコビアン  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$  を用いて、操作者及び負荷からアーム手先に加わる力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_h, \mathbf{F}_L$  により、アームの各関節に生じるトルクベクトル  $\boldsymbol{\tau}_h, \boldsymbol{\tau}_L$  は、それぞれ

$$\boldsymbol{\tau}_h = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F}_h, \quad \boldsymbol{\tau}_L = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F}_L \quad (3.3)$$

と表すことができる。さらに、これらのトルクの総和  $\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_h + \boldsymbol{\tau}_L$  により駆動させられるアームの動力学的な挙動を示すパラメータを、関節座標系に基づいて以下のように記述する。まず、 $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$  を  $6 \times 6$  の慣性行列、 $\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$  をコリオリ力、遠心力、粘性及びクーロン摩擦力により生じる  $6 \times 1$  のトルクベクトル、 $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$  を重力により生じる  $6 \times 1$  のトルクベクトルとする。以上のパラメータを用いて、パワーアシスト装置の運動方程式は、

$$\boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F}_h + \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F}_L = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) \quad (3.4)$$

と表される。

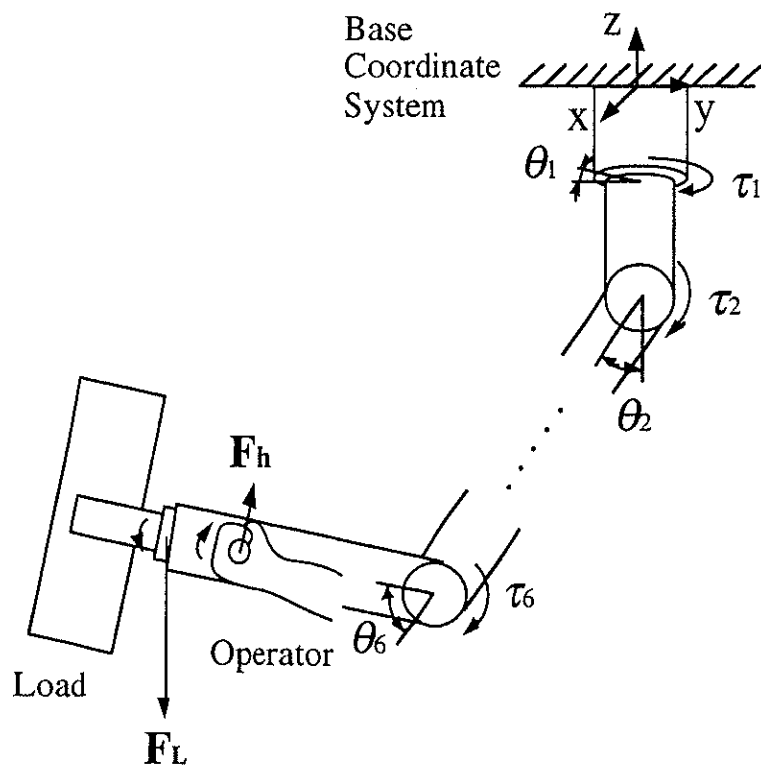


Fig.3-1 多自由度パワーアシスト装置に用いる多関節アームの例

### 3. 3 制御目標の定式化

式(3.4)で示した，多関節パワーアシスト装置の運動方程式中のアクチュエータのトルクベクトル  $\tau$  を，適切な制御則を用いて決定することが，すなわち本研究で提案するパワーアシストを実現することとなる．そのため，まず多自由度系におけるパワーアシスト装置の制御目標を明確にする．つまり，操作者と負荷がアームに加える力の関係を，パワーアシスト装置を用いてどのように調整するのかを定式化する．

#### 3. 3. 1 関節トルクに基づく方法と手先力に基づく方法の比較

パワーアシスト装置の制御系が目標とする操作者と負荷の力関係には，大きく分けると，Fig.3-2 に示すように，2つの考え方がある．一つは，先の一自由度パワーアシスト装置がそうであったように，アームの関節に生じるトルクに基づいて，負荷の操作力を比例的に減少させるという考え．つまり，操作者及び負荷によってアームの各関節に生じるトルクベクトル  $\tau_h$ ， $\tau_L$  が，一定比  $\tau_h = -\gamma \tau_L$  となるようにアシストするという考え．もう一つは，アームの手先に加わる力に基づいて，負荷の操作力を比例的に減少させるという考え．つまり，操作者及び負荷によってアームの手先に生じる力・トルクベクトル  $F_h$ ， $F_L$  が，一定比  $F_h = -\gamma F_L$  となるようにアシストするという考え．以上の2つがある．ちなみに，先の一自由度パワーアシスト装置では，上記の2つの手法はほぼ等価となるため，定式化の容易さから

前者を選択した。なお，行列  $\boldsymbol{\gamma} = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_6)$  は対角行列で，各対角成分  $\gamma_i$  はそれぞれ対応する関節，方向において，操作者と負荷によって生じる力・トルクの比率を表している。これは，この対角成分  $\gamma_i$  が 0 の場合，負荷の操作力は完全にアシストされ，1 の場合，全くアシストされないことを意味している。ちなみに， $\text{diag}(e_1, e_2, \dots, e_n)$  は， $e_1, e_2, \dots, e_n$  を対角要素とする  $n \times n$  の対角行列を表す。以後，この行列  $\boldsymbol{\gamma}$  を，一自由度系の場合と同じく，操作者負担率とする。なお，この負担率  $\boldsymbol{\gamma}$  の対角成分  $\gamma_i$  の意味するものは，それぞれの方法により異なり，前者の  $\boldsymbol{\tau}_h = -\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{\tau}_L$  とする方法においては，各関節に加わるトルクの比率を表しており，後者の  $\boldsymbol{F}_h = -\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{F}_L$  とする方法においては，ベース座標系の各軸方向における力・トルクの比率を表している。したがって，前者の方法は，負担率  $\boldsymbol{\gamma}$  がアームの各関節毎に設定されるため，例えば，パワーアシスト装置を外骨格型にし，ある特定の関節の筋力が低下した人に対して，その関節に加わるトルクを大きくアシストする場合などには有効な方法であるといえる。しかし，この方式は，手先において負荷をアシストする力が，アームの姿勢に依存して変化する。そのため，それ以外の用途に対しては，負担率  $\boldsymbol{\gamma}$  を絶対座標系の各軸方向に設定し，手先におけるアシスト力がアームの姿勢に依存して変化しない後者を選択することが，操作性の観点から望ましいと考える。したがって，基本的には後者の方法に基づき， $\boldsymbol{F}_h = -\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{F}_L$  となるようパワーアシストを行うこととする。これに加え，本研究で提案している，負荷を重力負荷と動的負荷に分離し，異なる比率でアシストするパワーアシスト法を実現するためには，



$$\mathbf{F}_h = -(\alpha\mathbf{F}_{Lg} + \beta\mathbf{F}_{Ld}) \quad (3.5)$$

の関係を満たすように、パワーアシスト装置の制御系を構築することが必要となる。なお、 $\mathbf{F}_{Lg}$ 、 $\mathbf{F}_{Ld}$ はそれぞれ重力負荷、動的負荷によりアーム手先に生じる、ベース座標系に基づく $6 \times 1$ の力・トルクベクトルであり、式(3.3)中の力・トルクベクトル $\mathbf{F}_L$ とは、以下の関係にある。

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{F}_{Lg} + \mathbf{F}_{Ld} \quad (3.6)$$

また、行列 $\alpha = \text{diag}(\alpha_{11}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{66})$ 、 $\beta = \text{diag}(\beta_{11}, \beta_{22}, \dots, \beta_{66})$ はそれぞれ重力負荷、動的負荷に対する負担率を表す対角行列で、負担率 $\gamma$ と同じく行列 $\alpha$ 、 $\beta$ の各対角成分 $\alpha_{ii}$ 、 $\beta_{ii}$ は、ベース座標系の各軸方向において操作者と負荷がアーム手先に加える力・トルクの比率を表している。

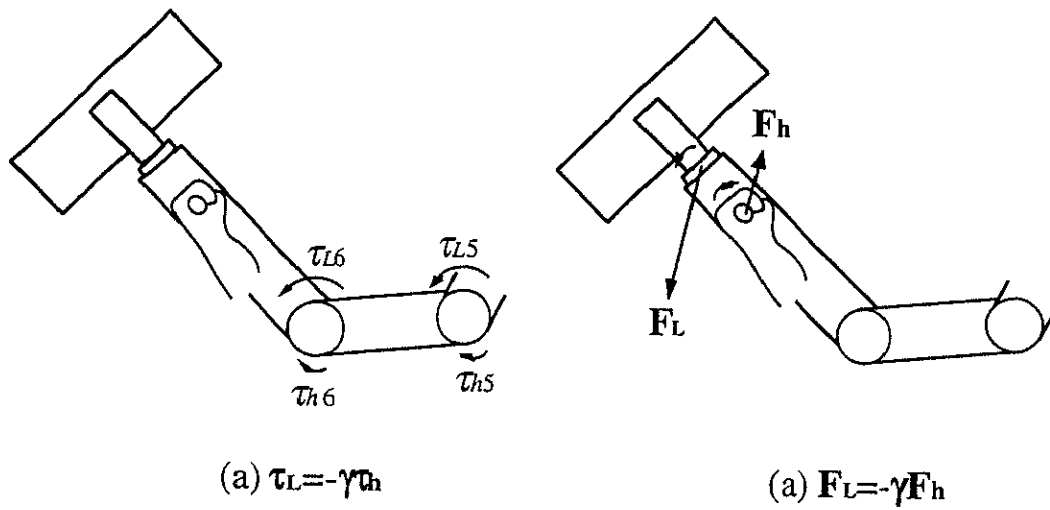


Fig.3-2 制御系が目標とする操作者と負荷により  
生じる力・トルクの関係

### 3. 3. 2 アームのアシスト

基本的には，式(3.5)に基づき，負荷のアシストを行うが，操作者に加わる力は，このような負荷に起因するものばかりでなく，アームに起因するものも大きい．よって，操作者が負担する力を小さくするには，アームについても，負荷と同様にアシストすることが必要となる．ただし，多関節アームを操作するために必要な力は，一般に姿勢に依存して非線形に変化するため，それが操作性の劣化を招く恐れがある．したがって，それを考慮したアシストの方策を選択することが望まれる．理想的には，操作者がアームの存在を気にせずに負荷操作を行えばよいが，そのためにはアームの慣性力  $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ ，摩擦力などの速度に関する力  $\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}})$ ，重力  $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ の全てを完全に補償することが必要となり，これをアクチュエータの発するトルクを用いて実現することが不可能であることは明白である．ただし，重力  $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ については，予め重力  $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ を計測し，これと反対の力をアクチュエータから出力することにより，補償することができるため，まずこれを行う．残ったアームの慣性力  $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ と，摩擦力などの速度に関する力  $\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}})$ については，これを比例的にアシストしても，アーム手先の動力学的な特性は一定とならないため，強制的にアーム手先のインピーダンスが絶対座標系で一定となるように，アームをアシストすることが，操作性の観点から望ましい．したがって，目標となるアーム手先のインピーダンスの慣性行列を  $\mathbf{M}_d$ ，粘性摩擦係数行列を  $\mathbf{B}_d$ とすると，最終的に制御系はアーム手先において，

$$\mathbf{F}_h = -(\alpha\mathbf{F}_{Lg} + \beta\mathbf{F}_{Ld}) + \beta(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}}) \quad (3.7)$$

の関係を実現するように構成する。ちなみに，行列  $\mathbf{M}_d$ ,  $\mathbf{B}_d$  はベース座標系に基づく  $6 \times 6$  の行列である。また，アーム手先における操作力を表すベクトル  $\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}}$  は，慣性力と粘性摩擦力の和であり，動的負荷の一部とみなすことができることから，操作者の負担率  $\beta$  に従いアシストする。以上示したように，式 (3.7) に示した関係を實現するように制御系を構築することにより，提案するパワーアシストが實現される。

### 3. 4 制御系の構成

式(3.7)で示した関係を実現するために、パワーアシスト装置の制御系をどのような構成にすればよいかについて論じる。なお、制御対象として想定するパワーアシスト装置のアームは、式(3.4)に示した動力学特性を有し、その手先には、操作者と負荷の力を計測する力・トルクセンサ、各関節には、角度センサとアクチュエータを備えているとする。ここでは制御系により、これらの力・トルクセンサと角度センサから計測される信号を、どのようにアクチュエータのトルク信号へと変換すればよいかを論じる。

#### 3. 4. 1 制御系の概略

まず、式(3.7)に着目すると、これは、

$$\mathbf{F}_h + (\alpha\mathbf{F}_{Lg} + \beta\mathbf{F}_{Ld}) = \beta(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}}) \quad (3.8)$$

と変形することができる。上式は、制御系が実現すべき式(3.7)が、力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_h + (\alpha\mathbf{F}_{Lg} + \beta\mathbf{F}_{Ld})$  と、アーム手先のインピーダンス  $\beta(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}})$  の関係で表されることを意味している。したがって、これを実現するためには、入力を  $\mathbf{F}_h + (\alpha\mathbf{F}_{Lg} + \beta\mathbf{F}_{Ld})$  とし、目標インピーダンスを  $\beta(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}})$  とするインピーダンス制御を用いればよいことが分かる。具体的には、Fig.3-3 に示すようなインピーダンス制御を内包する制御系により、式(3.7)の関係が実現される。

本制御系における信号処理過程を以下に示す。まず、アーム

手先に2つ配された6軸力・トルクセンサにより，それぞれ操作者及び負荷がアームに加える力・トルクベクトル  ${}^h\mathbf{F}_h$ ,  ${}^L\mathbf{F}_L$  が計測される．ただし，これらのベクトル  ${}^h\mathbf{F}_h$ ,  ${}^L\mathbf{F}_L$  は各センサ座標系に基づき計測されるため，式(3.8)のように，ベース座標系に基づいた力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_h$ ,  $\mathbf{F}_L$  に変換する．ここで，このベクトルの座標変換を行うためには，Fig.3-4 に示すように， $3 \times 3$  の回転行列  ${}^h\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ ,  ${}^L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$  を用いる．具体的には，まず，センサ座標系の3次元ベクトルをベース座標系に変換する回転行列を，操作者側及び負荷側について求め，これをそれぞれ  ${}^h\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ ,  ${}^L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$  とする．次に，力センサの計測値である  $6 \times 1$  のベクトル  ${}^h\mathbf{F}_h$ ,  ${}^L\mathbf{F}_L$  を， $3 \times 1$  の並進力ベクトルとトルクベクトルに分離し，それぞれについて回転行列  ${}^h\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ ,  ${}^L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$  を乗じる．以上の処理により，ベース座標系に基づく力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_h$ ,  $\mathbf{F}_L$  が導出される．次に，これらのベクトル  $\mathbf{F}_h$ ,  $\mathbf{F}_L$  を用いて，インピーダンス制御の入力  $\mathbf{F}_h + (\alpha\mathbf{F}_{Lg} + \beta\mathbf{F}_{Ld})$  を求める．ただし，そのためにはさらに，負荷によりアームに加わる力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_L$  を，重力成分  $\mathbf{F}_{Lg}$  と動的成分  $\mathbf{F}_{Ld}$  に分離することが必要となるが，この分離法については後に論じるため，ここでは省略する．そして，求めたベクトル  $\mathbf{F}_h + (\alpha\mathbf{F}_{Lg} + \beta\mathbf{F}_{Ld})$  に対し，式(3.8)に従いアームの手先のインピーダンスが  $\beta(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}}_d + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}}_d)$  となるように，アーム手先の位置ベクトル  $\mathbf{X}_d$ ，速度ベクトル  $\dot{\mathbf{X}}_d$ ，加速度ベクトル  $\ddot{\mathbf{X}}_d$  を求め，これらを実現するよう位置制御を行う．なお，このインピーダンス制御部の詳細については，後に詳しい解説を加える．以上示した制御系の構成により，式(3.7)の関係を實現するアクチュエータの出力トルクベクトル  $\boldsymbol{\tau}$  が算出される．

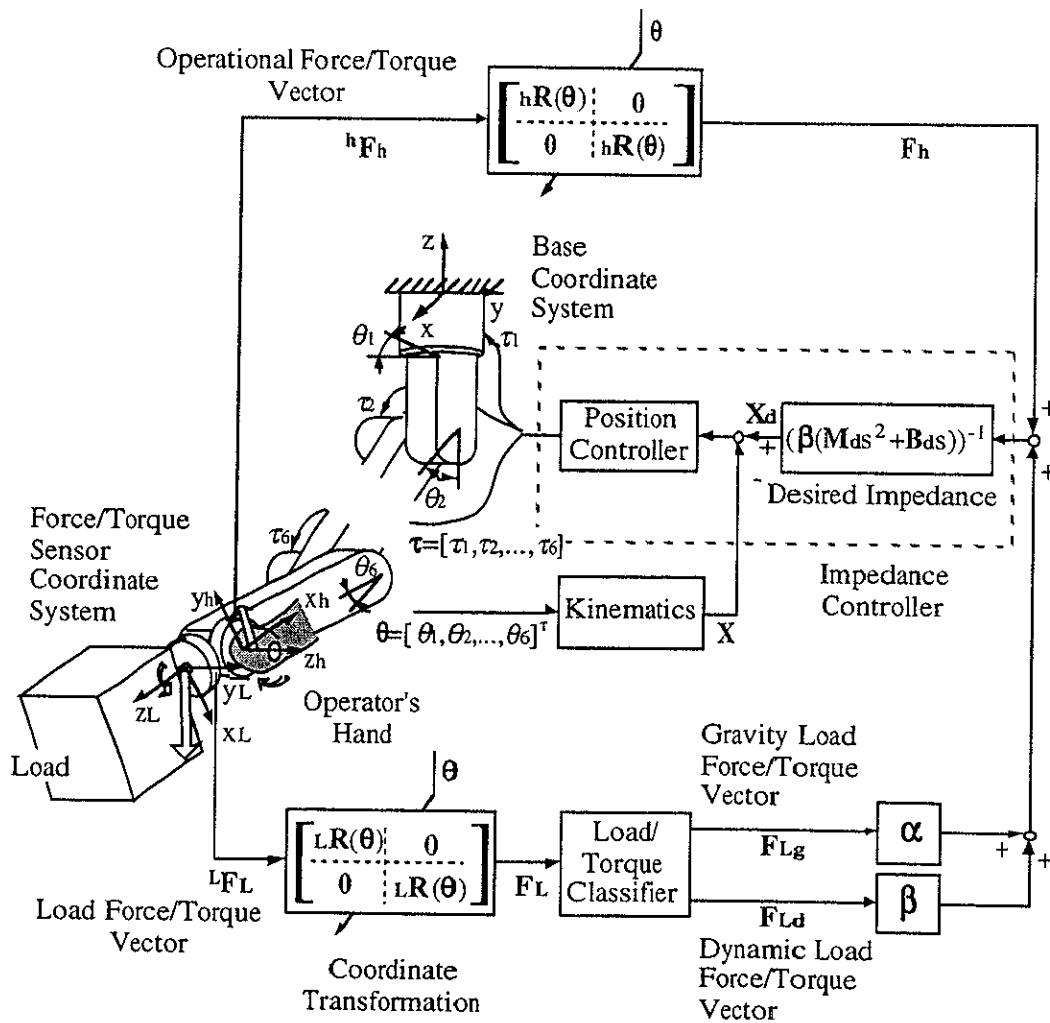


Fig.3-3 多自由度系において提案するパワーアシスト法を実現する制御系の構成

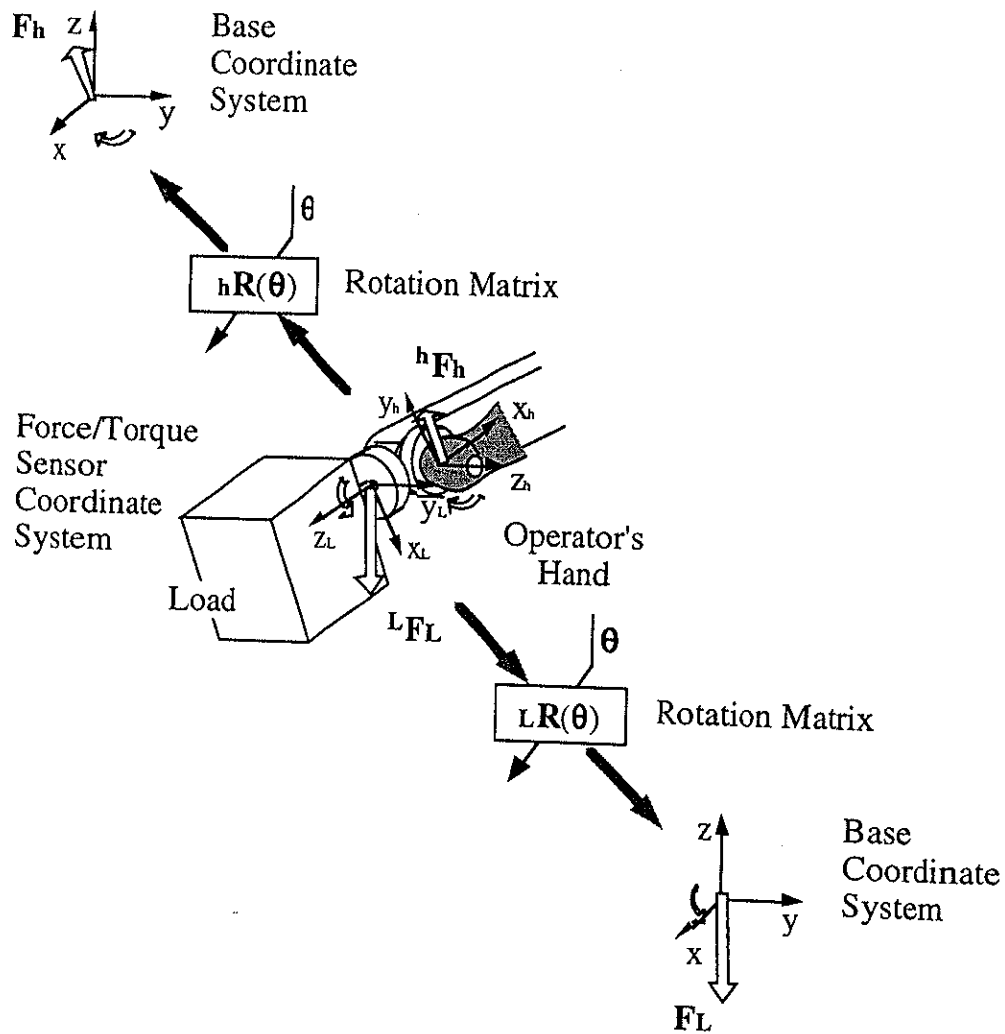


Fig.3-4 回轉行列



### 3. 4. 2 インピーダンス制御部

Fig.3-3 中のインピーダンス制御部の詳細について解説する。この制御部の構成を Fig.3-6 に示す。図に示すように、インピーダンス制御系は、その内部に位置制御系を含み、この制御系に、目標であるアーム手先の位置  $\mathbf{X}_d$ 、速度  $\dot{\mathbf{X}}_d$ 、加速度  $\ddot{\mathbf{X}}_d$  を入力することにより、目標とするインピーダンス  $\beta(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}})$  を手先において実現する。なお、この位置制御系には、非線形制御が用いられ、ベース座標系に基づいて、アーム手先が任意の位置  $\mathbf{X}_d$ 、速度  $\dot{\mathbf{X}}_d$ 、加速度  $\ddot{\mathbf{X}}_d$  を実現できるよう構成されている。本節では、インピーダンス制御部を解説するにあたり、まずこの位置制御系についての説明を行った後、インピーダンス制御系全体についての説明を行うこととする。

#### (a) 位置制御系

位置制御系の構成を Fig.3-5 に示す。この制御系は、非線形制御を用いており、アーム手先における動力学特性の非線形性を、ベース座標系に基づいて線形化する部分と、線形化した後にサーボをかける部分に分かれる。ここで、実際にアクチュエータが出力するトルク  $\boldsymbol{\tau}$  は、目標位置ベクトルを  $\mathbf{X}_d$ 、速度ベクトルを  $\dot{\mathbf{X}}_d$ 、加速度ベクトルを  $\ddot{\mathbf{X}}_d$  とすると、

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\mathbf{M}}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_d + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}) - \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}) + \hat{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \hat{\mathbf{G}}(\boldsymbol{\theta}) - \boldsymbol{\tau}_d \quad (3.9)$$

となる。ただし、 $\hat{\mathbf{M}}(\boldsymbol{\theta})$ 、 $\hat{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ 、 $\hat{\mathbf{G}}(\boldsymbol{\theta})$  はそれぞれ、式(3.4)に示

した，アームの動力学特性パラメータ  $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$ ,  $\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ ,  $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$  の推定値である．また， $\boldsymbol{\tau}_d$  は，外力により各関節に生じるトルクベクトルの推定値である．ここで，アームには外力が加わらない ( $\mathbf{F}_h = \mathbf{F}_L = \mathbf{0}$ ,  $\boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{0}$ ) とし，さらにアームの動力学特性が適切に推定された ( $\hat{\mathbf{M}}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$ ,  $\hat{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ ,  $\hat{\mathbf{G}}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ ) とすると，式(3.2)の微分

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.10)$$

及び式(3.4)，式(3.9)から，アームの手先の挙動を表す式は，

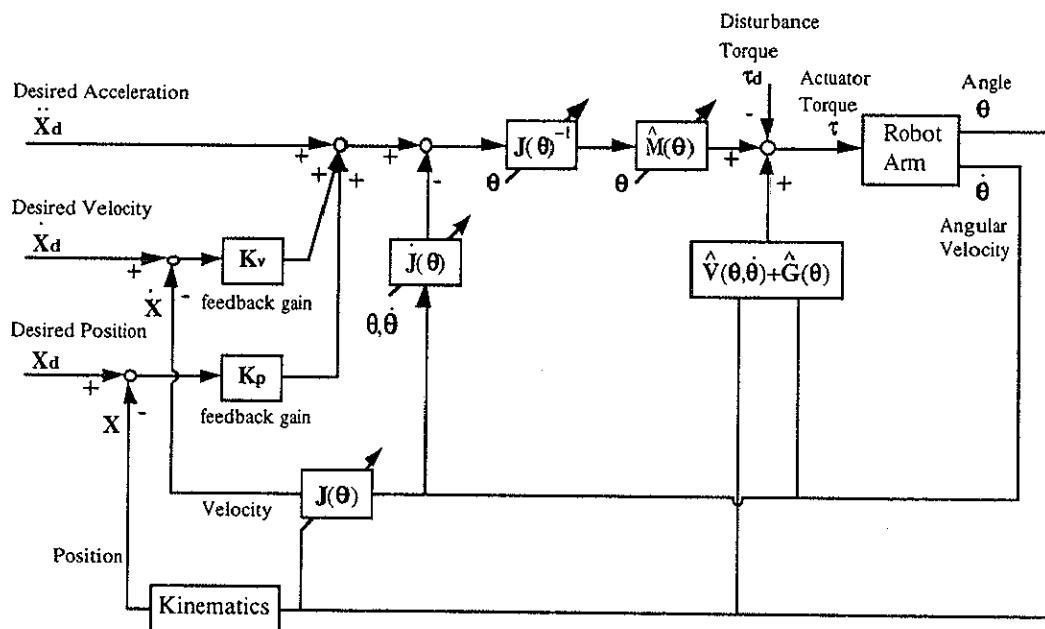
$$(\ddot{\mathbf{X}}_d - \ddot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}) = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

と表すことができる．上式は，先に述べた条件が満たされた場合，アーム手先の位置  $\mathbf{X}$ ，速度  $\dot{\mathbf{X}}$ ，加速度  $\ddot{\mathbf{X}}$  が，各目標  $\mathbf{X}_d$ ,  $\dot{\mathbf{X}}_d$ ,  $\ddot{\mathbf{X}}_d$  に追従するように，ベース座標系に基づいて線形なフィードバック力が生じることを示している．ここで，式(3.11)を導くにあたり，アームには外力が加わらない ( $\mathbf{F}_h = \mathbf{F}_L = \mathbf{0}$ ,  $\boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{0}$ ) としたが，外力が加わる場合においても，正確に外力を推定し，これを補償することができるなら，式(3.11)で表した追従特性が期待できる．本装置の場合，アームに加わる外力が，操作者と負荷に起因する力だけであると仮定すると，力・トルクセンサの計測値を基に，各関節に加わる外力  $\boldsymbol{\tau}_d$  は

$$\boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F}_h + \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F}_L \quad (3.12)$$

と推定できる．したがって，これをアクチュエータのトルクで補償することにより，上記の追従特性が得られる．このように，

アームの動力学特性を適切に推定し、外力により各関節に生じるトルクを適切に補償することにより、アーム手先の挙動がベース座標系に基づいて線形化されるため、安定で応答性のよい位置制御が期待できる。



$X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d, \theta, \dot{\theta}, X, \dot{X}, \hat{V}(\theta, \dot{\theta}), \hat{G}(\theta), \tau$  : Vector (6×1)  
 $K_v, K_p, J(\theta), \hat{M}(\theta)$  : Matrix (6×6)

Fig.3-5 位置制御系

## (b) インピーダンス制御系

次に、この位置制御系を基に、どのようにインピーダンス制御系を構成するかについて論じる。Fig.3-6 に、その構成図を示す。インピーダンス制御系に対する入力信号は、先に述べたが、ベクトル  $F_h + (\alpha F_{L_g} + \beta F_{L_d})$  である。これは、負荷がアームに加える力  $F_L$  を重力成分  $F_{L_g}$  と動的成分  $F_{L_d}$  に分離した後、それぞれ個々の操作者負担率  $\alpha$ 、 $\beta$  を乗じ、その和と、操作者がアームに加える力  $F_h$  を足し合わせるにより求められる。これを入力とし、インピーダンスが  $\beta(M_d\ddot{X} + B_d\dot{X})$  となるようアーム手先の目標位置ベクトル  $X_d$ 、速度ベクトル  $\dot{X}_d$ 、加速度ベクトル  $\ddot{X}_d$  を求める。それには、まず、入力値である力・トルクベクトル  $F_h + (\alpha F_{L_g} + \beta F_{L_d})$  に、動的負荷の負担率  $\beta$  の逆数を掛け、アーム手先の速度から求めた目標粘性摩擦力  $B_d\dot{X}$  を減算した後、目標慣性行列  $M_d$  の逆数を乗じる。これにより、式(3.8)から分かるように、目標加速度ベクトル  $\ddot{X}_d$  が求められる。さらに、これを積分することで、目標速度ベクトル  $\dot{X}_d$ 、そして位置ベクトル  $X_d$  が求められる。これを先ほど述べた位置制御系に入力することにより、式(3.8)に示す関係が実現される。ただし、アームには、操作者と負荷から外力が加わるため、式(3.12)に従い外力補償を行う。以上の制御系により、式(3.7)を指標とするインピーダンス制御が実現される。

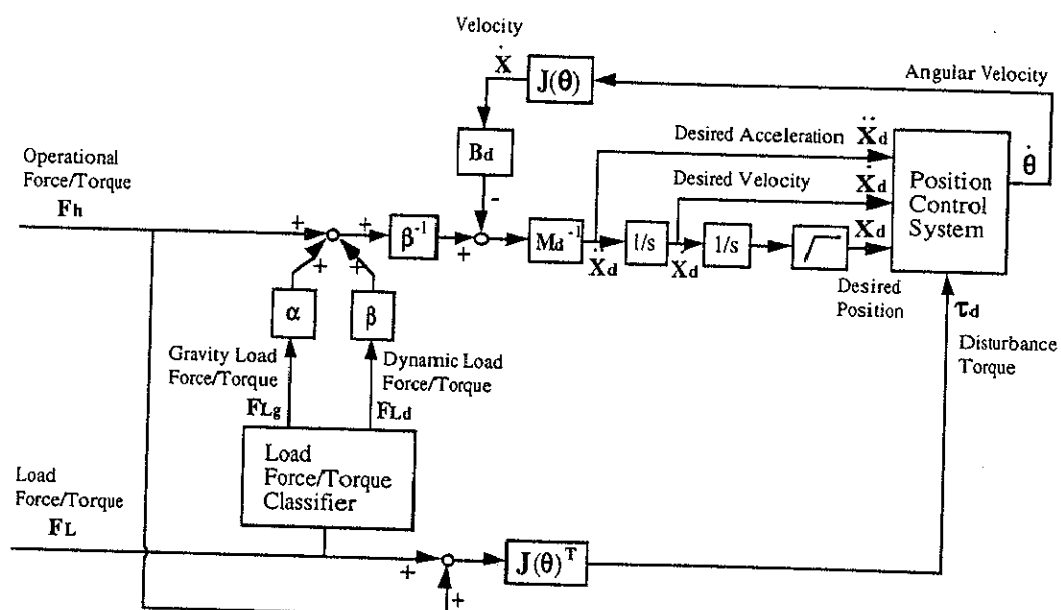


Fig.3-6 パワーアシスト装置のインピーダンス制御系

### 3. 4. 3 重力負荷と動的負荷の分離

Fig.3-3 の制御系を用いて提案するパワーアシストを実現するためには、さらに、負荷がアームに加える力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_L$  を、重力成分  $\mathbf{F}_{Lg}$  と動的成分  $\mathbf{F}_{Ld}$  に分離しなければならない。したがって、本節では、まず、動力学特性が既知である負荷を対象に、重力負荷と動的負荷の分離法を論じる。なお、動力学特性が未知である負荷に対する分離法については、第5章で論じることとする。ちなみに、負荷は Fig.3-7 に示すように、自由空間内で力センサに固定されている剛体であるとする。

まず始めに、負荷の重力成分  $\mathbf{F}_{Lg}$  を求める。ここで、この力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_{Lg}$  を求めるためには、負荷の質量  $m_L$  と、力センサ座標系に基づく負荷の重心位置ベクトル  $\mathbf{l}=[l_x \ l_y \ l_z]^T$  の値が必要となるが、前記したように負荷の動力学特性は既知であると仮定しているため、これらの値も既知であるとする。また、求める  $6 \times 1$  の力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_{Lg}$  は、

$$\mathbf{F}_{Lg} = [f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz} \ ; \ n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T \quad (3.13)$$

のように、 $3 \times 1$  の並進力ベクトル  $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$  と、トルクベクトル  $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$  に分けることができ、これらのベクトルは、その値の算出法がそれぞれ異なることから、以下において別個に論じる。

まず、重力負荷によりアーム手先に加わる並進力ベクトル  $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$  から求める。この並進力ベクトル  $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$  は、つまり、負荷の重力成分によって、力センサに加わる力であるため、Fig.3-7 に示すように、重力がベース座標系の  $z$  軸

方向に働いているとし，重力加速度を  $g$  とすると，負荷の質量  $m_L$  から，

$$\begin{bmatrix} f_{Lgx} \\ f_{Lgy} \\ f_{Lgz} \end{bmatrix} = -m_L \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

と求めることができる．

次に，トルクベクトル  $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$  を求める．このベクトルは，つまり前述した重力負荷に起因する並進力により，センサ中心に発生するモーメントのことであるため，センサ中心を起点とする負荷重心の位置ベクトルに，この並進力を外積すれば求められる．つまり，これを求めるためには，まず，回転行列  ${}_L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$  を用いて，負荷の重心位置ベクトル  $[l_x \ l_y \ l_z]^T$  を，センサ座標系からベース座標系に変換し，さらに，このベクトルに，先に求めた並進力ベクトル  $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$  を外積すればよい．これを式で表すと，重力負荷によりアーム手先に生じるトルクベクトルは，

$$\begin{bmatrix} n_{Lgx} \\ n_{Lgy} \\ n_{Lgz} \end{bmatrix} = {}_L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}) \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{Lgx} \\ f_{Lgy} \\ f_{Lgz} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

と表すことができる．このように，式(3.13)から式(3.15)を用いて，重力負荷によりアーム手先に加わる力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_{Lg}$  を算出することができる．一方，動的負荷による力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_{Ld}$  については，センサの計測値をベース座標系に変換した力・トルクベクトル  $\mathbf{F}_L$  から，先のベクトル  $\mathbf{F}_{Lg}$  を減算することで求めることができる．以上の分離法を図で表すと，

Fig.3-8 のような信号処理系となる．この信号処理系により，負荷の質量  $m_L$  と重心位置  $[l_x, l_y, l_z]^T$ ，及び各種センサの計測値に基づいて，負荷の重力成分  $F_{Lg}$  と動的成分  $F_{Ld}$  を分離することができる．

以上，本章で述べたことを総合することにより，負荷を重力成分と動的成分に分離し，個々の比率でアシストするパワーアシスト装置の制御系が実現できる．

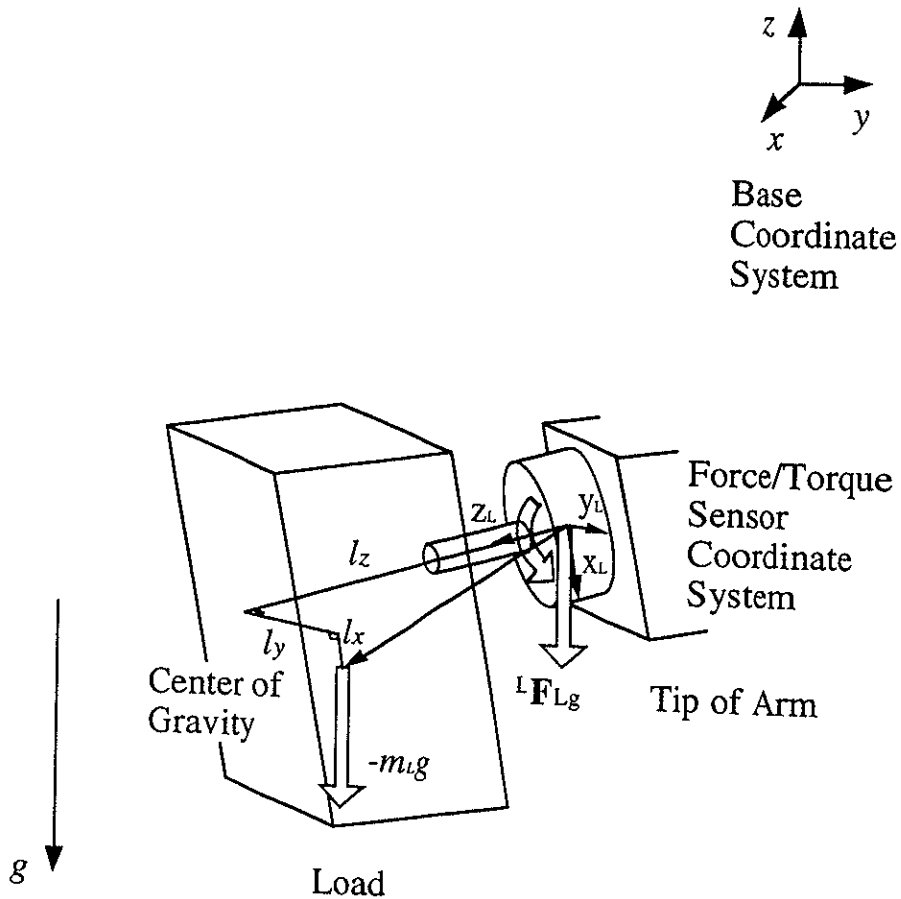


Fig.3-7 アームと負荷の関係



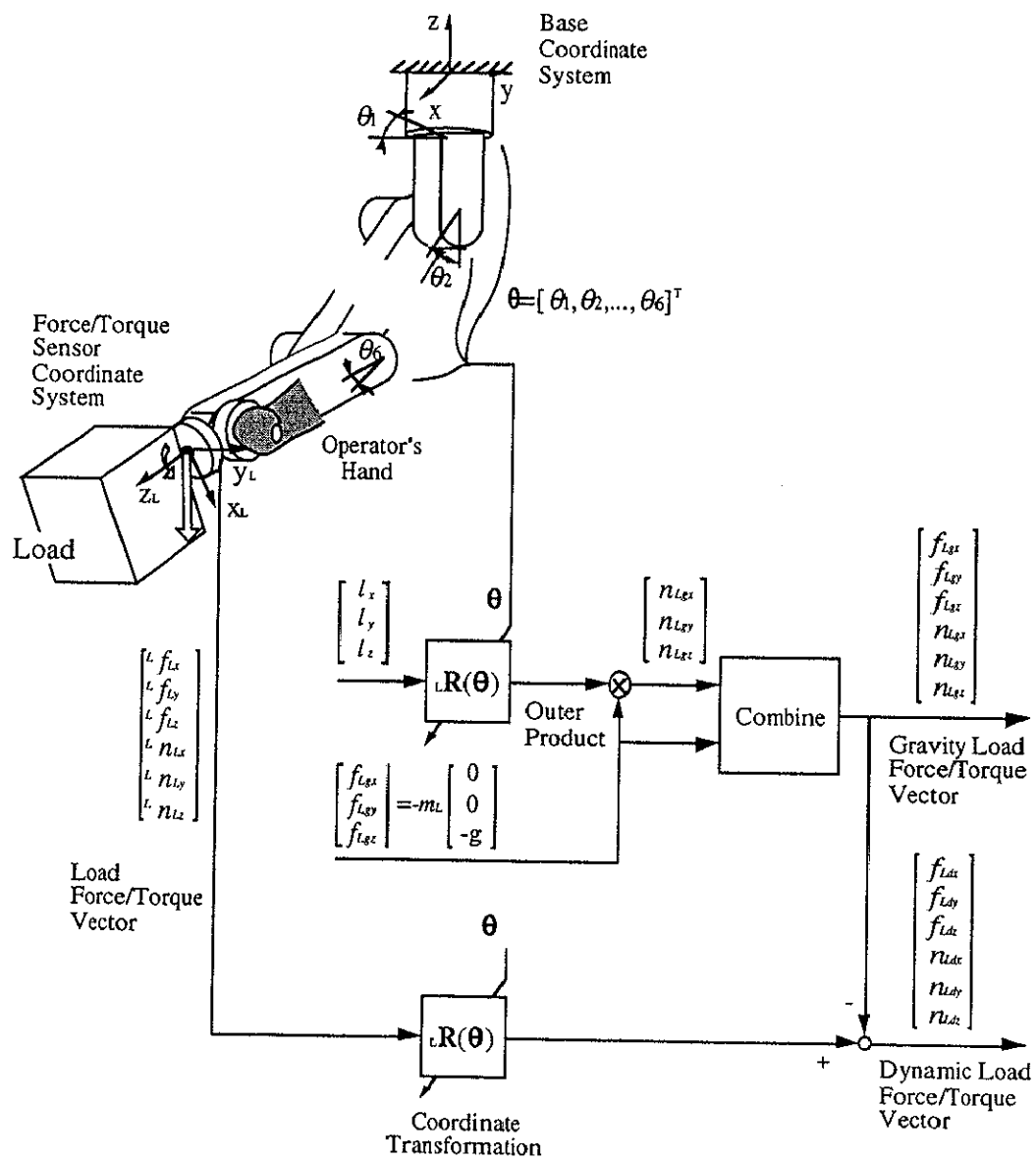


Fig.3-8 既知負荷における重力負荷と動的負荷の分離法

### 3. 5 検証実験

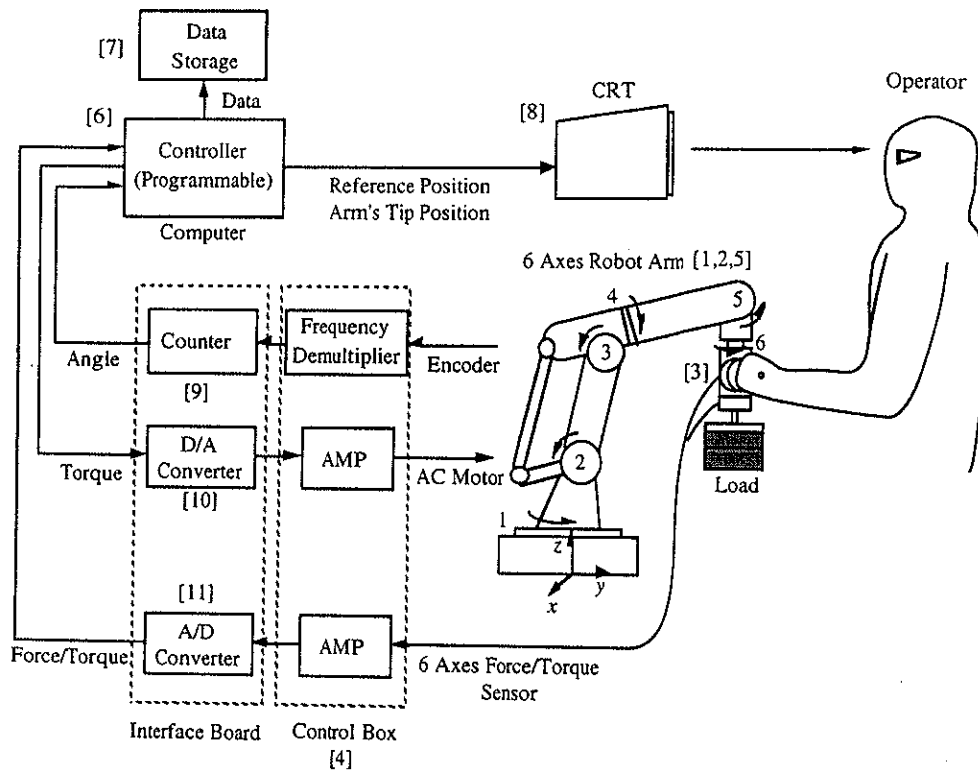
多自由度パワーアシスト実験装置を用いて、アクチュエータのトルク飽和が操作性、安定性に及ぼす影響と、前述した制御系により実現される本パワーアシスト法が、アクチュエータのトルクを有効に活用しながら、トルク飽和を回避することに有効であることを確認するため、新しく試作した多自由度パワーアシスト実験装置を用いて、負荷のトラッキング実験を行ったので、その結果について述べる。

#### 3. 5. 1 装置の構成

実験用多自由度パワーアシスト装置の構成を Fig.3-9 に示す。6軸アーム（安川，MOTOMAN-K3SB）の各関節には、それぞれ AC モータとエンコーダが配され、手先には、操作者と負荷からアームに加わる力を計測する6軸力・トルクセンサ（ニッタ製）が2つ配される。一方の力・トルクセンサの先には負荷が固定され、もう一方の力・トルクセンサにはグリップが取り付けられる。操作者はこのグリップを把持し、力を加えることにより負荷を操作する。これらの装置の外観を Fig.3-10 に示す。エンコーダから得られる関節変位角情報及び、力・トルクセンサから得られる力情報は、まず、各種インターフェイス回路を介して、0.5ms 毎に制御用コンピュータ（NEC PC-9821Xa）にデジタル化された信号として入力される。そして、コンピュータ上にソフトウェア的に構築された制御系で信号処理された後、再びインターフェイス回路でアナログ信号に変換され、アクチュエータのトルクの指令値としてサーボ系に出力

される。さらに、この指令値に従いサーボ系はアクチュエータに電力を供給する。このとき、コンピュータに入力される各種情報は、必要に応じてハードディスクへと蓄積され、後にシステムの安定性、操作性の評価に用いられる。なお、このコンピュータはCRT上に画像情報を出力し、操作者に作業目標を与えることにも用いられる。

以上示した装置構成により、アーム手先は任意に加えられる力に対し、コンピュータ上に記述される制御則に従って、機構及びアクチュエータ性能の限界内で姿勢を決定し、力を発生する。



## [1] 6 Axes Robot Arm

YASUKAWA MOTOMAN-K3SB

## [2] Actuator &amp; Encoder &amp; Break (AC Servo Motor)

1-3 YASUKAWA USAPEM-03CW2

Maximum Torque 2.86 Nm

Maximum Angular Velocity 4500 rpm

Encoder Resolution 200 ppr

2-3 Electromagnetic Break

4-5 YASUKAWA USAREM-A6CW2

Maximum Torque 0.625 Nm

Maximum Angular Velocity 4000 rpm

Encoder Resolution 100 ppr

## [3] Force Sensor

NITTA USF-20A15 (for Human)

Limit Fx, Fy 6 kg Fz 12 kg

Mx, My, Mz 30 kgf-cm

JR3 67M25A-US62 (for Load)

Limit Fx, Fy 12 kg Fz 24 kg

Mx, My, Mz 90 kgf-cm

## [4] Control Box

YASUKAWA YASNAC-ERC

1-3 YASUKAWA CACR-TM555Z1SP

4-6 YASUKAWA CACR-TS111Z1SR

## [5] Reduction Device (Harmonic Drive)

Harmonic Drive Systems

Reduction ratio

1 1/160 2-3 1/120 4-5 1/80 6 1/51

## [6] Controller (Computer)

NEC PC-9821Xa (Pentium 90MHz)

## [7] Data Storage (Hard Disk)

Hard Disk 500 Mbite

## [8] CRT

IIYAMA MF-8617B (17 inch Display)

## [9] Counter

Interface AZI-6201 (4 point 24 bit)

## [10] D/A Converter

Interface AZI-3302 (16 point 12 bit)

## [11] A/D Converter

Interface AZI-3120 (8 point 12 bit)

Fig.3-9 多自由度パワーアシスト実験装置

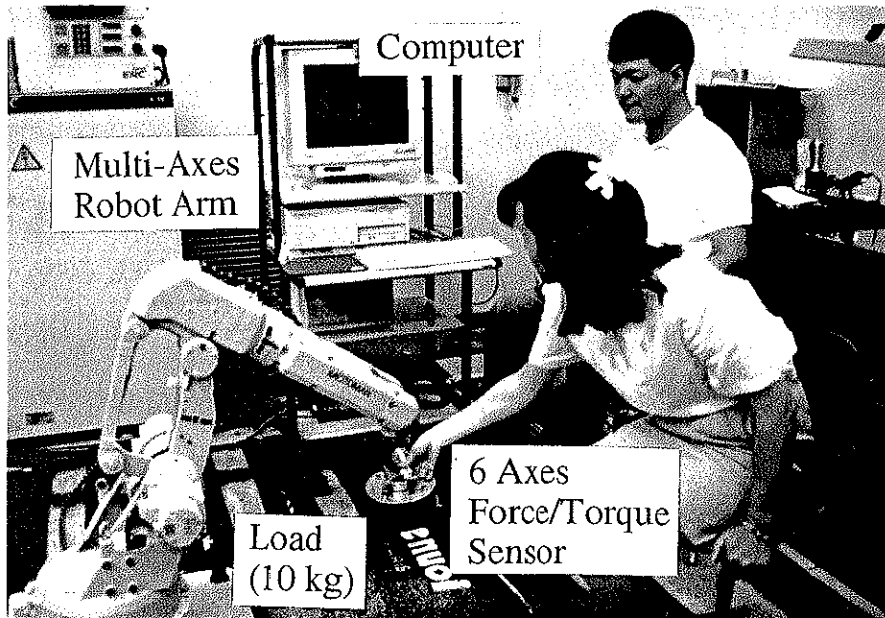


Fig.3-10 実験装置の外観

### 3. 5. 2 アームのモデリング

先に示したアームを用いて，安定性，応答性に優れたパワーアシスト装置を実現するためには，その制御系の構築時において，きめ細かに求められたアームの機構的特性，動力学的特性を考慮した設計が必要となる．また，パワーアシスト装置を設計するにあたり，その性能を見積もる，つまり実現できるアシスト効果の最大値を見積もるためにも，これらアームの特性を導出することは必要となる．したがって，本節では，これらアームの有する特性について述べる．なお，これと平行してアクチュエータとセンサの特性についても明らかにする必要があるが，これについては既に Fig.3-9 の中に示したため，ここでは特に論じないこととする．

#### (a) 自由度

まず，自由度の議論から始める．本装置は6関節のアームと6軸の力・トルクセンサから構成されるため，これに適切な制御系を加えることにより，6自由度のパワーアシスト装置を実現することができる．しかし，これを実験装置として考えた場合，いたずらに自由度を増やすことは，作業目標の提示，及び実験結果の解析を困難にするだけであるため，決して好ましいこととはいえない．したがって，これらのことを考慮して，本実験装置では，Fig.3-9 のベース座標系，詳しくはベースに固定されたデカルト絶対座標系の， $yz$  垂直平面内でのみパワーアシストを行うこととする．つまり，本装置の自由度をベース座標系の  $y, z$  軸の並進方向に2自由度， $x$  軸を中心とする回転方

向に1自由度とする。なお、ここで、選択した本装置の自由度は、後章で提案する制御系の有効性の検証には十分であることについて述べておく。

まず、実験により検証される制御系の構造から述べる。本装置に用いる制御系については次章において詳しく述べるが、その基となる制御則は、ベース座標系の各軸方向に、ほぼ等しいものが用いられる。ただし、厳密に述べると、本制御手法の核である重力負荷と動的負荷を分離する部分において、並進方向と回転方向で信号を処理する方法が少々異なるため、用いられる制御則は結局、並進方向と回転方向で1種類づつとなる。このように、本制御系では、ベース座標系の6軸の内、並進3軸と回転3軸において、それぞれ使用する制御則が等しいため、それぞれの軸から1軸づつ選択し、選択した軸方向にパワーアシストするように制御系を構成し、この制御系を用いたパワーアシスト装置で実験を行うことにより、全ての軸方向に対する制御系の有効性が検証できると考える。ここで、本装置の自由度は、先に述べたように、並進方向に2、回転方向に1であるため、制御系の有効性を検証するためには十分であると考えられる。

したがって、実際に本研究で用いる実験装置は Fig.3-9 で示したアームの関節の内、第2、第3、第5関節のみを駆動し、ベース座標系の  $yz$  平面内でパワーアシストを行う。このとき、実験装置は、負荷からアームに加わる  $y, z$  軸方向の並進力と  $x$  軸方向のトルクをアシストする。なお、第1、第4、第6関節は、金具及びサーボを用いて一定角に固定する。以後、本装置に関する議論は、ベース座標系の  $yz$  平面内でアームを駆動することを前提にして行う。

## (b) 運動学

yz 平面内におけるアームの各リンクの長さを, Fig.3-11 に示す. また, 図は同時に, 本アームにおける基本姿勢を示しており, 丸印で表される関節の角度が変位することにより, アームの手先位置が移動する. それを図で示したのが, Fig.3-12 である. 各関節変位角  $\theta_i$  は, それぞれの関節において基本姿勢から変位した角度を表している. ただし,  $\theta_2$  の角度は, この軸が平行リンクを用いて駆動されることから,  $\theta_1$  と同様に, 水平面から変位した角度で表される.

以上から, ベース座標系に基づくアーム手先の位置を求めると,

$$\begin{aligned} y &= D_0 - L_1 \cos \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 - D_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(-\theta_2 + \theta_3) \\ z &= L_0 - L_1 \sin \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + D_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(-\theta_2 + \theta_3) \\ \varphi &= -\theta_2 + \theta_3 \end{aligned} \tag{3.16}$$

となる.



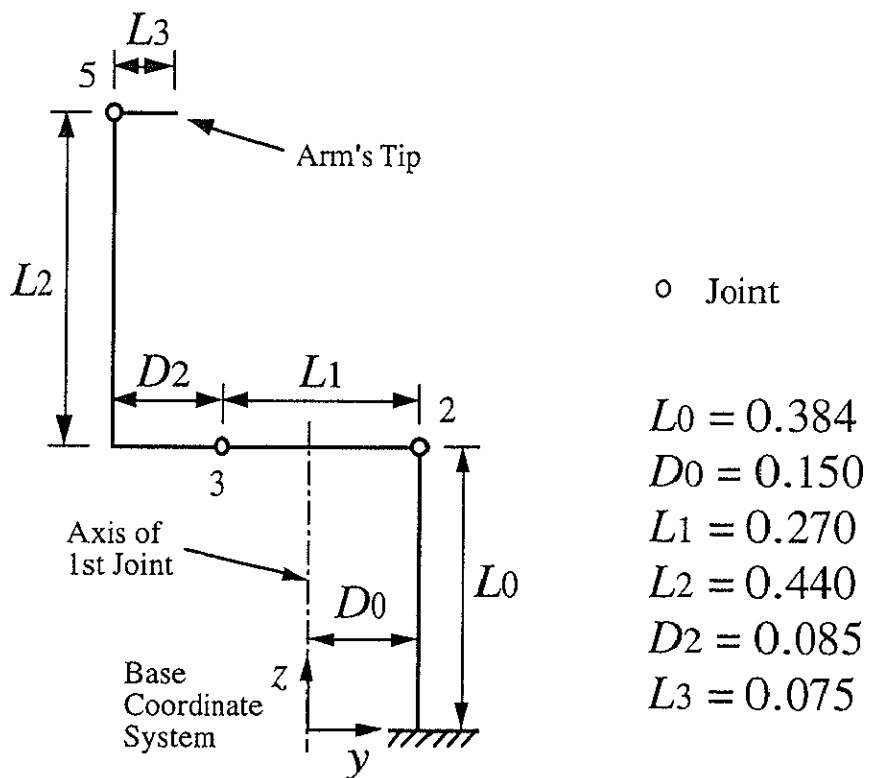
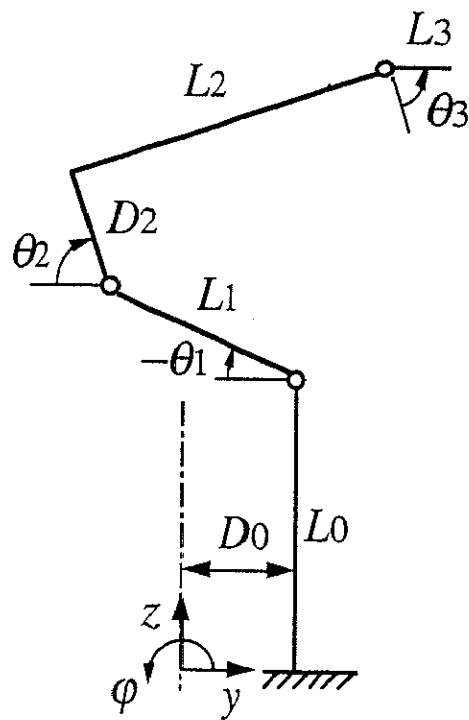


Fig.3-11 アームの各リンクの長さ



$$y = D_0 - L_1 \cos \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 - D_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(-\theta_2 + \theta_3)$$

$$z = L_0 - L_1 \sin \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + D_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(-\theta_2 + \theta_3)$$

$$\varphi = -\theta_2 + \theta_3$$

Fig.3-12 アームの運動学

## (c) ヤコビアン

アーム各関節の角速度とアーム手先の速度の関係，及び操作者手先に加わる力とそれによりアーム各関節に発生するトルクの関係を求めるため，式(3.16)に基づいて，ヤコビアンを求める．

まず，アームの手先位置を表すベクトルを  $\mathbf{X}=[y \ z \ \varphi]^T$  とし，アームの関節変位角を表すベクトルを  $\boldsymbol{\theta}=[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$  とする．ここで，ヤコビアンは，

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \quad (3.17)$$

であるため，各要素毎に偏微分して求めると，

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial \theta_1} &= L_1 \sin \theta_1, & \frac{\partial z}{\partial \theta_1} &= -L_1 \cos \theta_1, & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_1} &= 0 \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_2} &= L_2 \cos \theta_2 + D_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(-\theta_2 + \theta_3), \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_2} &= -L_2 \sin \theta_2 + D_2 \cos \theta_2 - L_3 \cos(-\theta_2 + \theta_3), \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_2} &= -1, & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} &= -L_3 \sin(-\theta_2 + \theta_3), \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_3} &= L_3 \cos(-\theta_2 + \theta_3), & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_3} &= 1 \end{aligned} \quad (3.18)$$

となる．したがって，ヤコビアンは，

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} L_1 s_1 & L_2 c_2 + D_2 s_2 + L_3 s_{23} & -L_3 s_{23} \\ -L_1 c_1 & -L_2 s_2 + D_2 c_2 - L_3 c_{23} & L_3 c_{23} \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

となる．ただし，

$$\begin{aligned}
 s_1 &= \sin\theta_1, & c_1 &= \cos\theta_1, & s_2 &= \sin\theta_2, & c_2 &= \cos\theta_2 \\
 s_{23} &= \sin(-\theta_2 + \theta_3), & c_{23} &= \cos(-\theta_2 + \theta_3)
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

である。

#### (d) 逆運動学

本アームの逆運動学を求める。Fig.3-13 に示すように、アーム手先の位置  $y, z$  及び姿勢  $\varphi$  から、各関節の変位  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  を求める式を、幾何学的な解法を持ちいて求めると、

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \xi + \zeta - \pi \\
 \theta_2 &= -\theta_1 + \theta_2' - \arctan(D_2, L_2) + \pi \\
 \theta_3 &= \psi + \theta_2
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

となる。ただし、図に示すように、

$$\begin{aligned}
 y_2 &= y - L_3 \cos\varphi \\
 z_2 &= z - L_3 \sin\varphi \\
 \theta_2' &= \cos^{-1} \frac{y_2^2 + z_2^2 - (L_1^2 + D_2^2 + L_2^2)}{2L_1\sqrt{D_2^2 + L_2^2}} \\
 \xi &= \arctan(y_2, z_2) \\
 \zeta &= \cos^{-1} \frac{y_2^2 + z_2^2 + L_1^2 - (D_2^2 + L_2^2)}{2L_1\sqrt{y_2^2 + z_2^2}}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

である。



## (e) 動力学特性

アームの応答性を高め、高速な動作を行うためには、制御系の設計時において、アームの動力学的な特性、つまりアームの慣性、摩擦、重力などを考慮して制御系を構築することが必要となる。また、アクチュエータの最大トルクに対して、操作者の適切な負担率を計算により見積もる場合などにも、これらの動力学特性が必要となる。したがって、本研究では、パワーアシストの制御系を構築するにあたり、アクチュエータのトルクに対するアームの挙動を計測して、慣性、摩擦、重力の推定を行った。以下に、その結果について述べる。

まず、Fig.3-14 に示すように、各リンクの慣性を  $m_i$ 、粘性摩擦係数を  $b_i$ 、クーロン摩擦を  $c_i$ 、重力により生じるトルクを  $g_i$  とする。これらの値は、アクチュエータのトルクに対するアームの挙動から、以下のように推定された。

$$\begin{aligned} m_1 &= 3.82, b_1 = 7.26, c_1 = +19.1/-11.5, g_1(\theta_1) = 45.8 \cos \theta_1 \\ m_2 &= 3.79, b_2 = 14.5, c_1 = +32.5/-1.91, g_2(\theta_2) = 23.0 \sin \theta_2 \\ m_3 &= 0.158, b_3 = 1.87, c_1 = +4.44/-4.44, g_3 = 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

ここで、本アームは多関節リンクから構成されているため、厳密に言えば、慣性  $m_i$  は、アームの姿勢、つまり関節変位角  $\theta_i$  に依存して変化する変数である。しかし、リンクとアクチュエータの出力軸の間に減速機を介していることから、この減速機によりアクチュエータのロータの慣性が等価的に増幅され、相対的にリンクの慣性はシステムに対して小さな影響しか及ぼさないと推測される。したがって、本装置においては、アームの姿勢による慣性  $m_i$  の変化は小さいとして無視する。さらに、減速機を用いることにより摩擦力が増大し、相対的にコリオリ力や

遠心力がシステムに与える影響が小さくなるため、これらの力についても無視する。ここで、上で推定した摩擦には、粘性摩擦とクーロン摩擦があるが、クーロン摩擦は異方位性があるため、関節変位角  $\theta_i$  の順方向をプラス、逆方向をマイナスとし、駆動時に必要なトルクを各方向毎に1つずつ示した。

以上の動力学特性を表すパラメータから、Fig.3-14 に示すように、アクチュエータなどにより各関節に生じるトルクを  $\tau_i$  とすると、各関節の運動方程式は、

$$\tau_i = m_i \ddot{\theta}_i + b_i \dot{\theta}_i + c_i - g_i(\theta_i) \quad (3.24)$$

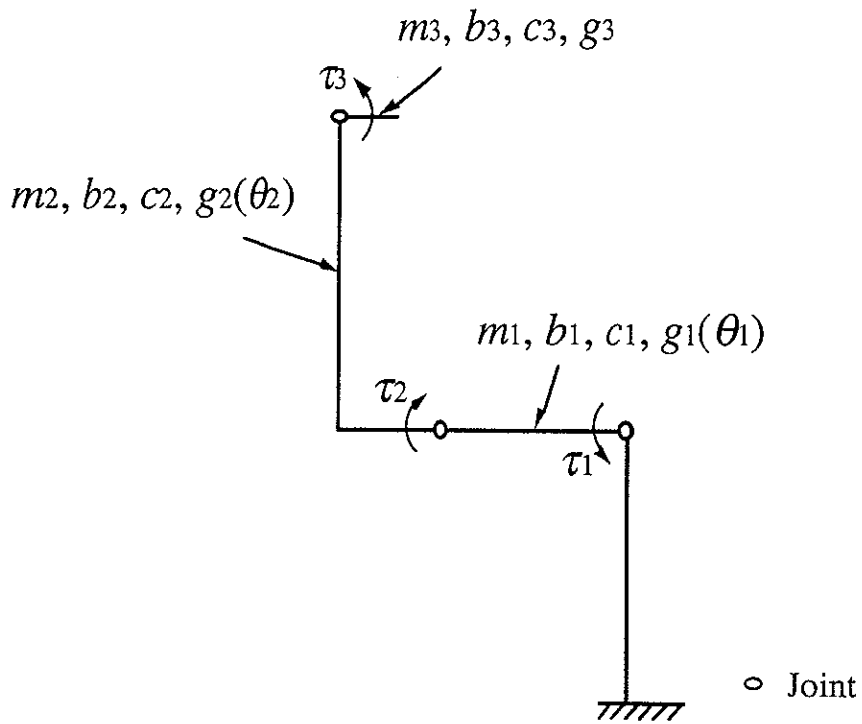
と表される。また、これをベクトル及び行列を用いて表すと、

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) \quad (3.25)$$

となる。ここで、ベクトル  $\boldsymbol{\tau}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ , 行列  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$  はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T, \quad \mathbf{M} = \text{diag}(m_1, m_2, m_3), \quad \mathbf{B} = \text{diag}(b_1, b_2, b_3), \\ \mathbf{C} &= [c_1 \quad c_2 \quad c_3]^T, \quad \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = [-g_1(\theta_1) \quad -g_2(\theta_2) \quad -g_3]^T \end{aligned} \quad (3.26)$$

である。



$$\begin{aligned}
 m_1 &= 3.82, b_1 = 7.26, c_1 = +19.1/-11.5, g_1(\theta_1) = 45.8 \cos \theta_1 \\
 m_2 &= 3.79, b_2 = 14.5, c_2 = +32.5/-1.91, g_2(\theta_2) = 23.0 \sin \theta_2 \\
 m_3 &= 0.158, b_3 = 1.87, c_3 = +4.44/-4.44, g_3 = 0
 \end{aligned}$$

Fig.3-14 慣性, 粘性摩擦, クーロン摩擦, 重力



### 3. 5. 3 実験方法

まずは、実験方法について述べる。本実験では、被験者に対して、等速で一定の円軌道を描く目標軌道を与え、これに追従するように負荷を操作してもらい、そのときのアーム手先の位置、操作者及び負荷からアームに加わる力、アクチュエータの出力トルクを 50ms 毎に記録した。なお、今回の実験は並進力方向のみアシストし、回転方向のアシストは行わない。実験は、Fig5-9 に示すように、コンピュータディスプレイ上にアーム手先の位置を示す白色の“+”印と、目標位置を示す青緑色の“+”印を共に提示し、これができるだけ重なるように、パワーアシスト装置を介して、被験者に 10kg の負荷を操作させる。ここで、ディスプレイ上に表示される情報は、このアーム手先の現在位置と、目標位置の他に、目標位置の移動する軌道を示す円があるが、すべての情報は、実空間のベース座標系における個々の座標と対応した位置に描かれる。つまり、Fig.3-15 に示すように、ディスプレイ上に描かれる点は、ベース座標系における y 軸方向の値に比例して横方向の位置が定まり、z 軸方向の値に比例して横方向の位置が定まる。このようにディスプレイ上の各点は、実空間内のベース座標系における yz 軸方向の位置に比例して描かれるため、これを基に被験者は目標位置にできるだけ素早く負荷を操作するようにアーム手先に力を加える。ここで、実験開始からの時間を  $t(s)$  とすると、被験者が追従する目標位置は、ベース座標系の

$$\begin{aligned} y &= 0.12 \cos 4.0t + 0.61 \\ z &= 0.12 \sin 4.0t + 0.42 \end{aligned} \quad (3.27)$$

で表される一定の円軌道の上を左回りに等速で移動する。したがって、先のコンピュータディスプレイ上では、目標位置を示す青緑色の“+”印が一定の円軌道を等速で移動するため、これに負荷の位置を示す白色の“+”を追従させるように被験者は負荷を操作する。

以上示した円軌道に対するトラッキング実験を、従来手法においてアクチュエータのトルク飽和が生じる場合と、提案手法を用いた場合の2種類の実験条件の基で行った。具体的には、操作者負担率  $\alpha$ ,  $\beta$  の対角成分を各実験条件毎に、(a)  $\alpha_{ii}=0.2, \beta_{ii}=0.2$ , (b)  $\alpha_{ii}=0.2, \beta_{ii}=0.5$  と設定し、この負担率において操作者に負荷を操作させた。また、アーム手先の目標インピーダンスを表す行列  $M_d$ ,  $B_d$  の対角成分にはそれぞれ 25.0, 25.0 を用いた。ここで、実験 (a) は、重力負荷と動的負荷の操作者負担率  $\alpha$ ,  $\beta$  が等しいため、これらの負荷を分離することなくアシストする従来手法に相当する。また、この実験 (a) では、被験者が負荷を素早く動かしたときに、アクチュエータのトルク飽和が生じるように負担率  $\alpha$ ,  $\beta$  を小さく設定している。一方、実験 (b) は、重力負荷の負担率  $\alpha$  を小さく設定し、動的負荷の負担率  $\beta$  をトルク飽和が生じないように大きく設定する提案手法に相当する。以上示した実験条件に基づいて各実験を行うが、さらに、上記で想定した飽和特性が得られるように、アーム第3関節のアクチュエータの最大トルクを、ソフトウェアで  $\tau_{2max}=90\text{Nm}$  に制限した。

以上述べた実験を、20才代の男女5人について行った。被験者には、予めこの装置に慣れさせ、学習の効果をできるだけ少なくした後、実験を行った。

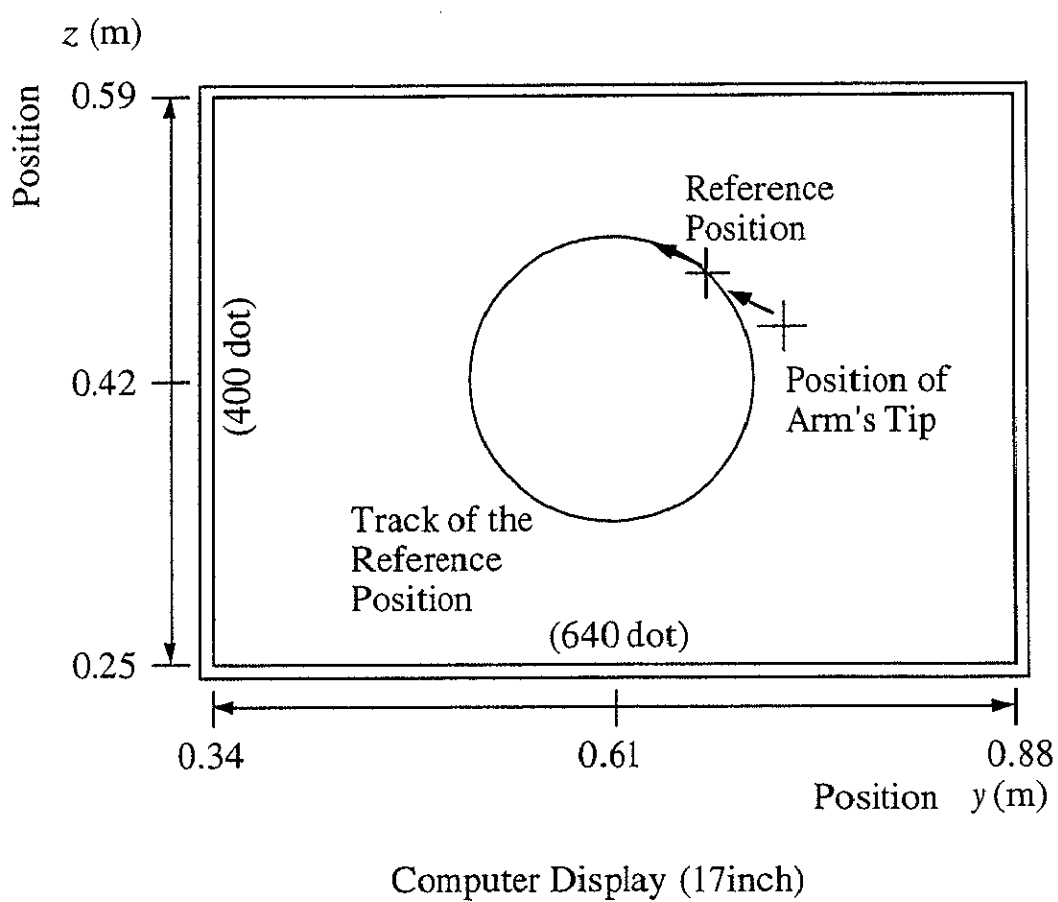


Fig.3-15 操作者に提示される目標位置及びアーム手先位置

### 3. 5. 4 実験結果及び考察

実験結果を Fig5-10 に示す。図は、先に示した操作者負担率  $\alpha$ ,  $\beta$  を用いてパワーアシストを行ったときのアーム手先の軌跡及び目標位置の軌跡, 操作者と負荷からアームに加わる鉛直方向の力, アーム第3関節のアクチュエータの出力トルクを表している。また, アーム手先の軌跡を表す図の中の太線は, このときにアクチュエータのトルク飽和が生じていることを示している。なお, これは一被験者についての結果であるが, 他の被験者においても同様の傾向が見られた。ちなみに, ここでは計測された実験結果の内, 実験開始10秒後から5秒間を抽出して表示した。

まず, 負担率  $\alpha$ ,  $\beta$  を小さく設定した実験 (a) の結果から, 目標円軌道の内, 負荷を上方向に加速するときに, 第3関節のアクチュエータがトルク飽和を生じていることが分かる。また, アクチュエータのトルク飽和が生じると, アーム手先の軌跡は目標軌道から大きくずれ, いびつな円軌跡を描いていることが分かる。結論を先に述べると, アクチュエータにトルク飽和が生じると, このように操作者の意図した軌道に沿って負荷操作ができなくなるため, アクチュエータのトルク飽和が操作性を劣化させることは明らかである。次に, このような現象が生じる原因について考察する。

まず, この原因として考えられるのは, 一自由度の装置の場合と同じく, アクチュエータのトルク飽和により一定のアシスト効果が維持し得なくなったため, 操作者が負担する負荷の動力学的な挙動が変化し, これにより操作者が臨機応変かつ試行錯誤的な負荷操作を要求されたことが挙げられる。ただし, 今

回の実験結果を見ると，原因はそればかりではなく，他の原因も作用していることが分かる．

本実験装置の制御系には，内部に位置制御を内包するインピーダンス制御が用いられる．このような制御系では，アクチュエータにトルク飽和が生じ，各関節に十分なトルクが供給されなくなると，目標インピーダンスを基に割り出されるアーム手先の目標位置  $X_d$  と，実際の位置  $X$  の間に大きな差が生じるようになる．この現象を本実験に当てはめると，Fig.3-15 に示すように説明することができる．つまり，まず，(1)の時点で，まずトルク飽和が生じると，負荷は操作者にとって重く感じられるため，操作者はより多くの力を負荷に加える．この時点でアーム手先の目標位置  $X_d$  は実際の位置  $X$  から急速に離れていく．本来ならば，アーム手先はこの目標位置に追従するように位置制御されるが，アクチュエータの出力トルクが十分でないため，追従することができず，アーム手先の位置  $X$  と目標の位置  $X_d$  に大きな差が生まれる．次に，(2)の時点で，操作者は負荷を減速しようとするが，既にアーム手先の目標位置  $X_d$  が現在位置  $X$  からかなり離れた点にあるため，この点  $X_d$  に向かうようにアクチュエータはトルクを出力し続ける．最後に，(3)の時点で，操作者が減速を試み続けることにより，前とは反対に，アーム手先の目標位置  $X_d$  が急速に現在位置  $X$  まで戻るため，これによりトルク飽和が生じる前と同じ状態に戻る．この一連の作用によって，アーム手先は，Fig.3-16 に示した実験結果のような軌跡を描く．これを回避するためには，アーム手先の目標位置と現在位置の誤差を生じる原因となる，位置制御を内包するインピーダンス制御系を，ダイレクトドライブ (DD) アームでしばしば用いられているような，位置制御系

を含まないインピーダンス制御系にすればよい<sup>50)</sup>。ただし、重負荷を操作するパワーアシスト装置に、DDモータのような力指令型アクチュエータを用いることは、構造的に大きくなり多大な困難が伴うため、現実問題としてこの対処法は効果的とはいえない。次に考えられる対処法としては、PID制御のI成分により生じるハンチングを回避するときに用いられるように、トルク飽和時に誤差を生じる原因となる、積分を一時停止するという方法が考えられる。しかし、このような手法を用いると、トルク飽和時に操作者の意志が反映されなくなり、またこれによりトルク飽和が回避できる保証もないため、操作性はおろか安全性にも問題が生じてしまうため、この対処法も効果的とはいえない。これら示した以外にも対処法はあると考えるが、仮に完全にこの問題を解決したとしても、先に述べたようにアシスト効果の変動という、もう一つの操作性劣化の原因があるため、結局は、アクチュエータにトルク飽和を生じさせるようなパワーアシストは避けるべきであると考えられる。

この実験(a)に対し、提案手法を用いた実験(b)の実験結果は、重力負荷については実験(a)と同じく大きくアシストしているにも関わらず、負荷を素早く操作してもアクチュエータのトルク飽和が生じていないことが分かる。なお、従来手法においてこのようにトルク飽和を回避するためには、重力負荷の負担率 $\alpha$ も含めた操作者負担率全てを上げなければならなかった。これらのことを考慮すると、提案するパワーアシスト法は、アクチュエータのトルク飽和を回避しながら、常に操作者に加わる重力負荷を優先してアシストすることができ、操作者の負担を軽減できるため、従来手法に対して優位性を有しているといえる。

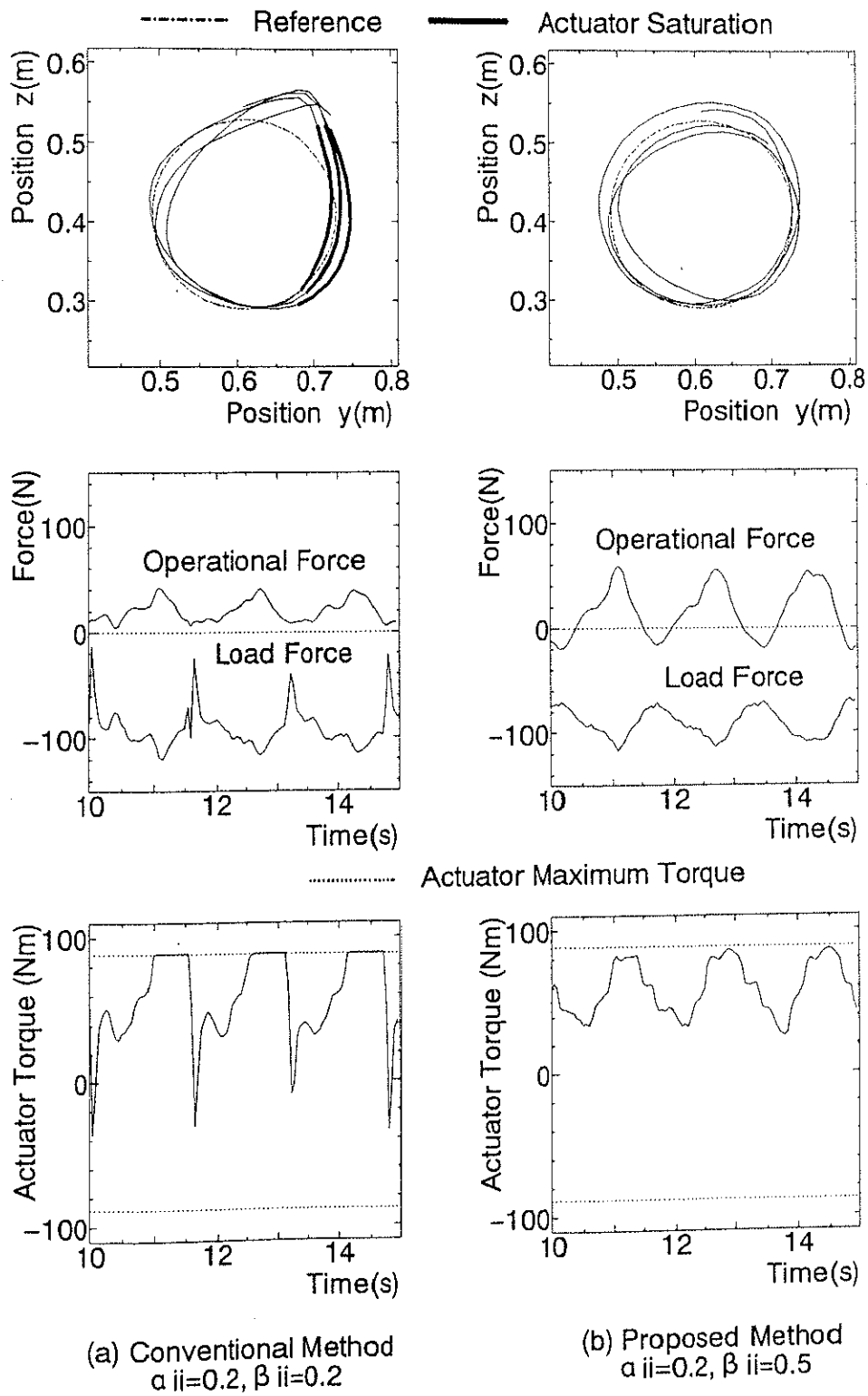


Fig.3-16 実験結果 (被験者 H.T)

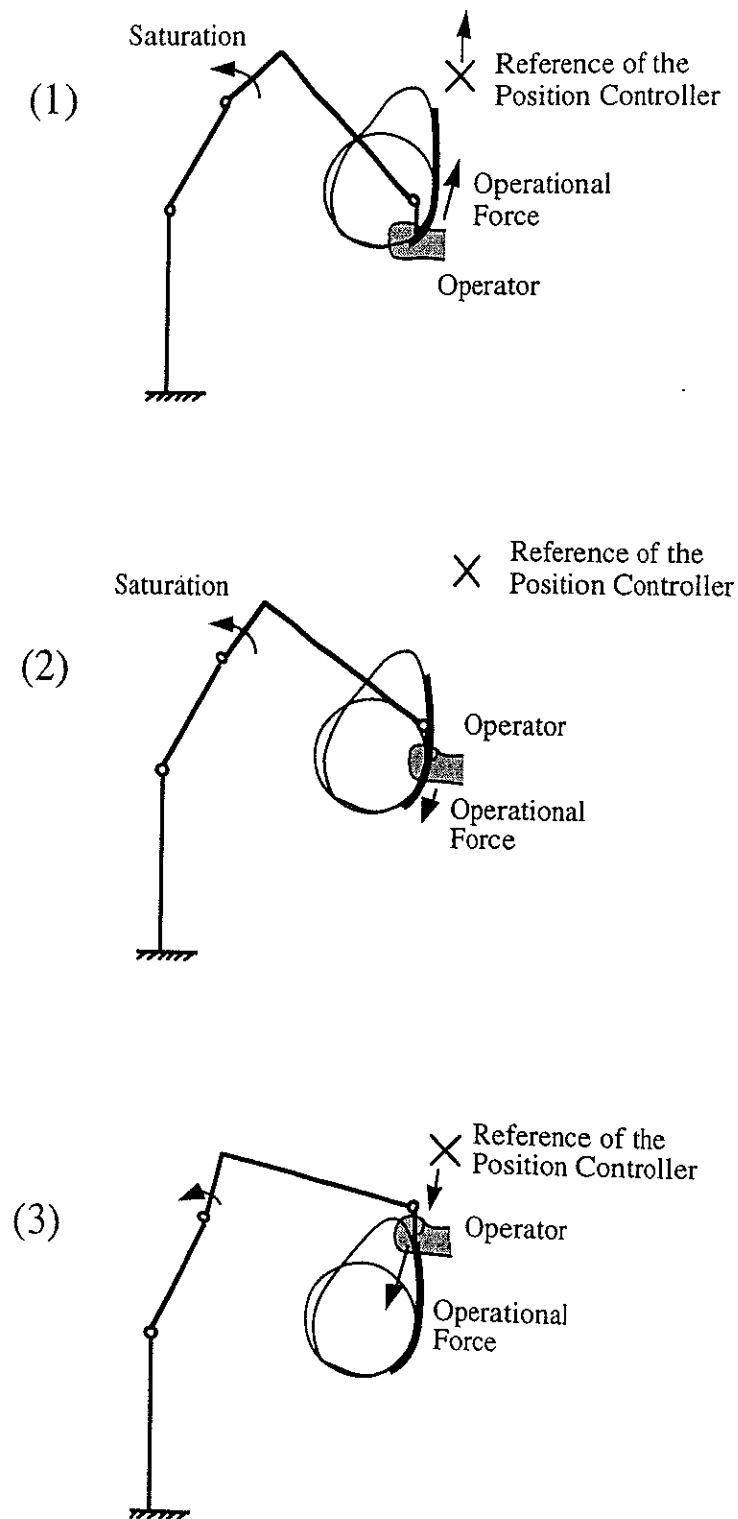


Fig.3-17 アクチュエータのトルク飽和時の位置制御の目標位置とアーム手先位置



### 3. 6 まとめ

本章では，提案するパワーアシスト法を，多自由度システムにおいて実現する制御系の設計法を示し，実験によりその有効性を確認した．具体的には，まず，多自由度パワーアシスト装置に用いる多関節アームの運動方程式を求め，次に，多自由度システムにおいて，提案するパワーアシストを実現するにあたり，制御系がアーム手先において達成すべき操作者と負荷の力の関係を定式化した．さらに，上記のアームの特性を考慮しながら，この関係を実現する制御系の構成を示した後，新たに試作した多自由度パワーアシスト実験装置を用いた実験により，その制御系の有効性を確認した．