

- 卒業論文 -

モーメント制御に基づくロボットマニピュ  
レータの二次元協調制御法

平成17年2月9日

指導教員: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

30350 中村 壮亮

# 目次

第1章	序論	1
1.1	協調制御系の有用性と既存研究の紹介	1
1.2	協調制御における問題点と課題	1
第2章	y軸方向モーメント制御を用いた2次元協調制御手法の提案	2
2.1	提案手法の概要	2
2.2	本手法を提案するに到った背景	2
2.3	研究の目的	3
第3章	軌道制御系の構築	4
3.1	キネマティクス問題	4
3.2	逆キネマティクス問題	5
3.3	実用的な逆キネマティクス問題の解法	6
3.4	2自由度制御系の構築	7
3.5	全体の軌道制御系	8
第4章	x軸方向への力制御系	9
4.1	物理モデルの解析と力制御系への組み込み	9
4.2	PI力制御系の設計・シミュレーション	10
4.3	2自由度力制御系の設計・PI制御系との比較	13
第5章	y軸方向へのモーメント制御系	16
5.1	物理モデルの解析とモーメント制御系への組み込み	16
5.2	PIモーメント制御系の設計・シミュレーション	18
5.3	y軸モーメント制御系のy軸力制御系に対する優位性の考察	18
第6章	干渉問題も含めた2次元協調制御系全体のシミュレーション	21
第7章	結論	26
7.1	本論文のまとめ	26
7.2	今後の課題	26
	参考文献	27
	発表文献	29
	謝辞	30

# 第1章 序論

## 1.1 協調制御系の有用性と既存研究の紹介

協調制御とは一般的に複数のロボットマニピュレータを用いた制御手法のことを示す。複数のマニピュレータを用いると単体では実現できない作業が可能となる。具体的には単体のときに比べて、巨大なものや様々な形状の物の把持が可能となる。

把持に際してはマニピュレータの手先となるエンドエフェクタの形状が重要であり、本論文で用いるモデルと同様な板状のもの [1][2] の他にも、人間の手の様な構造をもった多指ハンド [3][4]、吸着型のもの、両開き・片開きハンドなど様々なものが研究されている。また、把持形態の分類も様々な研究がなされてきた。把持動作の接触面の作用によって把持を分類する方法として GSD などがある。

協調制御とは一般には複数のロボットマニピュレータを用いたものであるが、マニピュレータ同士だけでなく人間と協調して荷物を搬送したりといったことも協調制御の分野の一つである。人間とロボットの協調制御における諸特性を、人間同士の協調搬送におけるモデルになった研究も様々なものが行われている。 [5]

## 1.2 協調制御における問題点と課題

広範な作業が可能となる協調制御であるが、その実現にあたっては様々な問題も存在する。例えばマニピュレータが接触する環境に関する問題があげられる。これは環境モデルを正確に同定することや制御系に対して環境モデルに対するロバスト性を持たせることで解決できる。環境モデルに対してロバストな制御としては [6][7] など様々な研究が行われている。他にはマニピュレータの種類に応じた動作上の問題点もあげられる。ロボットには足が可動式のものと同定式のものがあり、可動式のものに関しては柔軟な位置制御が可能となる反面その重心位置をきちんと把握して転倒を防ぐなどといったことに注意する必要がある。さらに協調制御の力学的解析の正確性も問題である。協調制御における力学モデルは一般的に複雑であり、搬送物質の各マニピュレータへの分配率など [5][8] を正確にモデリングするのは困難である。また、協調制御における位置制御精度の向上のため各マニピュレータ間の通信を行うことがあるが、これも通信の時間遅れやシステム全体のコストの面からしても問題点が多い。この他にはマスターの急な動きや搬送中の事故などでスレーブ側に衝撃力が加わることがあるが、これらの衝撃力の低減も含めた、衝撃力に対してロバストな制御系を構築することなども重要な課題である。

このように制御系を構築すること自体が困難な協調制御系においては、多次元での協調制御となると十分な研究は行われていないのが現状である。そこで本論文では多次元協調制御系構築の手法の一つを提案する。

# 第2章 $y$ 軸方向モーメント制御を用いた2次元協調制御手法の提案

## 2.1 提案手法の概要

本論文では、板上のエンドエフェクタを持ち、2台の足が固定されたロボットを用いる協調制御系を扱うことにする。2台のマニピュレータを用いた協調制御における制御手法としては様々なものが考案されている。ここでは図2.1に示すように、マスターが位置を決定しスレーブがマスターの位置に追従するように制御されるマスター・スレーブ型制御と呼ばれる制御手法を扱う。

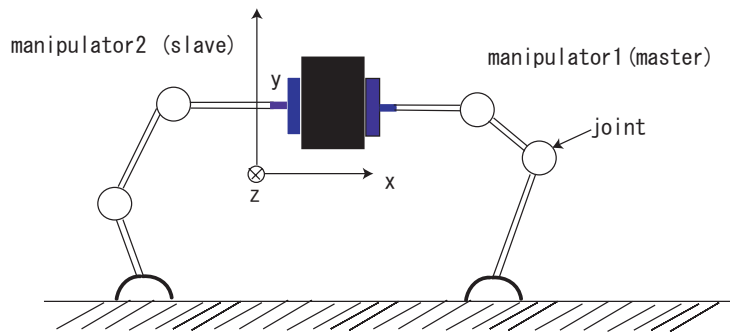


Fig 2.1: 協調制御系の物体搬送に関する模式図

マスター・スレーブ型制御のように各マニピュレータごとに異なるシステムを持たせることによって実現される協調制御を分散協調制御と呼ぶ。これを実現する具体的な制御手法としてスレーブは $x$ 軸方向に力制御、 $y$ 軸方向にモーメント制御を行う $y$ 軸モーメントベース制御を提案する。力制御・モーメント制御はコンプライアンス制御に分類される。コンプライアンス制御とは位置変位から力学モデルにかかる力やモーメントを環境モデルにより計算して、その力やモーメントを制御するものである。これには Salisbury によって提案された剛性制御 [9]、Whitney によって提案された粘性制御 [10] などがあるが、ここではそれらを一般化したインピーダンス制御を用いる。

## 2.2 本手法を提案するに到った背景

1次元での協調制御系の研究に比べて2次元のものは少なくモーメント制御系を用いることや各軸制御系の干渉を考慮した研究となると例を見ない。そこで本研究ではこれらを考慮した2次元協調制御の手法を提案しその有用性を示す。なお、ここでは $x, y$ 軸での2次元搬送モデルの実現を考えるのであるが、 $z$ 軸方向に関しては $y$ 軸方向と原理的に等価なものであるため、ここで扱う2次元搬送モデルが実現されれば3次元搬送モデルへの拡張も可能であることを述べておく。

では、この2次元協調制御をどのように行うかであるが、本研究ではそのヒントを人間同士の物体搬送に得た。今2人の人間A,Bが手のひらを図2.2のような姿勢に向けて物体を把持しているとする。ここで、人間B(スレーブに対応)は目を閉じているものとする。

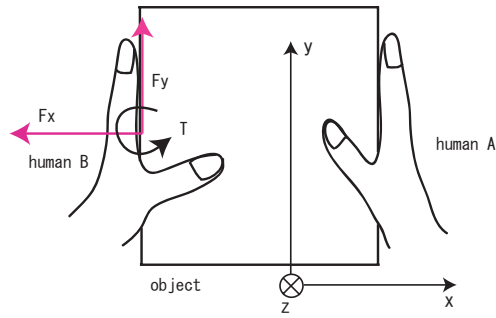


Fig 2.2: 人間による物体搬送

人間A(マスターに対応)が2次元平面内の適当な方向へ物体を誘導したときに人間Bは何らかの物理量を感じてそれを位置修正情報に変換することで追従しているはずである。では、何を感じているのであろうか。

$x$ 軸方向に対しては押し引きの力の強弱を感じてそれを位置修正情報としており、 $y$ 軸方向に対しては摩擦力または手のひらにかかる圧力差すなわちモーメントを感じて位置修正情報としてしていると考えられる。そこで $x$ 軸方向に対しては押し引きの力の強弱を利用した力制御によって位置修正を行うことを考える。この種の力制御は既に研究されており[2]実現可能であることが知られている。これに対して $y$ 軸方向への制御については既存研究はない。 $y$ 軸方向への制御手法としては $y$ 軸方向への力である摩擦力に対する力制御と圧力差によるモーメント制御の二つの手法が考えられる。ここで本論文では摩擦力に基づいた力制御ではなく、圧力差に基づいたモーメント制御を提案する。 $y$ 軸方向に対して力制御ではなくモーメント制御を用いた有効性を示すために、第5章で $y$ 軸に関するモーメント制御と力制御の両手法の力学モデルに基づいた比較を行った。

## 2.3 研究の目的

本研究では既存研究も多い $x$ 軸方向のみの力制御に加えて、 $y$ 軸方向へのモーメント制御を新たに提案し、2次元での協調制御の実現を目指す。さらに、具体的な2次元円運動モデルにおいて各軸制御系の干渉問題を考慮した制御系と考慮しない制御系の比較を行う。そしてその結果から干渉問題を無視することによって各軸独立な制御が可能となることを示す。また2次元円運動におけるスレーブの追従性能が十分なものであることを検証する。本研究の課題を列挙すると以下ようになる。

- ・  $x$ 軸力制御系および $y$ 軸モーメント制御系の有用性を示す
- ・ 各軸が干渉しあわず、独立に制御可能であることを示す
- ・ マスターの2次元円運動指令に対するスレーブの追従性能のシミュレーション

以下では第4章で $x$ 軸方向の制御について述べ、第5章で $y$ 軸方向の制御について述べる。そして第6章で2次元協調制御を行う際のこれらの制御系の干渉について考察する。その前に第3章では $x$ 方向, $y$ 方向どちらの制御系でもマイナーループに含まれる軌道制御系の構築について述べることにする。

# 第3章 軌道制御系の構築

軌道制御系とはマニピュレータへの位置入力とマニピュレータの位置出力との関係を示したものであり、プラントモデルと2自由度制御器から構成できる。軌道制御に関してはロボットの関節空間と実際の作業空間との間の座標変換が必要である。関節空間における各リンクの関節角度からエンドエフェクタ（マニピュレータの手先）の作業空間上の位置・姿勢を導出する問題をキネマティクス問題、逆に手先の作業空間上の位置・姿勢から各リンクの関節角度を決定する問題を逆キネマティクス問題と呼ぶ。逆キネマティクス問題は解が存在しない場合や（可動領域外の場合）、複数存在する場合が一般的であるためその解法はキネマティクス問題と比して複雑である。以下にその考え方を示す。

## 3.1 キネマティクス問題

キネマティクス（順運動学）とはロボットの各関節の変位と角度を与えて、エンドエフェクタの位置と姿勢を求める問題を扱うことである。ロボットアームの各リンクの長さとは各関節角度をあらわすリンクパラメータを定義すると各リンク座標系の関係が同次変換行列であらわされる。そしてその同次変換行列は4\*4の形で一般的にあらわされる。例えば、6自由度PUMA式では4\*4行列6つの積によってあらわされ、2自由度マニピュレータ(SICE-DD)では4\*4行列2つの積であらわされることになる。一般的にマニピュレータは3次元動作が可能である6自由度のものであるが、ここで扱う2次元動作においてはこのうち3軸のみを動かすことで所定の動作を得られる。残りの3軸は一定値に固定しておく。つまり簡略化すると図3.1のような3自由度マニピュレータとして取り扱う問題に帰着される。また、2次元でのキネマティクスではz座標成分は固定として無視して3\*3行列の同次変換行列で表せる。今、具体的に各リンク座標間の同次変換行列を書くと

$$\begin{aligned} A_1 &= Rot(z, \theta_1) Trans(L_1, 0, 0) \\ &= \begin{pmatrix} \cos_1 & -\sin_1 & L_1 \cos_1 \\ \sin_1 & \cos_1 & L_1 \sin_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= Rot(z, \theta_2) Trans(L_2, 0, 0) \\ &= \begin{pmatrix} \cos_2 & -\sin_2 & L_2 \cos_2 \\ \sin_2 & \cos_2 & L_2 \sin_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} A_3 &= Rot(z, \theta_3) Trans(L_3, 0, 0) \\ &= \begin{pmatrix} \cos_3 & -\sin_3 & L_3 \cos_3 \\ \sin_3 & \cos_3 & L_3 \sin_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

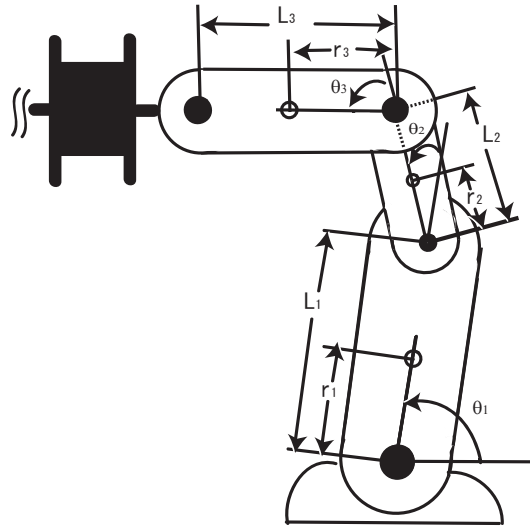


Fig 3.1: 3自由度マニピュレータの模式図

となる。\$A\_1\$において、\$Rot(z, \theta\_1)\$は\$z\$軸周りに\$\theta\_1\$だけ座標回転することに対応する回転行列であり、\$Trans(L\_1, 0, 0)\$は\$x\$方向に\$L\_1\$だけ座標が並進移動することに対応する行列である。\$A\_2, A\_3\$についても同様である。\$A\_1\$と\$A\_2\$と\$A\_3\$の積によって作業空間座標からエンドエフェクタ座標までの全体の座標変換行列\${}^0T\_3\$が求まる。具体的に

$$\begin{aligned}
 {}^0T_3 &= A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \\
 &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos \theta_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

となる。この\$3 \times 3\$行列によってエンドエフェクタ座標での位置を作業空間座標での位置に変換するのである。そこで、基準座標を\$x\_s, y\_s\$座標、エンドエフェクタ座標を\$x\_e, y\_e\$座標とし、座標間の関係を示すと

$$\begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0T_3 \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

のようになる。ともに3行目は1であり、並進運動をあらわすための便宜的な値である。

## 3.2 逆キネマティクス問題

逆キネマティクス問題とはエンドエフェクタ座標での位置と作業空間座標での位置が与えられたときに、各関節の関節角度を求める問題を扱うことである。つまり、これは(3.5)

式を直接計算し、変換行列の各成分にあらわれる関節角度を決定するという問題である。具体的に上記のモデルに対して逆運動学を用いることを考える。エンドエフェクタ取り付け部の作業空間座標を  $(x, y)$  とし、リンクの長さを  $L_1, L_2, L_3$ 、関節角度を  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  とする。今、図 3.1 のようにリンク 3 は床と並行な姿勢になっているものとする。これは

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \pi \quad (3.6)$$

なる束縛条件を意味する。よって、 $(x_s, y_s) = (x, y), (x_e, y_e) = (0, 0)$ , (3.4) 式, (3.6) 式を (3.5) 式に代入して、

$$\theta_2 = \arccos \frac{(x + L_3)^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (3.7)$$

$$\theta_1 = \arccos \frac{(x + L_3)(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + yL_2 \sin \theta_2}{(L_1 + L_2 \cos \theta_2)^2 + (L_2 \sin \theta_2)^2} \quad (3.8)$$

と求まる。なお、このような 3 自由度マニピュレータでは簡単に逆キネマティクス問題を扱うことができるが、本論文で提案する 2 次元協調制御系を 3 次元に拡張する際には自由度が 6 自由度となるため直接的な解析は非常に複雑である。3 次元協調制御を行う際の 6 自由度マニピュレータでは逆キネマティクス問題は解が複数あるなどしてこの直接的な解法は実用的でないのである。このような場合の実用的な手法としてニュートン・ラフソン法がある。

### 3.3 実用的な逆キネマティクス問題の解法

逆キネマティクスを考える上で代数的な解法としてニュートン・ラフソン法がある。これは非常に簡単な漸化式的アルゴリズムを持っている。今、目標位置・姿勢のベクトル  $r_{ref}$  が与えられたとして、その目標位置に対応する関節角度ベクトルを求める問題を考える。まず始めに空間上の手先位置姿勢ベクトル  $r$  と関節角度ベクトル  $q$  との間には各々のマニピュレータ独特の機構による関係が成り立つ。それを関数  $f$  で、

$$r = f(q) \quad (3.9)$$

のように表す。今、ヤコビ行列を

$$J = \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \cdots & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

で定め、これを収束度合を表す指標  $k$  を用いて

$$r_i = f(q_i) \quad (3.11)$$

$$q_{i+1} = q_i + kJ^{-1}(r_{ref} - r_i) \quad (3.12)$$

のような漸化式を計算する。この  $q_n$  の収束値が求める関節角度  $q$  である。計算のはじめに適当な  $q_0$  を与えることになるがこの与え方によって導出される  $q$  の結果が異なってくる。ある程度の当たりをもって初期条件  $q_0$  を決定してやるのが肝要である。実際には初期値としては直前のデータを与えるため、反復回数は 1 回で良好な結果となる。



### 3.4 2自由度制御系の構築

次に軌道制御の手法であるが、ここでは2自由度位置制御を用いる。2自由度位置制御器では目標値応答特性と外乱抑圧特性を独立に設定することができる点に大きなメリットがある。これによってシステムの応答特性とは独立した形で外乱の抑圧が可能となるのである。具体的な2自由度位置制御器のブロック線図は図3.2のようになる。

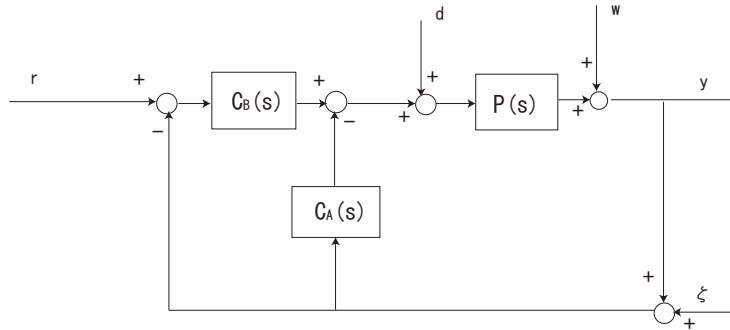


Fig 3.2: 2自由度位置制御器

ここで制御対象のモデル制御特性は以下のように定義される。

$P(s)$  : 実際のプラント (マニピュレータ)

$P_n(s)$  : プラントのノミナルモデル (同定モデル)

$G_{ry}(s)$  : プラントがノミナルのときの目標値応答特性

$G_{dy}(s)$  : プラントがノミナルのときの外乱応答特性

また、補償器  $C_A(s), C_B(s)$  は次式であらわされる。

$$C_A(s) = \frac{1}{P_n(s)} \frac{Q}{1-Q} \quad (3.13)$$

$$C_B(s) = \frac{G_{ry}(s)}{1-G_{ry}(s)} \frac{1}{P_n(s)} \frac{1}{1-Q} \quad (3.14)$$

$Q$  にはローパスフィルタ、 $G_{ry}$  には目標とする応答特性を選ぶことになる。そこで

$$Q(s) = \frac{1 + 3\tau_d s}{1 + 3\tau_d s + 3(\tau_d s)^2 + (\tau_d s)^3} \quad (3.15)$$

$$G_{ry}(s) = \frac{1}{1 + 2\tau_r s + \tau_r^2 s^2} \quad (3.16)$$

のように実現する。 $\tau_d$  は外乱のカットオフ周波数、 $\tau_r$  は目標値応答特性の時定数である。ここで、2自由度軌道制御系の目標値応答  $G_{ry}(s)$  の逆応答を目標関節角度にかけて、2自由度軌道制御系への位置入力値を

$$r = q^{ref} + 2\tau_r \dot{q}^{ref} + \tau_r^2 \ddot{q}^{ref} \quad (3.17)$$

のように与えてやると軌道制御系全体の応答特性が1になり良い追従特性が得られる。

### 3.5 全体の軌道制御系

軌道制御系への入力は作業空間上での目標位置として与えられる。まず、この作業空間座標上の目標位置を逆キネマティクスを用いて目標関節角度  $q$  に変換する。そしてその関節角度  $q$  から、(3.17) 式に基づいて 2 自由度軌道制御系への入力位置指令  $r$  を計算してやる。最後に、2 自由度制御系から出力された出力関節角度をキネマティクスを用いて作業空間座標上の値に戻す。これが作業空間上の位置出力となる。以上が本制御手法で行う位置制御系の一連の流れである。ここで、スレーブ側では (3.17) 式に基づいた位置指令を与えることはできない場合があることに注意する必要がある。それは、2 自由度軌道制御器の位置指令として力制御器・モーメント制御器の出力が用いられているため、力制御器・モーメント制御器に PI コントローラなどの比例ゲインを持つコントローラを用いる場合、力覚センサの出力に高周波のノイズが含まれると、その高周波成分がゲインを通してそのまま位置指令に加えられるからである。 $\dot{q}^{ref}, \ddot{q}^{ref}$  の項は  $q^{ref}$  の差分によって得られるためノイズが増幅されて制御器が不安定になるのである。

以上の軌道制御系を踏まえた上で次は  $x$  軸方向における力制御系の具体的な設計について述べる。なお、本協調制御で行う軌道制御系は全てこの 2 自由度軌道制御であり、今後とくに断りがなければ軌道制御系とはこれを指すものとする。

# 第4章 x軸方向への力制御系

## 4.1 物理モデルの解析と力制御系への組み込み

制御系モデリングを図 4.1 のように行う。ここで図 4.1 において、インピーダンス制御モデルを適用したので環境はバネとダンパで近似されていて、 $K, D$  はそれぞれ環境のバネ定数、ダンパ定数である。また、 $m, x_{obj}$  は搬送物の質量、重心位置である。 $x_1, x_2$  はそ

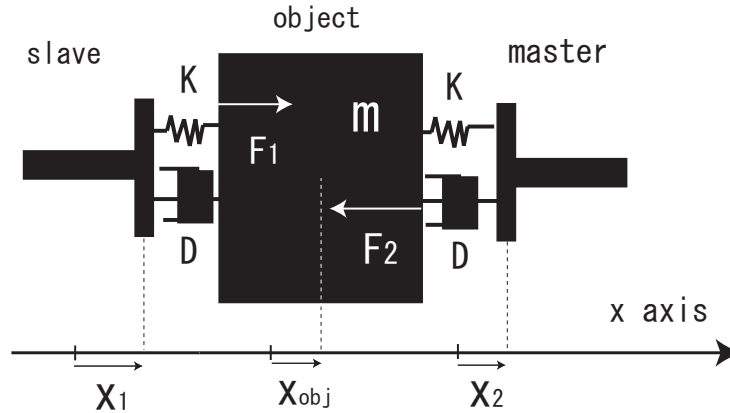


Fig 4.1: x 軸方向力制御のモデル

れぞれスレーブの手先位置、マスターの手先位置である。 $x_1, x_2$  から  $F_1, F_2, x_{obj}$  までの伝達関数を求めると、

$$F_1(s) = \frac{K + Ds}{2} \frac{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{K}s^2}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_1 - \frac{1 + \frac{D}{K}s}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_2 \quad (4.1)$$

$$F_2(s) = \frac{K + Ds}{2} \frac{1 + \frac{D}{K}s}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_1 - \frac{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{K}s^2}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_2 \quad (4.2)$$

$$x_{obj}(s) = \frac{1}{2} \frac{1 + \frac{D}{K}s}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} (x_1 + x_2) \quad (4.3)$$

のようになる。ここで、 $\frac{D}{K}, \sqrt{\frac{m}{K}} \ll 1$  のときは

$$F_1(s) = F_2(s) = \frac{K + Ds}{2} (x_1 - x_2) \quad (4.4)$$

$$x_{obj}(s) = \frac{1}{2} (x_1 + x_2) \quad (4.5)$$

のように近似できる。よって制御ブロック線図は図 4.2 のように簡略化された形で表される。実際、対象物がある程度硬い場合は  $K > 10000, D = 0$  であるのでこの近似は成立すると見て良い。

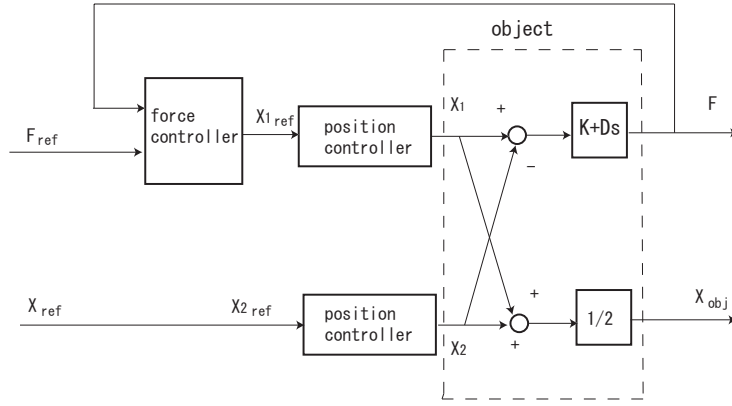


Fig 4.2: x 軸方向力制御系のブロック線図

## 4.2 PI力制御系の設計・シミュレーション

力制御系においてはPIコントローラや2自由度力制御器による実現が考えられる。ここではPI力制御器を用いた場合のシミュレーションを行った。

PI力制御器  $C(s)$ 、軌道制御応答特性  $G(s)$  は

$$C(s) = A \frac{1 + \tau s}{\tau s} \quad (4.6)$$

$$G(s) = \frac{1}{(1 + \tau_r s)^2} \quad (4.7)$$

とし、シミュレーションに用いた定数は以下のように設定した。

$A = 5.0 * 10^{-4}$ ,  $\tau = 0.25$ ,  $K = 15000$ [N/m],  $D = 300$ [Ns/m],  $\tau_r = 0.01$ [s],  $F_{ref} = 50$ [N],  $w = 0.15$ [m]

ただし、 $\tau_r$  は軌道制御系の時定数、 $w$  は搬送物の幅である。PI制御系全体のブロック線図は図4.3のようになる。

ここでマスター位置指令は図4.4のような立ち上がり時間2[s], 速度5[cm/s]のランプ関数

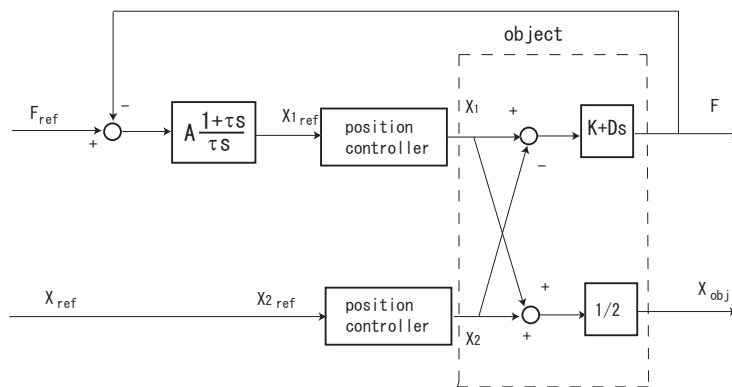


Fig 4.3: PI力制御系のブロック線図

とした。始めのマスターの位置は  $x_2=0.15$ [m], スレーブの位置は  $x_1=0$ [m] とする。立ち上がるまでの2[s]で力制御器に従って物体を把持する。この制御系においてスレーブの位置応答は図4.5, 力応答は図4.6のようになる。ここでこの位置応答および力応答の解析を考

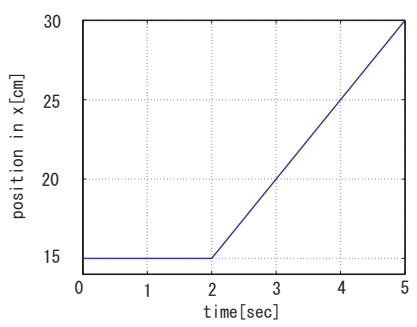


Fig 4.4: マスター位置入力

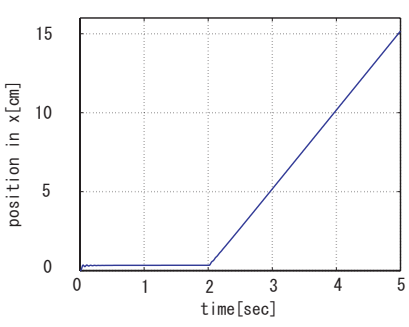


Fig 4.5: スレーブ位置出力

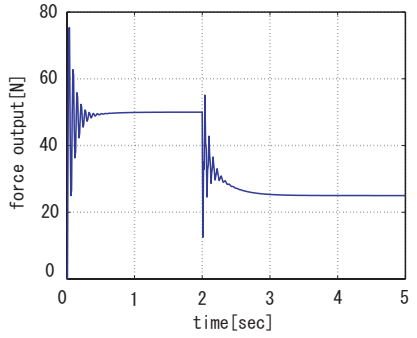


Fig 4.6: 力応答

える。まずは位置応答の定常誤差や速度誤差について考える。このPI力制御系では

$$x_2^* = x_2 - w = x_2 - 0.15 \quad (4.8)$$

$$G_{x_2^* x_1} = \frac{x_1}{x_2^*} = \frac{(K + Ds)(A \frac{1+\tau s}{\tau s}) \frac{1}{(1+\tau_r s)^2} \frac{1}{s}}{1 + (K + Ds)(A \frac{1+\tau s}{\tau s}) \frac{1}{(1+\tau_r s)^2} \frac{1}{s}} \quad (4.9)$$

$$G_{F_{ref} x_1} = \frac{x_1}{F_{ref}} = \frac{(A \frac{1+\tau s}{\tau s}) \frac{1}{(1+\tau_r s)^2} \frac{1}{s}}{1 + (K + Ds)(A \frac{1+\tau s}{\tau s}) \frac{1}{(1+\tau_r s)^2} \frac{1}{s}} \quad (4.10)$$

$$G = (K + Ds)(A \frac{1+\tau s}{\tau s}) \frac{1}{(1+\tau_r s)^2} \frac{1}{s} \quad (4.11)$$

となるので、

$$x_1 = \frac{G}{1+G} x_2^* + \frac{G}{(K + Ds)(1+G)} F_{ref} \quad (4.12)$$

となり、最終値定理を用いて

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G}{1+G} x_2^* + \frac{G}{(K + Ds)(1+G)} \frac{50}{s} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G}{1+G} x_2^* + \frac{50}{K} \end{aligned} \quad (4.13)$$

と求まる。 $t > 2$  において  $x_2(t) = 0.05*(t-2)+0.15$  であり、 $x_2^*(t) = 0.05(t-2) = 0.05t-0.1$  となるため (4.11),(4.13) 式より

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = (1 - \frac{\tau}{AK})0.05t - 0.1 + \frac{50}{K} \quad (4.14)$$

と求まる。今、速度誤差率にあたる  $\frac{\tau}{AK}$  は、

$$\frac{\tau}{AK} = \frac{0.25}{5.0 * 10^{-4} * 15000} \simeq 0.033 \quad (4.15)$$

定常誤差にあたる  $\frac{50}{K}$  は、

$$\frac{50}{K} = \frac{50}{15000} \simeq 3.3 * 10^{-3} \quad (4.16)$$

となる。図 4.5 は 5[s] までの位置応答であるがこの定常誤差が良く表れているといえる。次に力応答の解析を行う。図 4.6 から分かるように、PI 力制御においては目標位置 (マス

ターの位置)の変化がもたらす力応答誤差が存在する。これはすなわち、図4.2からも見てとれるように目標位置出力が力制御マニピュレータのブロックと入れ子になっていて独立ではないため、一種の外乱となっていることによって生じると考えられる。そこで、目標力および目標位置から実際に得られる力  $F$  と目標の力  $F_{ref}$  との誤差への伝達関数  $H_{ff}(s), H_{xf}(s)$  を求めてみる。今、実際に得られる力  $F$  と目標の力  $F_{ref}$  との誤差を  $\Delta F = F - F_{ref}$  とするとき、

$$-A \frac{1 + \tau s}{\tau s(1 + \tau_r s)^2} \Delta F - x_{ref} = \frac{\Delta F + F_{ref}}{K + Ds} \quad (4.17)$$

であり、これを伝達関数表現した形

$$\Delta F = H_{ff} F_{ref} + H_{xf} x_{ref} \quad (4.18)$$

と比較して、

$$H_{ff}(s) = \frac{\Delta F}{F_{ref}} = \frac{-\frac{\tau}{AK} s(1 + \tau_r s)^2}{1 + (1 + \frac{1}{AK})\tau + \frac{D}{K}s + (\frac{2\tau_r}{AK} + \frac{D}{K})^2 + \frac{\tau\tau_r^2}{AK} s^3} \quad (4.19)$$

$$H_{xf}(s) = \frac{\Delta F}{x_{ref}} = \frac{-\frac{\tau}{A} s(1 + \tau_r s)^2(1 + \frac{D}{K}s)}{1 + (1 + \frac{1}{AK})\tau + \frac{D}{K}s + (\frac{2\tau_r}{AK} + \frac{D}{K})^2 + \frac{\tau\tau_r^2}{AK} s^3} \quad (4.20)$$

となる。そこで力制御における定常誤差を計算すると

$$\begin{aligned} F - F^{ref} = \Delta F &= \lim_{s \rightarrow 0} s H_{xf}(s) x^{ref}(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s H_{xf}(s) \frac{v}{s^2} = -\frac{\tau}{A} v \end{aligned} \quad (4.21)$$

となる。この定常誤差の値はここでは  $-\frac{\tau}{A} v = \frac{0.25 \cdot 5}{5.0 \cdot 10^{-4}} = -25[\text{N}]$  となる。これはシミュレーション結果と合致している。つまり速度に比例して力制御誤差が生じるのである。これは最終値定理を用いた最終誤差であり、等速度運動においては誤差は収束しきらないことを意味している。これはともすれば、高速な運動を行ったとき、脆い物体を搬送しているならば衝撃で壊れてしまうことにもなりかねないことも意味する。このような意味でもこの力制御系の誤差の低減は非常に重要であり、与えるマスターの位置指令の柔軟さとのトレードオフが重要になってくる。等速度運動時の一定力把持くらいは保証されていないと実用的とは言いづらい。

そこで2階積分項を加えて速度指令による力応答誤差の低減を考えてみる。PI力制御器  $C(s)$  は新たに

$$C(s) = A \frac{1 + \tau s}{\tau s} + B \frac{1}{s^2} \quad (4.22)$$

とし、 $B = 5.0 \cdot 10^{-3}$  とした。そのほかの設定値およびマスターの位置指令は同じものとした。マスターの位置指令、スレーブの位置応答、力応答はそれぞれ図4.7, 図4.8, 図4.9となった。図4.9から分かるように、速度指令に対して力応答が目標値に収束するような制御系が組めたと言える。しかし、積分器の次数を一次あげたことによって外乱応答特性は悪くなるので無闇に高次の積分器を用いることはできない。

またPI制御系では対象物の硬度によってゲイン  $A$  を適当な値に決定することになり、硬

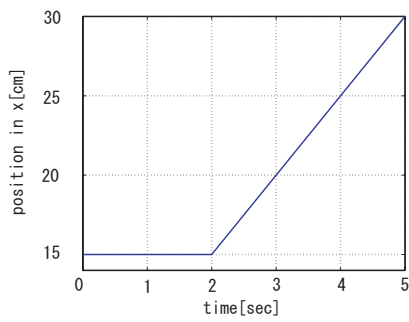


Fig 4.7: マスター位置入力

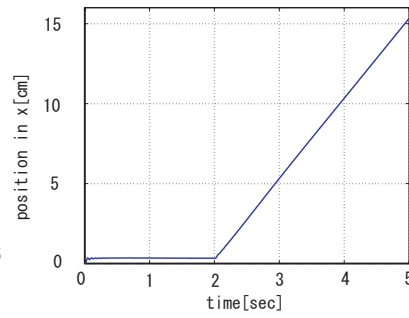


Fig 4.8: スレーブ位置出力

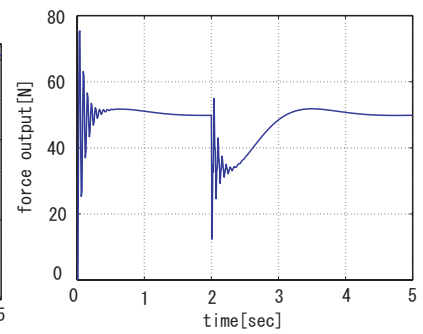


Fig 4.9: 力応答

い対象物に対してはローゲイン、柔らかい対象物に対してはハイゲインを用いることになる。そのため、搬送する対象物が硬いほど力制御の誤差は大きくなる。さらには、2自由度軌道制御器の位置指令として力制御器の出力が用いられるため、PI制御器や2階積分項も考慮した制御器では外乱が比例ゲインを通してそのまま位置指令として加えられてしまい、力制御の伝達関数を厳密に1にすることができないという問題点もある。以上を総合するとPI制御器や2階積分項も考慮した制御器ではマスターの位置指令にロバストな制御をするという点からはx軸力制御器としては不十分なものであると言える。しかし、低周波の正弦波信号や低速度の信号などに対しては十分な制御性能を持っているといえる。次に、環境変動や外乱に対してロバストな系として外乱オブザーバの機能も有する2自由度制御系の設計を考える。そしてPI制御系に対して環境変動抑圧性能の比較を行う。

### 4.3 2自由度力制御系の設計・PI制御系との比較

2自由度力制御器を用いることで応答特性の決定と同時に外乱抑圧特性の向上も図ることができる。PI制御の場合と異なり、 $Q_f$ でフィルタリング処理を行うので出力に表れる外乱の影響はカットオフされる。 $\tau_d^f$ で外乱抑圧できる周波数帯域は調整されるのである。この仕組みは上記の軌道制御における2自由度制御器と本質的に同じである。ただし、ノイズとのトレードオフがあるため、やみくもに $Q_f$ 中の $\tau_d^f$ を小さくできないという点には注意する必要がある。具体的には2自由度力制御の場合は

$$Q_f(s) = \frac{2\tau_d^f s + 1}{(1 + \tau_d^f s)^2} \quad (4.23)$$

$$G_r^f(s) = \frac{1}{1 + \tau_r^f s} \quad (4.24)$$

$$P_n(s) = K + Ds \quad (4.25)$$

$$C_A(s) = \frac{1}{P_n(s)} \frac{Q}{1 - Q} \quad (4.26)$$

$$C_B(s) = \frac{G_{ry}(s)}{1 - G_{ry}(s)} \frac{1}{P_n(s)} \frac{1}{1 - Q} \quad (4.27)$$

のように実現するとよい。ただし、

$$\tau_r^f \gg \tau_d^f \quad (4.28)$$

に注意する必要がある。制御系全体のブロック線図は図 4.10 のようになる。

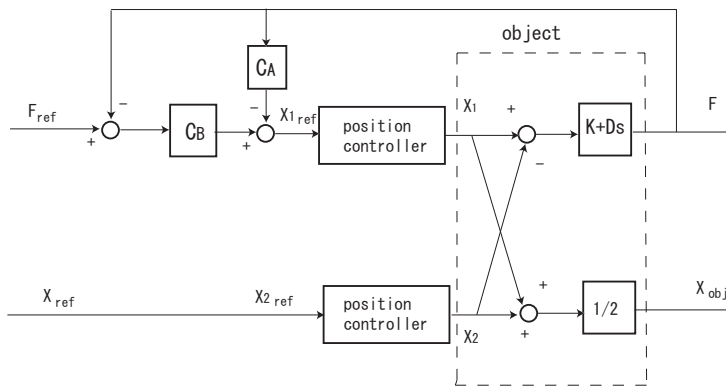


Fig 4.10: 2自由度力制御系のブロック線図

特に2自由度制御では  $Q_f$  による外乱抑圧性能があるため環境変動に対するロバスト性がPI制御系に比べてよいと考えられる。これをシミュレーションによる比較によって示す。マスターの位置入力指令としては図 4.11 のような立ち上がり時間 2[s], 速度 2[cm/s] のランプ関数を考える。

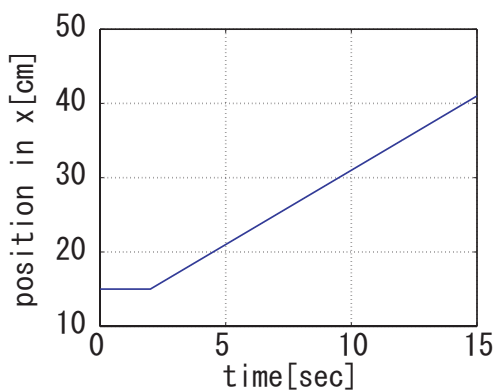


Fig 4.11: マスター位置指令

シミュレーションの各種定数は

$A = 5.0 \times 10^{-4}$ ,  $\tau = 0.25$ ,  $\tau_r = 0.01$ [s],  $\tau_r^f = 0.4$ [s],  $\tau_d^f = 0.1$ [s],  $F_{ref} = 50$ [N],  $w = 0.15$ [m] のように設定した。これは  $K_n = 15000$ [Nm],  $D_n = 300$ [Ns/m] なるノミナル環境モデルに対して設計したPI制御器および2自由度制御器である。ここで、環境変数のうち  $D = 300$ [Ns/m] は固定として  $K = 15000, 22000, 24000$ [N/m] の3通りについて力制御器にPI制御器および2自由度制御器を用いた場合のそれぞれについてシミュレーションを行った。図 4.12 ~ 図 4.23 がその結果である。各  $K$  に対して左二つのスレーブ位置出力および力応答はPI制御器を用いたものであり、右二つのスレーブ位置出力および力応答は2自由度制御器を用いたものである。



•  $K=15000$

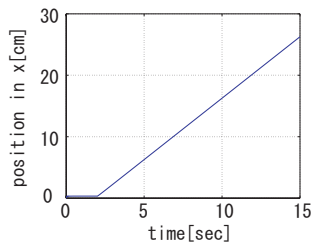


Fig 4.12: 位置出力

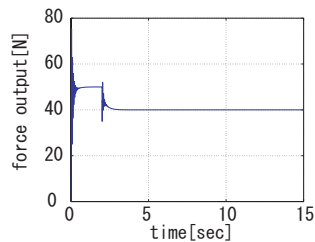


Fig 4.13: 力応答

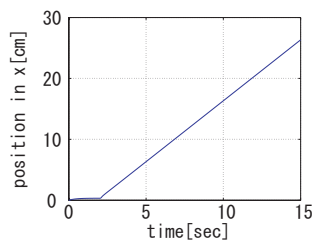


Fig 4.14: 位置出力

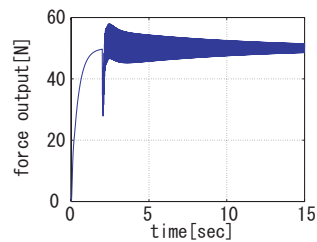


Fig 4.15: 力応答

•  $K=24000$

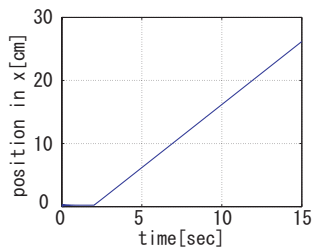


Fig 4.16: 位置出力

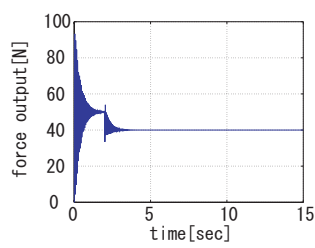


Fig 4.17: 力応答

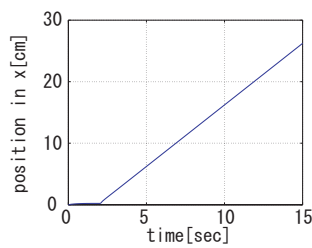


Fig 4.18: 位置出力

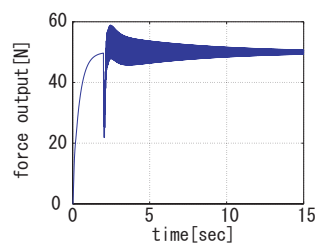


Fig 4.19: 力応答

•  $K=24000$

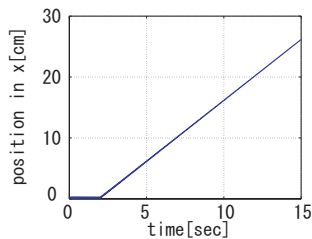


Fig 4.20: 位置出力

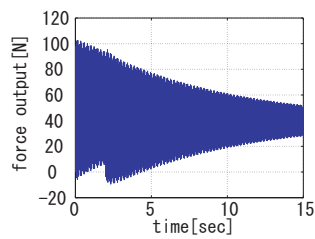


Fig 4.21: 力応答

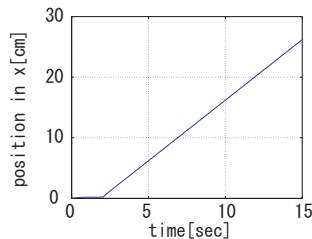


Fig 4.22: 位置出力

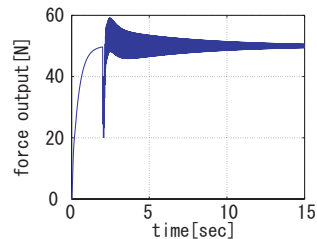


Fig 4.23: 力応答

図 4.13,4.17,4.21 の比較から分かるように PI 制御器では  $K$  がノミナル値  $K_n = 15000$  からの変動が大きくなると力制御系が著しく不安定になることが分かる。特に図 4.21 から分かるように、PI 制御器では  $K = 24000$  のとき力応答がかなり振動的になっている。これに対して、2 自由度制御器を用いた場合である図 4.23 では振動的にはなっていない。これは 2 自由度力制御系のほうが環境モデルの変動に対してロバストな制御系であることを示している。一般に環境定数  $K, D$  は正確にはわからない場合も多い。そのような場合には 2 自由度力制御器を用いた方が安定した制御が実現できると考えられる。これに対して、環境のモデルがある程度わかっているならば PI 力制御器を用いてもよいと考えられる。

次に第 4 章では  $y$  軸方向へのモーメント制御について述べ、その有用性を示す。なお、モーメント制御系の内部ループにおける位置制御系については本章の 2 自由度制御系と同じものを用いることにする。

# 第5章 y軸方向へのモーメント制御系

## 5.1 物理モデルの解析とモーメント制御系への組み込み

搬送モデルの y 軸制御系に対するモデリングを図 5.1 のように行う。ここで、マスター

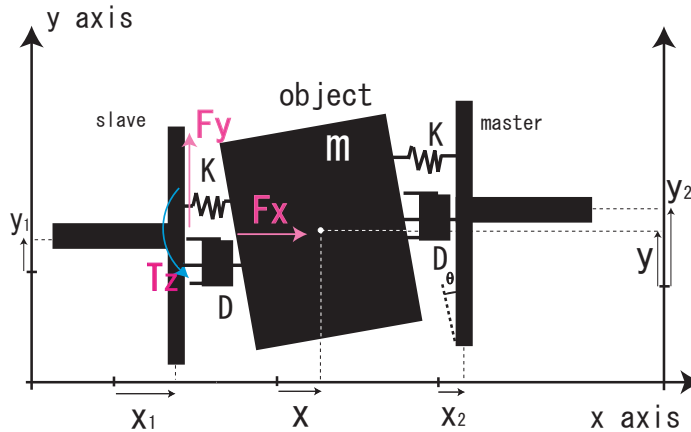


Fig 5.1: y 軸方向モーメント制御系のモデル

とスレーブ位置の差  $\Delta y = y_2 - y_1$  が 0 となる状態では搬送物の質量に依存せずに、発生するモーメントは 0 となる。これは回転が生じていないことを表すものであり、この状態でのモーメントを目標モーメントとすれば  $\Delta y$  を 0 にするような制御系が組めることを意味する。よって目標モーメント  $T_d = 0$  とするモーメント制御系の構築を考える。実際に力覚センサで感知されるモーメント  $T$  は、搬送物が傾くことによって搬送物の質量が力覚センサに及ぼすモーメントの変動分  $\Delta T$  や環境の剛性によって発生するモーメント  $T_z$  がある。制御系がうまく構成されていて  $\theta$  が微小角に保たれているとすると、この変動分  $\Delta T$  は無視してよいので感知されるモーメントは  $T = T_d + T_z = T_z (T_d = 0)$  と考えてよい。センサで感知されるモーメント  $T$  を 0 に収束させるような ( $T_z$  を 0 に収束させるような) 制御系を構成する必要がある。そこで、 $\Delta y$  と  $T_z$  の間の関係を導出する。図 5.1 のような微小角を持った状態において、環境の剛性によって発生するモーメント  $T_z$  を計算する。

今、搬送物の奥行きを  $d$ [m]、高さを  $h$ [m]、幅を  $w$ [m] としたとき、搬送物が環境と接触する面 (スレーブ側) における圧力分布モデルは図 5.2 のようになっている。なお、図 5.2 の  $z$  方向は搬送物の奥行き方向とする。環境の剛性が図 5.1 のような  $K + Ds$  のモデルで表せると仮定したとき  $\Delta y, \Delta z$  なる微小範囲でのモーメントは

$$\Delta T_z(t) = P_{(y,z)} y \cdot \Delta y \Delta z \quad (5.1)$$

で表される。よってこれを全領域で面積分して全体としてのモーメントは

$$T_z(t) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} P_{(y,z)} y \cdot dz dy$$

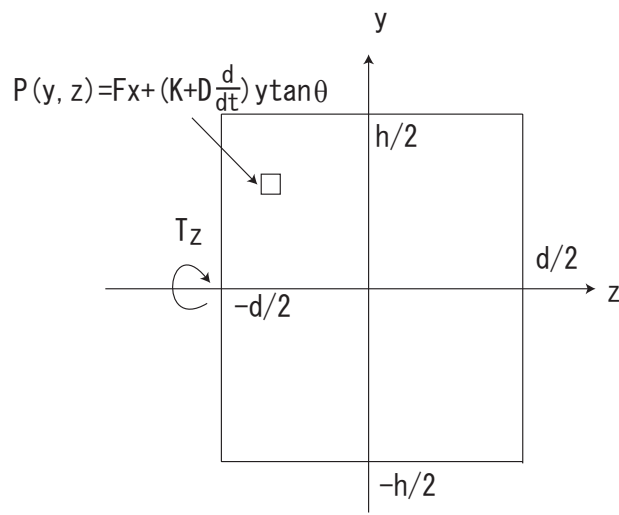


Fig 5.2: 圧力分布

$$\begin{aligned}
 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} F_x + \left(K + D \frac{d}{dt}\right) y \tan \theta \cdot y \cdot dz dy \\
 &= d \left[ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dy \right] \left(K + D \frac{d}{dt}\right) \tan \theta \\
 &= \frac{dh^3}{12} \left(K + D \frac{d}{dt}\right) \tan \theta \tag{5.2}
 \end{aligned}$$

と求まる。また、微小角度では  $\tan \theta \simeq \sin \theta \simeq \frac{\Delta y}{w}$  なので、これを (5.2) 式に代入すると

$$G_{\Delta y T}(s) = \frac{T_z}{\Delta y} = \frac{d \cdot h^3}{12w} (K + Ds) \tag{5.3}$$

となる。これがマスタとスレーブの位置誤差  $\Delta y$  から位置誤差によって力覚センサにかかるモーメント  $T_z$  への伝達関数である。この伝達関数を環境モデル  $P(s)$  としてモーメント制御系を設計する。 $y$  軸モーメント制御系のブロック線図は図 5.3 のようになる。以下で

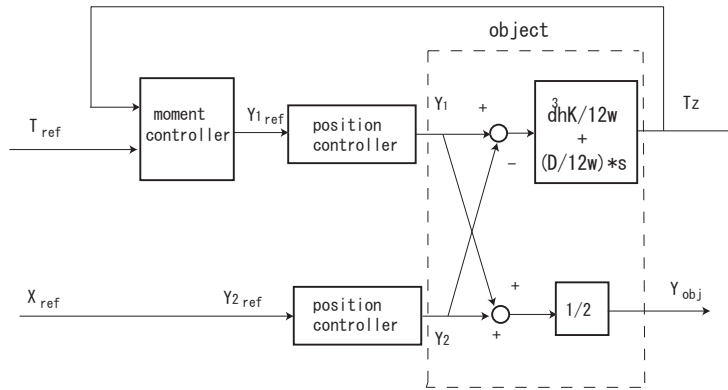


Fig 5.3:  $y$  軸モーメント制御系のブロック線図

はモーメント制御器にPI制御器を用いたものについてシミュレーションを行う。低周波、低速な運動を考えているのでPI制御系による構成で十分であると考えた。

## 5.2 PIモーメント制御系の設計・シミュレーション

モーメント制御系として簡単なPIコントローラを用いた系を考える。今、 $x$ 軸力制御の場合のように内部ループの軌道制御系は2自由度制御系でうまく構成されているものとして、時定数  $\tau_r$ [s] を持って  $\frac{1}{(1+\tau_r s)^2}$  として考えることにする。 $y$ 軸モーメント制御系の環境モデルは  $x$ 軸力制御系のそれと同じ形であり位置応答や力応答特性の解析は  $x$ 軸力制御系の場合と同様に考えられるためここではその定性的な解析は省略する。ここではモーメント制御系でマスター位置指令を立ち上がり時間 2[s], 速度 5[cm/s] のランプ関数とした。これが図 5.4 である。このときスレーブ位置応答およびモーメント応答は図 5.5, 5.6 のようになった。

シミュレーションに用いた定数は以下のように設定した。

$A = 2.0, \tau = 0.25, K = 15000[\text{N/m}], D = 300[\text{Ns/m}], \tau_r = 0.01[\text{s}], T_{ref} = 0[\text{Nm}], w = 0.15[\text{m}], h = 0.15[\text{m}], d = 0.15[\text{m}]$

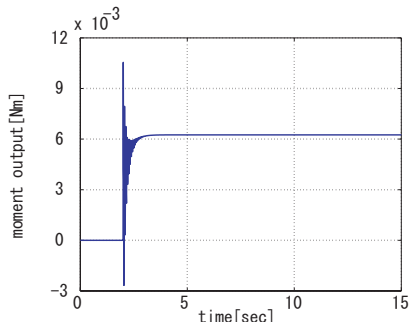
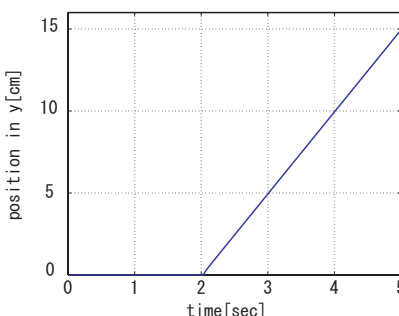
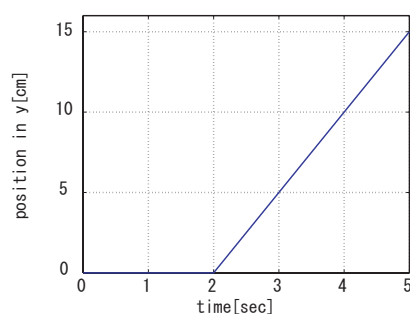


Fig 5.4: マスター位置入力

Fig 5.5: スレーブ位置出力

Fig 5.6: モーメント応答

図 5.4, 5.5 の比較から十分な追従性能が得られていることが分かる。またモーメント応答の定常誤差は (4.22) 式と正負だけ逆の式になるため、 $\frac{\tau}{A}v = \frac{0.25 \cdot 0.05}{2.0} = 6.25 \cdot 10^{-3}[\text{Nm}]$  となる。これは図 5.6 の結果と合致している。

次に  $y$  軸方向へ力制御ではなくモーメント制御を用いたことによる利点を考察する。

## 5.3 $y$ 軸モーメント制御系の $y$ 軸力制御系に対する優位性の考察

$y$ 軸方向に対しても力制御を用いることが考えられる。しかし、本手法ではあえて  $y$ 軸方向はモーメント制御を行うことを提案した。そこで  $y$ 軸方向においてモーメント制御を用いることが力制御と比べてどのような利点があるのかを考察し、その有用性を示す。

$y$ 軸力制御では、 $y$ 方向への位置指令は摩擦から算出されることになるが、この摩擦力は解析が非常に困難である。それは、静力学的なモーメントを扱ったモーメント制御の手法に比べて運動方程式を基にした動力学的な扱いが必要になるためである。環境に対する摩擦力の正確な解析には、静止状態や等速安定状態（位置誤差、速度誤差ともない状態）での物体把持のために必要な摩擦力に加えて加速度による慣性力が及ぼす力を考慮しなければならないことなどが解析を困難なものにしているといえる。これはマスターの加速度情報を必要とするということの意味している。この点からも制御系の設計は非常に困難なものとなる。このことを運動方程式を用いて考察する。

y 軸力制御系のモデルは図 5.7 のようになっており、この系の y 軸方向の運動方程式お

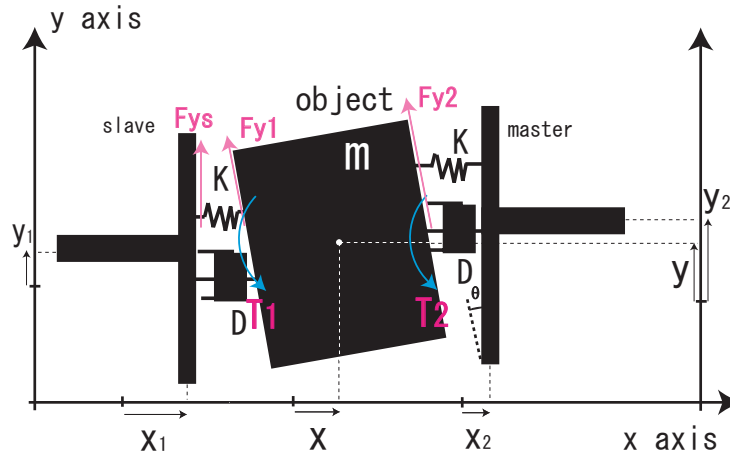


Fig 5.7: y 軸力制御系のモデル

よび回転運動の式は

$$m\ddot{y} = (F_{y1} + F_{y2}) \cos \theta - mg \quad (5.4)$$

$$I\ddot{\theta} = \frac{w}{2}(F_{y2} - F_{y1}) + T_1 + T_2 \quad (5.5)$$

となる。上の 2 式に

$$T_1 = T_2 = -T_z = -\frac{dh^3}{12}(K + Ds) \tan \theta \simeq -\frac{dh^3}{12}(K + Ds)\theta \quad (5.6)$$

$$y = y_2 - \frac{w}{2}\theta \quad (5.7)$$

および  $\cos \theta \simeq 1$  を代入して

$$m(\ddot{y}_2 - \frac{w}{2}\ddot{\theta} + g) = F_{y1} + F_{y2} \quad (5.8)$$

$$I\ddot{\theta} = \frac{w}{2}(F_{y2} - F_{y1}) - \frac{dh^3}{6}(K\theta + D\dot{\theta}) \quad (5.9)$$

となる。このモデルでは  $I = \frac{mhw}{6}$  であり、 $\ddot{y}_2$  さえ分かれば (5.8), (5.9) 式から  $F_{y2}$  を消去して  $\theta$  と  $F_{y1}$  との間の微分方程式が

$$F_{y1} = \frac{m}{2}(\ddot{y}_2 + g) - (\frac{mh}{6} + \frac{mw}{4})\ddot{\theta} - \frac{dh^3D}{6w}\dot{\theta} - \frac{dh^3K}{6w}\theta \quad (5.10)$$

のように得られる。力覚センサから得られる y 軸方向の摩擦力  $F_{ys}$  は、 $F_{ys} = -F_{y1} \cos \theta \simeq -F_{y1}$  であり、この式と  $\theta \simeq \frac{\Delta y}{w}$  を (5.10) 式に代入して  $\Delta y$  から  $F_{ys}$  への伝達関数  $G_{\Delta y F}(s)$  は

$$G_{\Delta y F}(s) = \frac{F_{ys}}{\Delta y} = (\frac{mh}{6w} + \frac{m}{4})s^2 + \frac{dh^3D}{6w^2}s + \frac{dh^3K}{6w^2} \quad (5.11)$$

と求まる。全体の式は

$$F_{ys}(s) = G_{\Delta y F}\Delta y - \frac{m}{2}(y_2s^2 + g) \quad (5.12)$$

であり、(5.12) 式の右辺第 2 項は慣性力項および重力項に対応している。(5.12) 式から分かるように慣性力項を考慮するとマスターの位置指令の加速度  $\ddot{y}_2$  をスレーブの力制御系に与えることが必要だといえる。つまり加速度運動ではマスターの位置指令を通信する必要があることになる。これは、マスターの位置の通信を行わずに制御系を構成することが可能な  $x$  軸力制御や  $y$  軸モーメント制御に比べてシステムの通信にかかる時間遅れやシステム自体のコストの面で望ましくない。また、通信を行ったとしても (5.11) 式で表される伝達関数モデル自体が複雑であるため摩擦力の解析は容易ではない。以上の点から  $y$  軸方向への制御手法としては  $y$  軸モーメント制御系のほうが  $y$  軸力制御系に比べて有効な制御手法であると考えられる。

# 第6章 干渉問題も含めた2次元協調制御系全体のシミュレーション

今までは各軸の制御系について独立に扱っていた。しかし、2次元協調制御系のような多次元協調制御問題を厳密に扱うには各軸の制御系や物理量の干渉項を考えなければならない。そこで各軸制御系の干渉問題について考察を行うことにする。

$y$  軸制御系に関しては (5.3) 式に基づいたモーメント制御を行うものであり、物理モデルには  $x$  軸力制御系の干渉はないと考えられる。しかし、 $x$  軸力制御系に対しては厳密には図 6.1 から分かるように  $y$  軸方向制御系で扱った力  $F_{y1}$  の  $x$  軸方向成分が影響を及ぼす。つまり干渉も含めた  $x$  方向にかかる実際の力を  $F_{xi}$  とすると、

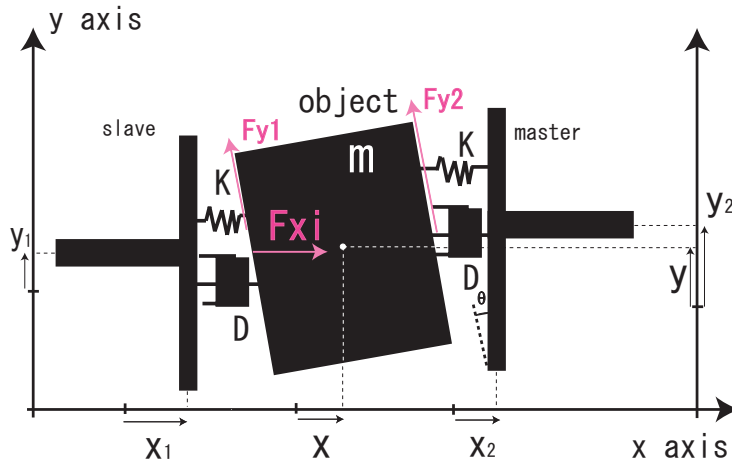


Fig 6.1:  $x$  軸力制御系の干渉モデル

$$F_{xi} = F_x - F_{y1} \sin \theta \simeq F_x - F_{y1} \theta \quad (6.1)$$

となる。ここでこの干渉力は (5.10) 式から

$$F_{y1} \theta = \frac{m}{2} (\ddot{y}_2 + g) \theta - \left( \frac{mh}{6} + \frac{mw}{4} \right) \ddot{\theta} - \frac{dh^3 D}{6w} \dot{\theta} - \frac{dh^3 K}{6w} \theta^2 \quad (6.2)$$

である。そこで  $x$  軸力制御・ $y$  軸モーメント制御を用いた 2次元協調制御系において、この干渉力を無視する場合と考慮する場合について応答特性の比較を行った。

シミュレーションに用いた定数は以下のように設定した。

$K = 15000[\text{N/m}]$ ,  $D = 300[\text{Ns/m}]$ ,  $\tau_r = 0.01[\text{s}]$ ,  $F_{ref} = 50[\text{N}]$ ,  $w = 0.15[\text{m}]$ ,  $d = 0.15[\text{m}]$ ,  $h = 0.15[\text{m}]$ ,  $m = 3.0[\text{kg}]$

$x$  軸力制御器および  $y$  軸モーメント制御器には (4.6) 式で表される PI 制御器を用いた。 $x$  軸力制御器では  $A_x = 5.0 * 10^{-4}$ ,  $\tau_x = 0.25$ ,  $y$  軸モーメント制御器では  $A_y = 2.0$ ,  $\tau_y = 0.25$  とした。マスター位置入力としては  $x$  方向入力が図 6.2,  $y$  方向入力が図 6.3 のようなもの

を考える。この入力では0~2[s]の間は安定把持状態になるまでマスターは停止し、2~3[s]の間は $x$ 正方向に速度5[cm/s]で動き、3~4[s]の間はまた停止し、5~15[s]は $xy$ 平面内で半径5[cm],周期4[s]の円運動となる。マスター位置入力を $xy$ 平面で図示したものが図6.4である。マスターへの位置指令としては低速・低周波なものとしたため制御器はPI制御器で構成したのである。

ここで、干渉を無視した場合にスレーブの $x$ 方向位置出力は図6.5, $y$ 方向位置出力は図6.7のようになった。また、力応答は図6.6,モーメント応答は図6.8のようになった。干渉を考慮した場合は $x$ 方向には干渉力による変動が考えられるのであるが、スレーブの $x$ 方向位置出力は図6.9,力応答は図6.10のようになった。また、干渉力そのものの応答は図6.11のようになった。

最後に干渉力を無視した場合と考慮した場合のスレーブ位置応答をそれぞれ $xy$ 平面で図示した。これが図6.12,図6.13である。

・マスター位置入力

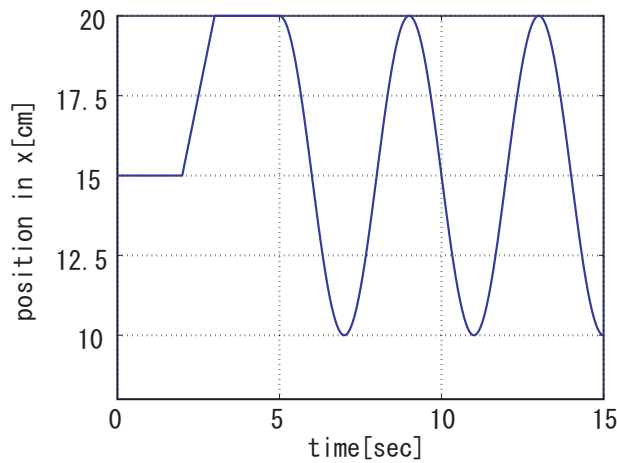


Fig 6.2: マスター位置入力 (x 方向)

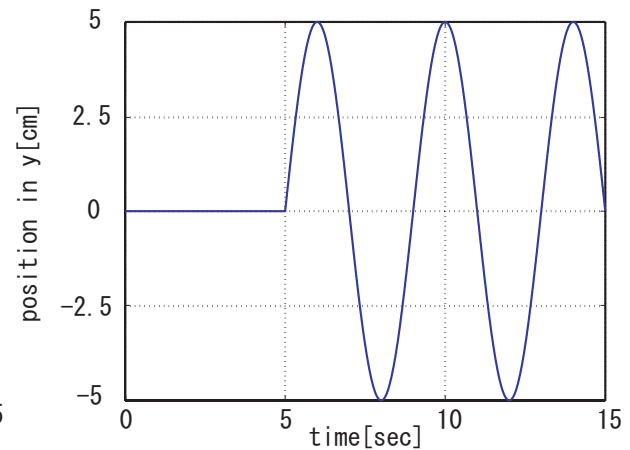


Fig 6.3: マスター位置入力 (y 方向)

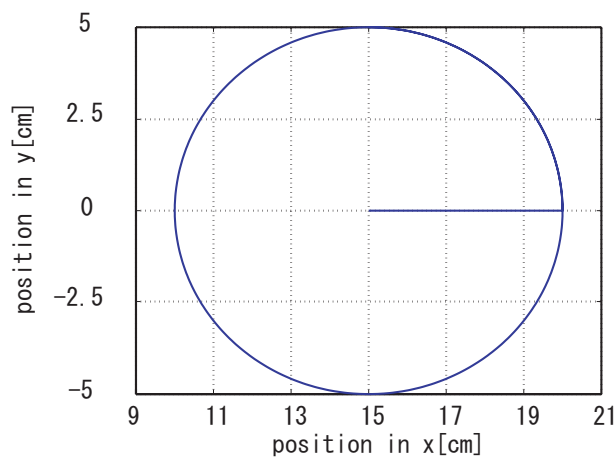


Fig 6.4: マスター位置入力 (xy 平面)



・干渉を無視した場合

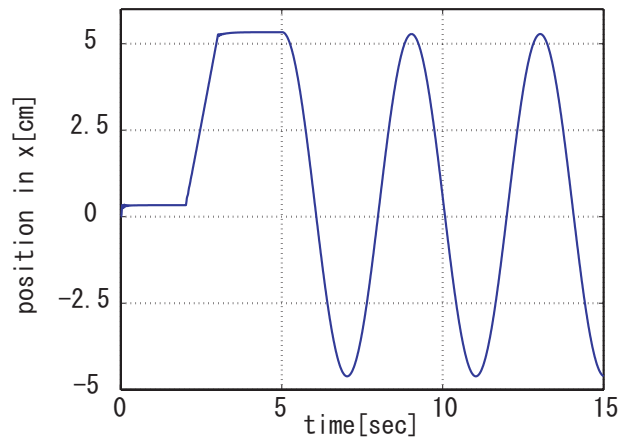


Fig 6.5: スレーブ位置出力 (x方向)

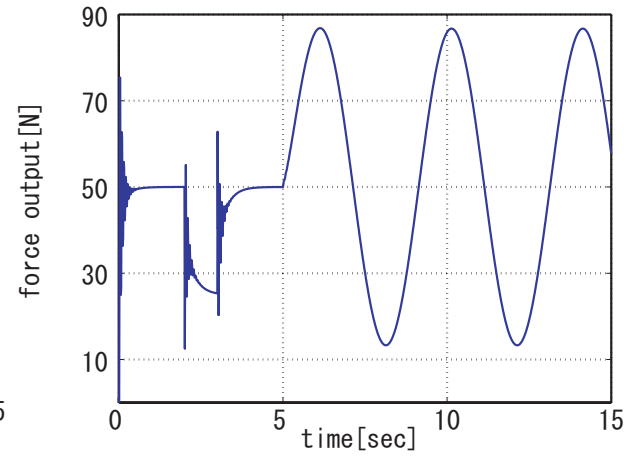


Fig 6.6: 力応答

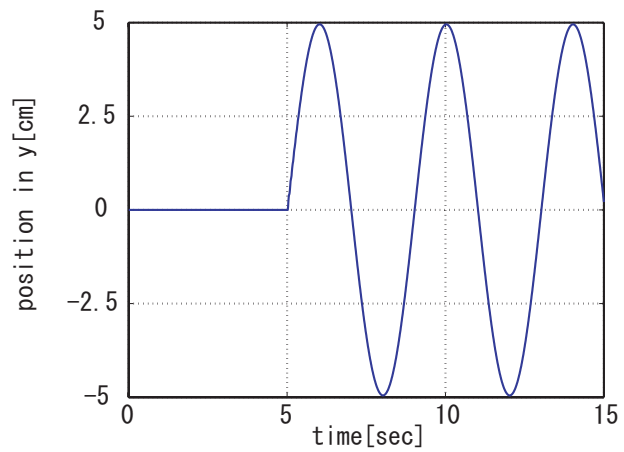


Fig 6.7: スレーブ位置出力 (y方向)

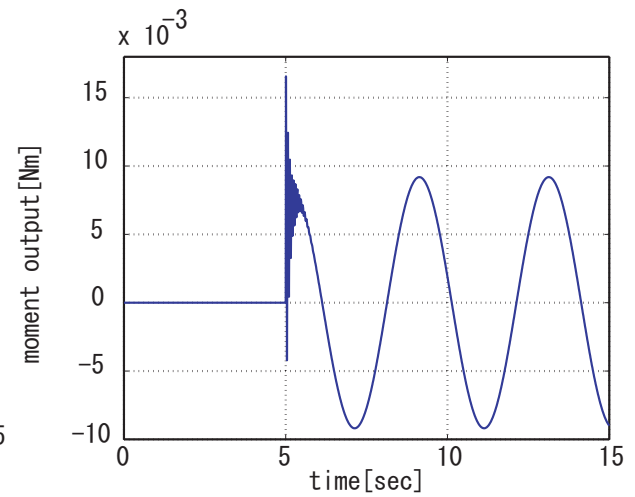


Fig 6.8: モーメント応答

・干渉補償を行った場合

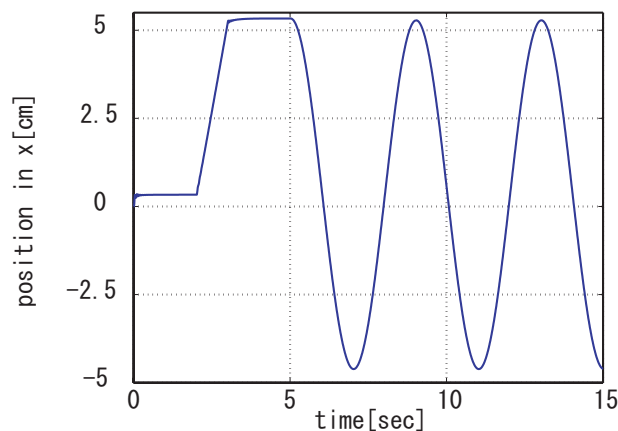


Fig 6.9: スレーブ位置出力 (x 方向)

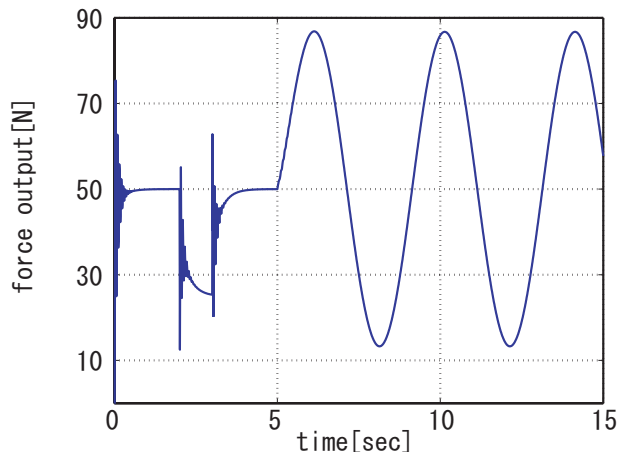


Fig 6.10: 力応答

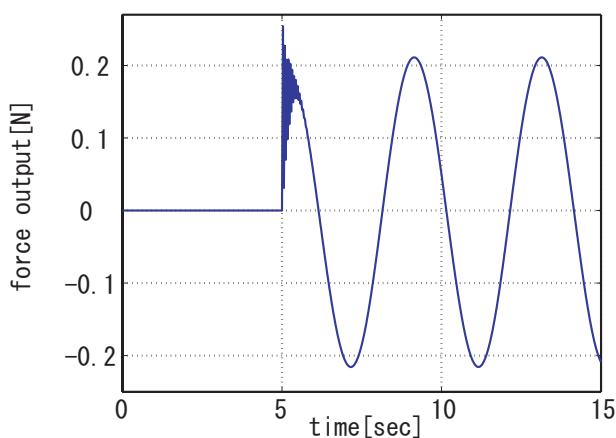


Fig 6.11: 干渉力応答

図 6.11 より、力制御入力 50[N] に対して  $-0.2 \sim 0.2$  [N] 程度の干渉力が発生していることが分かる。この干渉力による  $x$  軸制御系への影響であるが、図 6.5 と図 6.9, 図 6.6 と図 6.10 の比較から、この程度の干渉力が入ったとしても  $x$  軸力制御系の応答特性には影響がないことが分かる。円運動移行時 (5[s]) での干渉力は 0.3[N] ほどと多少大きい値であるがこれは  $y$  方向運動の位置指令における加速度が 5[s] で不連続であるために生じている衝撃力である。しかし、この影響も図 6.6 と図 6.10 の比較からは分からない程の無視できる微小応答である。以上より干渉力が制御系全体に与える影響はほぼ無視できることが示せた。最後にこの 2 次元円運動の出力応答を  $xy$  平面図に表す。

・スレーブの xy 平面位置出力

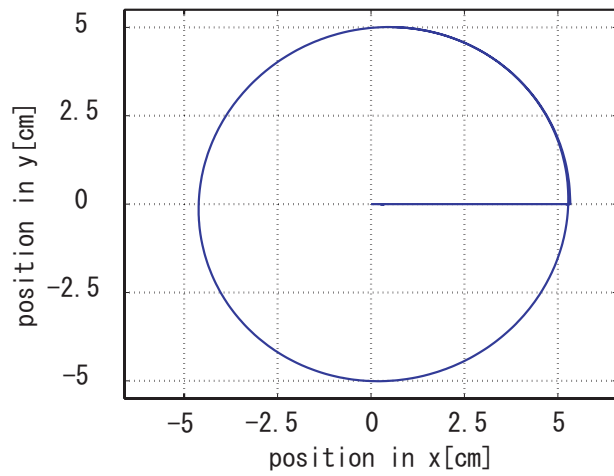


Fig 6.12: スレーブ位置出力 (干渉無)

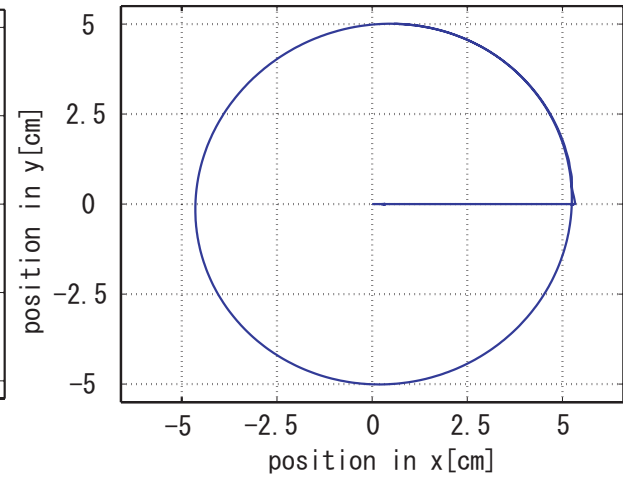


Fig 6.13: スレーブ位置出力 (干渉有)

図 6.12 と図 6.13 の比較からも干渉性を考慮することによる 2 次元平面運動の変動はほとんど見られないことが分かる。円運動移行時には前述した干渉力として衝撃力が加わる影響でわずかな差が見られるはずであるがこれも微小なものである。

また、 $y$  軸方向は半径 5[cm] の円運動を十分実現できているといえるが  $x$  方向は 0.3[cm] ほどの誤差が生じている。これは (4.16) 式で表されるように静止状態において 50[N] の力が加わるときの定常誤差が  $x = \frac{F_{ref}}{K} = \frac{50}{15000} = 3.33 \times 10^{-3}[\text{m}] = 0.33[\text{cm}]$  であることによるものである。さらには、円の形状から  $x$  方向スレーブ位置応答の方が  $y$  方向スレーブ位置応答に比べて位相が遅れていることも分かる。

結論として干渉補償を無視した各軸独立な 2 次元協調制御によって十分な精度でマスター位置指令に追従した 2 次元円運動が実現されることが示せたといえる。

# 第7章 結論

## 7.1 本論文のまとめ

1次元での協調制御の手法やエンドエフェクタの種類によって様々な把持・操りの手法などが研究されている。しかし、これを多次元に拡張する研究は少ない。そこで本論文では2次元協調制御の手法を提案し、その有用性を示した。そこで $x$ 軸方向に対しては従来から提案されている簡単な力制御系を扱うことにした。また $y$ 軸方向に対してはコンプライアンス制御の制御対象として摩擦力およびモーメントの二つの物理量が考えられたがここではモーメント制御系を扱うことにした。この $y$ 方向モーメント制御系こそが本論文で新しく提案した手法である。 $y$ 軸方向に対して摩擦力に基づいた力制御ではなくモーメント制御を用いた理由としては以下の4点が考えられた。

- ・ $y$ 軸モーメント制御系では環境が近似的に簡単な形の線形化モデルとなる
- ・ $y$ 軸モーメント制御系の線形化モデルは $x$ 軸力制御系の環境モデルと形が同じである
- ・ $y$ 軸力制御系では摩擦力の正確な計算は困難であり非線形なモデルとなる
- ・ $y$ 軸力制御系ではマスターの加速度情報が与えられなければ正確な制御ができない

また本論文では各軸制御系の応答特性をシミュレーションモデルを用いて考察した。 $x$ 軸力制御系についてPI制御器を用いて等速度指令に対する力応答をシミュレーションによって検証した。PI制御器ではマスターの位置指令が等速度運動の場合は目標力と力応答との間に定常誤差が生じていた。等速度運動に対して定常誤差が出るような制御器では不十分であると考えたため、PI制御器に二階積分項を加えた制御器を考えた。これによって等速度運動時の定常誤差は低減することが確認された。しかし、高次の積分器を用いた系では外乱に対して不安定になってしまうという問題点がある。以上からPI制御系はマスターの位置指令に対してロバストな制御性能を有する制御器ではないと考えられる。しかし、低周波正弦波や低速運動などの位置指令では十分な制御性能を示すといえる。続いて2自由度制御器を用いたシミュレーションを行った。2自由度制御器を用いた場合、環境モデルに対するロバスト化が実現できることをPI制御器との比較シミュレーションで示した。次に $y$ 軸方向についてもPI制御による等速度指令に対する応答特性を確認した。最後に $x$ 軸方向力制御系と $y$ 軸モーメント制御系の干渉問題を考慮した2次元協調制御系を考えた。その結果、周期4[s], 半径5[cm]のような低速2次元円運動においては干渉の影響によらず各軸独立な制御が可能であることが分かった。

## 7.2 今後の課題

- 干渉補償を考慮した高速二次元協調制御系の設計による高速搬送の実現
- 速度や加速度が不連続となるような急な動き出し時に発生する衝撃力の低減を行う制御系の設計

# 参考文献

- [1] 三平 満司, 水野 伸太郎, 石川 将人, 古賀 雅伸:“ 2 板間に挟まれて運動する剛球の位置制御”, 日本ロボット学会誌 Vol.14, No.8, pp.1237 ~ 1242, 1996.
- [2] 向山 俊和:“ ロバストな位置・力制御による双腕協調制御の実現”, 卒業論文, 東京大学工学系研究科, 1996.
- [3] 金子 真:“ 多指ハンド”, 日本ロボット学会誌 Vol.16, No.7, pp.889 ~ 892, 1998.
- [4] 前川 仁:“ 触覚情報を利用した多指ハンドによる把握・操り”, 日本ロボット学会誌 Vol.18, No.6, pp.776 ~ 781, 2000.
- [5] M.Mozasser Rahman, Ryojin Ikekura, Kazuaki Mizutani:“ Investigation of the Impedance Characteristic of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Humans”, *JMSE International Journal Series C*, Vol.45, No.2, pp.510 ~ 518, 2002.
- [6] 志村 康治:“ ロボットマニピュレータにおける力制御のロバスト化と衝突過程の制御”, 修士論文, 東京大学工学系研究科, 1992.
- [7] 吉川 恒夫, 横小路 泰義, 細谷 徳男, 井村 順一:“ 環境とオペレータ特性の不確かさを考慮したマスタ・スレーブシステムのロバスト制御”, 日本ロボット学会誌 Vol.14, No.6, pp.836 ~ 845, 1996.
- [8] 斉藤 保孝:“ ロボット制御の実際”, 計測自動制御学会, 1997.
- [9] J.K.Salisbury:“ Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates”, *Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.95 ~ 100, 1980.
- [10] D.E.Whitney:“ Force Feed Back Control of Manipulator Fine Motions”, *Transaction of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.107, pp.1 ~ 24, 1985.
- [11] 堀 洋一, 大西 公平:“ 制御工学の基礎”, 丸善, 1997.
- [12] 堀 洋一, 大西 公平:“ 応用制御工学”, 丸善, 1998.
- [13] 野波 健蔵:編著, 西村 秀和, 平田 光男:共著:“ MATLAB による制御系設計”, 東京電機大学出版局, 1998.
- [14] 原 康夫:“ 基礎物理学シリーズ・力学”, 東京教学社, 1992.
- [15] 梅野 孝治:“ 「機械設計」第 35 巻第 8 号別刷”, 日刊工業新聞社, 1991.

- [16] 金子 智朗:“ ロバスト位置決めサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御”, 修士論文, 東京大学工学系研究科, 1991.

# 発表文献

[1] 中村 壮亮, 堀 洋一: “ロボットアームの二次元ハイブリッド協調制御に関する一考察”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-05-63, 2005.(発表予定)

# 謝 辞

私にとって堀研究室で過ごした一年はとても有意義なものでした。研究をすすめるにあたって指導教官の堀洋一教授、内田利之技官には適切なアドバイスをいただきました。また助言をして頂いた先輩の存在は研究に行き詰っている時の心の支えになりました。特に坂東信尚さんには制御工学のみならずロボット工学にいたるまで懇切丁寧な指導をして頂きました。ここに深く感謝いたします。また畠直輝さん、青木健一郎さんには制御工学から論文の書き方にいたるまで様々なアドバイスを頂きました。呉さんとは研究分野が近いということもありお世話になりました。吉田君とは同じ卒論生として励ましあい、お互いの研究について意見交換をしました。皆様ありがとうございました。堀研究室で過ごした一年間、研究に取り組む姿勢を叩きなおすよい機会となりました。堀洋一教授をはじめ、厳しくも温かいご指導をしてくださった皆様には心から感謝しております。