

第 4 章

低剛性アーム協調制御実験

第4章. 低剛性アーム協調制御実験

目次

- 4. 1 はじめに
- 4. 2 低剛性アーム協調モデルの設定
- 4. 3 対象物の運動に必要な力と拘束条件
- 4. 4 協調制御系の設計
- 4. 5 実験システム
 - 4. 5. 1 実験システムの概要
 - 4. 5. 2 システムの構成と各部の特性
 - 4. 5. 2. 1 移動テーブル部
 - 4. 5. 2. 2 低剛性アーム部
 - 4. 5. 2. 3 力センサ
 - 4. 5. 2. 4 その他
- 4. 6 制御実験
 - 4. 6. 1 フィードバックゲインの決定
 - 4. 6. 2 振動制御
 - 4. 6. 3 搬送制御実験
 - 4. 6. 4 挿入実験
- 4. 7 まとめ

4. 1 はじめに

本章では、試作装置を用いた実験により、3. 6において設計した制御系の実現性を検証する。2つの弾性マニピュレータで対象物を挟みつけ力により保持し、1自由度方向に搬送する。それぞれのマニピュレータのアームは平行板バネにより構成され、等価バネ、質量としてモデル化される。

3. 6に示した制御系は、①誤差システムの極を任意に設計できる、②動力学補償により対象物の目標加速度軌道が実現できる、③内力を対象物に加える合力と独立に設計できる、という特徴を持つ。①の特性を利用することにより、自由空間を搬送されている対象物に対しては振動の制振が可能となり、対象物が組付け対象などの環境と接触している場合には、外力に対するコンプライアンスを設定することが可能となる。本章では、実験によりこれらの特性の検証を行う。

4. 2では本実験に用いた制御対象のモデルを示す。本実験では、2つのアームが挟みつけにより対象物を保持している。対象物をバネを介して保持する場合、3. 6. 1に示したように搬送軌道の加速度の微分が連続関数でなければならないという拘束条件が付加される。また、搬送軌道の実現に必要な力の2腕への配分に関しても、対象物を落下させないよう拘束条件が課せられる。4. 3ではこれら全ての拘束条件を満たす力の配分法を示す。

4. 4では、3. 6の式(3-29)に示した制御則と誤差システムを実験モデルに適用した場合の定式化を行う。

4. 5では、実験システムの構成、各部の特性を示す。

4. 6では、フィードバックゲインの決定を行ない、振動制御実験、搬送実験、挿入実験を行なう。振動制御実験では誤差システムの極の設計が可能なることを、搬送実験では動力学補償項が正しく作用することを、挿入実験では外力に対するコンプライアンスが設計可能であることをそれぞれ検証する。

4.2 2つのバネによる協調モデルの設定

本章では、平行板バネによって構成された2つのアームで対象物を挟みつけにより保持し、1自由度方向に搬送する。それぞれのアームを等価なバネ・マス系としてモデル化し、制御系を構築する。Fig. 4.1に2腕が対象物を挟んだ状態のモデルを示す。

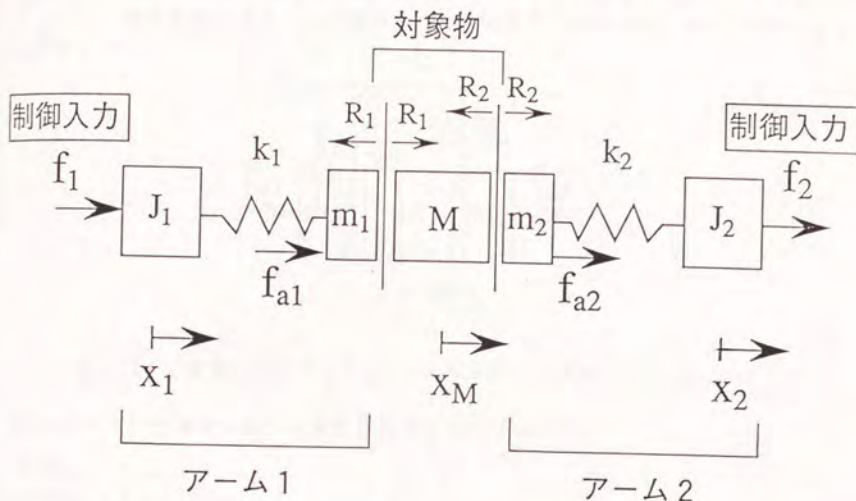


Fig. 4.1 2つの低剛性アーム協調モデル

ここで、 J_1 はアーム1のアクチュエータの慣性を、 J_2 はアーム2のアクチュエータの慣性をそれぞれ表す。 k_1 、 m_1 、 k_2 、 m_2 はそれぞれ、アーム1とアーム2をバネ・マス系で近似した場合のモデルのバネ定数とマスの質量である。2つのアームは対象物 M を両側から挟みつけて保持している。 x_M 、 x_1 、 x_2 は、対象物、アーム1とアーム2のアクチュエータ部の、ある基準位置からの偏差を表す。また、アーム先端が対象物に加える接触力である R の符号については、接触点での垂直抗力が正となる場合に R を正の向きにとることとする。また、 f_{a1} 、 f_{a2} は低剛性アーム先端の等価質量に加えられる力、 f_1 、 f_2 はアクチュエータの慣性部 J_1 、 J_2 に加えられる力とする。

式(3-37)の制御則は、対象物に加えるべき力 f_{a1d} 、 f_{a2d} を与えるためのバネのたわみを計算し、マニピュレータの目標位置に加えるというものである。本章における実験では、対象物が挟みつけにより保持されているので、対象物の運動に必要な力 f_d を f_{a1d} 、 f_{a2d} に配分する際、対象物を落下させないための拘束条件が付加される。

4.3 対象物の運動に必要な力と拘束条件

ここでは、対象物を落下させずに運動させるための接触力 R_1 、 R_2 と、それぞれのアーム先端に伝達される力 f_{a1} 、 f_{a2} との関係を明らかにする。この問題は多指ハンドを用いたあやつり制御[中村 1986]において取上げられている。本節で示す R_1 、 R_2 と f_{a1} 、 f_{a2} の関係は、基本的には[中村 1986]を2腕に適用したものとなっている。

ここで、対象物およびアーム先端のそれぞれの等価質量からなるモデルをFig. 4.2に示す。

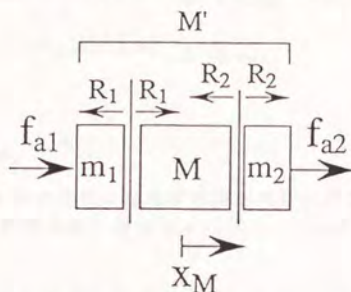


Fig. 4.2 対象物に加わる力 R_i とアーム先端に伝達される力 f_{ai} ($i=1, 2$)

Fig. 4.2 の3つの質量に関する運動方程式を式(4-1)に示す。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{m1} &= f_{a1} - R_1 \\ m_2 \ddot{x}_{m2} &= R_2 + f_{a2} \\ M \ddot{x}_M &= R_1 - R_2 \end{aligned} \quad (4-1)$$

対象物が落下しないという条件のもとでは、3つの質量が常に一体となって運動するので、式(4-1)の3つの加速度は等しい。従って式(4-1)より、 R_1 、 R_2 を f_{a1} 、 f_{a2} で表すと式(4-2)となる。

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{m_1 + m_2 + M} \begin{bmatrix} m_2 + M & -m_1 \\ m_2 & -(m_1 + M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{a1} \\ f_{a2} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

また、 R_1 、 R_2 の作用する面での静摩擦係数をそれぞれ μ_1 、 μ_2 とし、

$$R_{1min} = \frac{1}{2\mu_1} M g, \quad R_{2min} = \frac{1}{2\mu_2} M g \quad (4-3)$$

とおくと、対象物が落下したり回転したりしないための条件から、 R_1 、 R_2 の満たすべき条件は、

$$R_1 \geq R_{1min}, \quad R_2 \geq R_{2min} \quad (4-4)$$

と表される。

また、対象物やマニピュレータを破壊しないための条件から、対象物に加えることのできる力の最大値を R_{max} とすると、 R_1 、 R_2 の満たすべき条件は、式(4-4)と同様に、

$$R_1, R_2 \leq R_{max} \quad (4-5)$$

となるので、この時、 f_{a1} 、 f_{a2} が満たすべき条件は式(4-2)～(4-5)より、

$$\begin{aligned} R_{max} &\geq \frac{(m_2+M)f_{a1} - m_1f_{a2}}{M'} \geq R_{1min} \\ R_{max} &\geq \frac{m_2f_{a1} - (m_1+M)f_{a2}}{M'} \geq R_{2min} \end{aligned} \quad (4-6)$$

となる。但し、

$$M' = m_1 + m_2 + M$$

である。ここで、対象物の運動の加速度軌道が時間の関数 $\ddot{x}_{Md}(t)$ として与えられたとすると、 $f(t)$ を対象物に働く合力とすれば、この運動を達成するためには、 f_{a1d} と f_{a2d} の間には、

$$f_{a1d} + f_{a2d} = f_d(t) = M' \ddot{x}_{Md}(t) \quad (4-7)$$

という関係が成立つ必要がある。但し、添字 d は目標値を表す。横軸に f_{a1d} 、縦軸に f_{a2d} をとり式(4-6)、(4-7)の関係をグラフに示す (Fig. 4.3)。

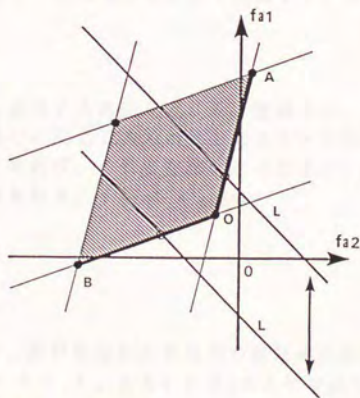


Fig. 4.3 f_{a1d} 、 f_{a2d} の満たすべき条件と対象物の運動に必要な力 f_d との関係

式(4-6)の条件を満たす f_{a1d} と f_{a2d} の範囲は菱形の内部(斜線部)にあたり、式(4-7)を満たす(f_{a1d} , f_{a2d})の組み合わせの集合は、 -45° の傾きの直線Lとなる。この直線L上の点で、菱形の内部に存在する部分の(f_{a1d} , f_{a2d})を利用すれば、対象物を落下させたり、過度の保持力を生じることなく搬送することができる。

また、直線Lが点Aを通るときの $\ddot{x}_{Md}(t)$ は対象物、あるいはマニピュレータを破壊しないで搬送できる最大の加速度を表し、点Bを通るときの $\ddot{x}_{Md}(t)$ は最低の加速度を表すことから、 $\ddot{x}_{Md}(t)$ は

$$\frac{R_{\max} - R_{\min}}{M'} \geq \ddot{x}_{Md}(t) \geq \frac{R_{\min} - R_{\max}}{M'} \quad (4-8)$$

を満たす範囲で設定しなければならない。

弾性マニピュレータの協調制御においては、式(4-6)、(4-7)の他に、アーム先端で発生することのできる力の1階微分、即ち f_{a1} 、 f_{a2} の微分が連続という3つの拘束条件が付加される。これらの拘束を満たすよう、対象物に加えるべき力の2腕へ配分することが必要である。以下では、力の配分法に関する考察を行ない、上の3つの条件を満たす配分の例を示す。

[中村 1986]においては、合力を発生し、しかも対象物を落下させることのない最小力を最適内力と定義し利用している。この最適内力を本制御系に適用した場合の最適力を求めると、対象物の加速中は直線Lと O_1A との交点、減速中は直線Lと O_1B との交点上の f_{a1d} 、 f_{a2d} となる。この配分法により決定される f_{a1d} 、 f_{a2d} は、対象物の加速から減速、あるいは減速から加速の過程で点 O_1 において微分不可能となる。従って、弾性マニピュレータにおいては最適内力とは別の配分法が必要となる。

本論文では、内力をつねに一定に保つ配分法を提案する。静止時の内力を N として、

$$\frac{1}{2} (f_{a1d} - f_{a2d}) = N \quad (4-9)$$

とする。これは、直線Lと直交する直線Hとなる。直線Hは、アーム先端と対象物を1体とみるときに、その重心に生じる内力が N となることを意味する。 N を菱形の内部を通るように直線Hを定めれば、これと直線Lとの交点が(f_{a1d} , f_{a2d})となり、 f_{a1d} 、 f_{a2d} が一意に決定される。 f_{a1d} 、 f_{a2d} は

$$\begin{aligned} f_{a1d} &= \frac{1}{2} f_d(t) + N \\ f_{a2d} &= \frac{1}{2} f_d(t) - N \end{aligned} \quad (4-10)$$

となる。 N の決定法として、目標軌道に必要な力の絶対値の最大値を f_{\max} とした時、この f_{\max} に対応した直線Lと O_1A 、あるいは O_1B との交点を直線Hが通るように決定すればよい。また、外乱が予想される場合には更に安全率をみこめばよい。

4. 4 協調制御系の設計

本節では、3. 6 で示した制御系を構築する。なお目標軌道は3. 7. 2 に示したものを利用する。式(3-37)を1自由度系に適用すると

$$\begin{aligned} f_1 &= J_1 \ddot{x}_{1d}(t) + k_{v1}(\dot{x}_{1d}(t) - \dot{x}_1(t)) + k_{p1}(x_{1d}(t) - x_1(t)) + f_{a1d} \\ f_2 &= J_2 \ddot{x}_{2d}(t) + k_{v2}(\dot{x}_{2d}(t) - \dot{x}_2(t)) + k_{p2}(x_{2d}(t) - x_2(t)) + f_{a2d} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{1d}(t) &= x_M(t) + \frac{f_{a1d}(t)}{k_1} \\ x_{2d}(t) &= x_M(t) + \frac{f_{a2d}(t)}{k_2} \end{aligned} \quad (4-11)$$

$$f_d(t) = M' \ddot{x}_{Md}(t) + k_{vM}(\dot{x}_{Md}(t) - \dot{x}_M(t)) + k_{pM}(x_{Md}(t) - x_M(t))$$

となる。また、合力 f_d を配分してアーム先端に加えられる力 f_{a1d} 、 f_{a2d} を決定する手法については、式(4-10)に示したように内力を一定に保つようする方法を用いる。即ち

$$f_{a1d}(t) = \frac{1}{2} f_d(t) + N, \quad f_{a2d}(t) = \frac{1}{2} f_d(t) - N \quad (4-12)$$

とする。ここで、

$$\begin{aligned} e_1(t) &= x_{1d}(t) - x_1(t) \\ e_2(t) &= x_{2d}(t) - x_2(t) \\ p(t) &= x_{Md}(t) - x_M(t) \end{aligned}$$

とおき、誤差ベクトル e を

$$e = [e_1 \quad \dot{e}_1 \quad e_2 \quad \dot{e}_2 \quad p \quad \dot{p}]^T \quad (4-13)$$

とする。 e は x_1 、 x_2 、 x_M の位置と速度の目標値からの誤差を表す。誤差システムの状態方程式は

$$\dot{e} = E e$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1+k_{p1}}{J_1} & -\frac{k_{v1}}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_2+k_{p2}}{J_2} & -\frac{k_{v2}}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{M'} & 0 & \frac{k_2}{M'} & 0 & -\frac{k_{pM}}{M'} & -\frac{k_{vM}}{M'} \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

となる。 K_{v1} 、 K_{p1} 、 K_{v2} 、 K_{p2} 、 K_{vM} 、 K_{pM} の6つのフィードバック・ゲインを適当に決定し、この誤差システムの極、つまり行列Aの固有値を複素平面の左半面に配置することにより、任意の収束が得られる。1自由度系においては、誤差方程式の行列の各成分は全て定数であるため、リアルタイムでゲインを変更する必要がない。ゲインの具体的な決定法については4.7の実験の節において説明する。

Fig. 4.4にこの系の流れ図を、Fig. 4.5にブロック線図を示す。

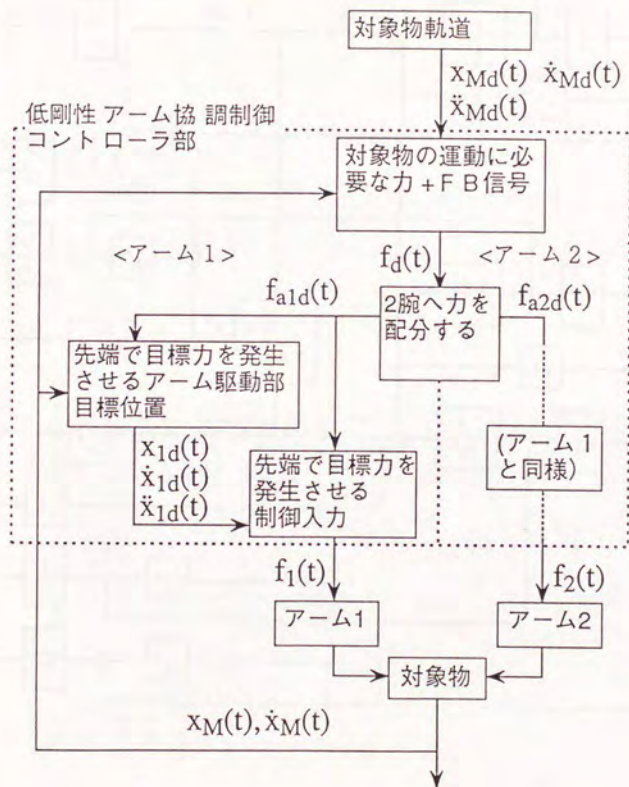


Fig. 4.4 2つの低剛性アーム協調制御系流れ図

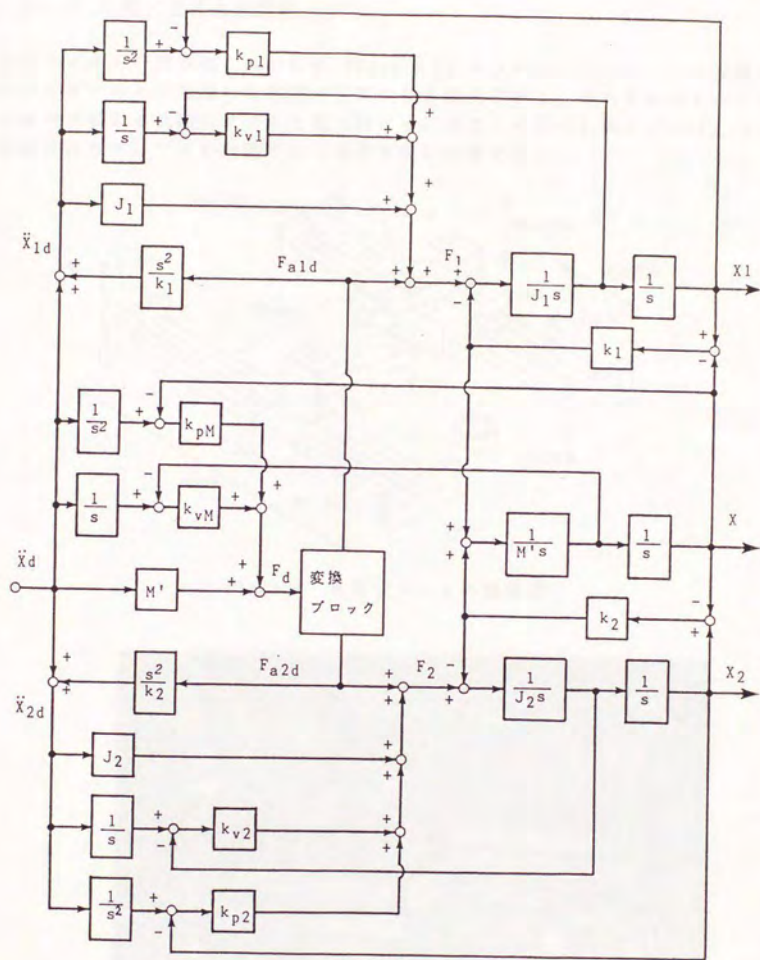


Fig. 4.5 2つの低剛性アーム協調制御系ブロック線図

この制御系を利用して、以下に搬送実験、挿入実験を行なう。

4.5 実験システム

4.5.1 実験システムの概要

実験システムの概観は、Fig.4.6、Photo.4.1のようになっている。この実験システムでは、ボールネジを用いた移動テーブルを2組使用する。それぞれのテーブルには、平行板バネによる低剛性アームを取り付ける。また、それぞれのアームは、ボールネジ機構によりテーブルの移動方向と垂直方向に移動できる。

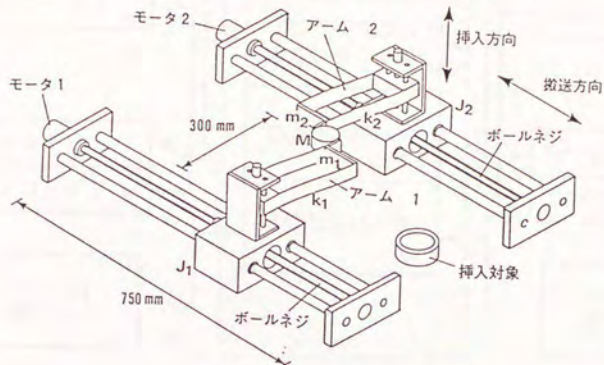


Fig.4.6 実験システムの概観図

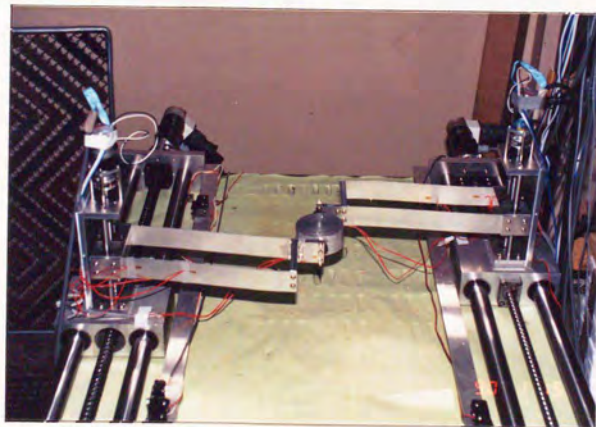


Photo.4.1 実験システム

実験システム全体の構成、および制御指令のフローをFig. 4.7に示す。

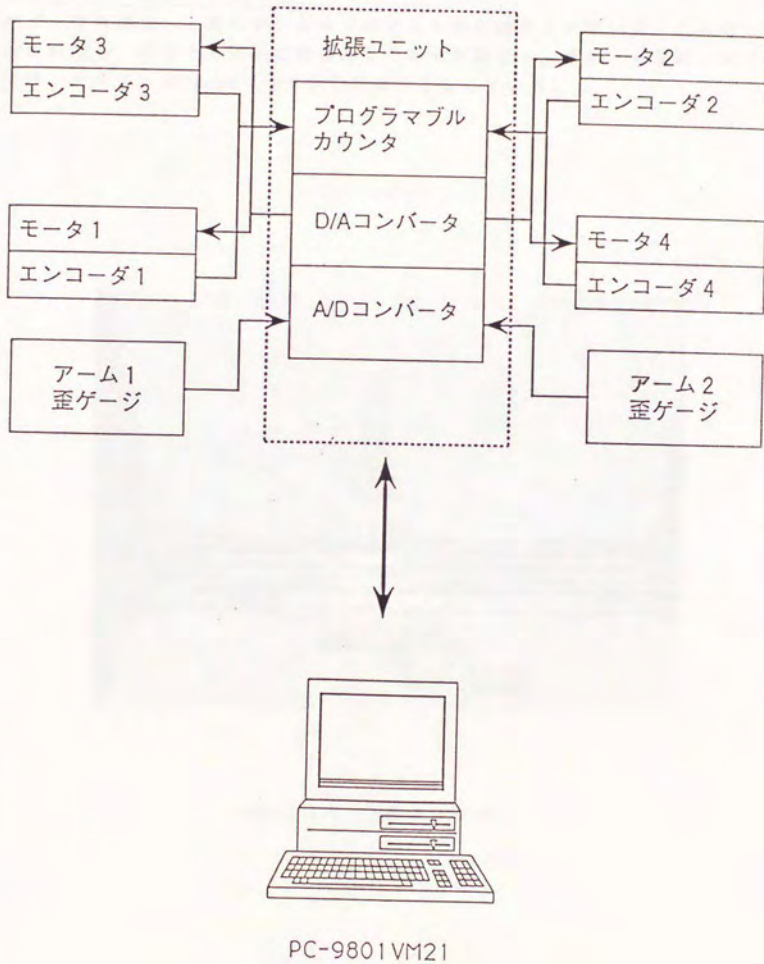


Fig. 4.7 実験システムの構成と制御指令のフロー

4. 5. 2 システムの構成と各部の特性

ここでは、システム各部の構成、およびそれぞれの特性について述べる。

4. 5. 2. 1 移動テーブル部

移動テーブル部は、2組のボールネジのナット部に固定されている。これをたがいに平行に設置し、両方とも水平方向の送りのみを制御する。また、本実験システムにおいては、テーブルはPhoto. 4.2で示した通りとなっている。

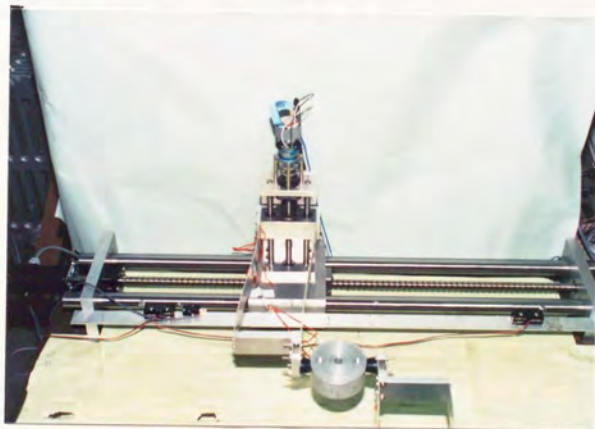


Photo. 4.2 移動テーブル

移動テーブルの外形をFig.4.8に示す。ボールネジのストロークは750mm、ピッチは10mmである。

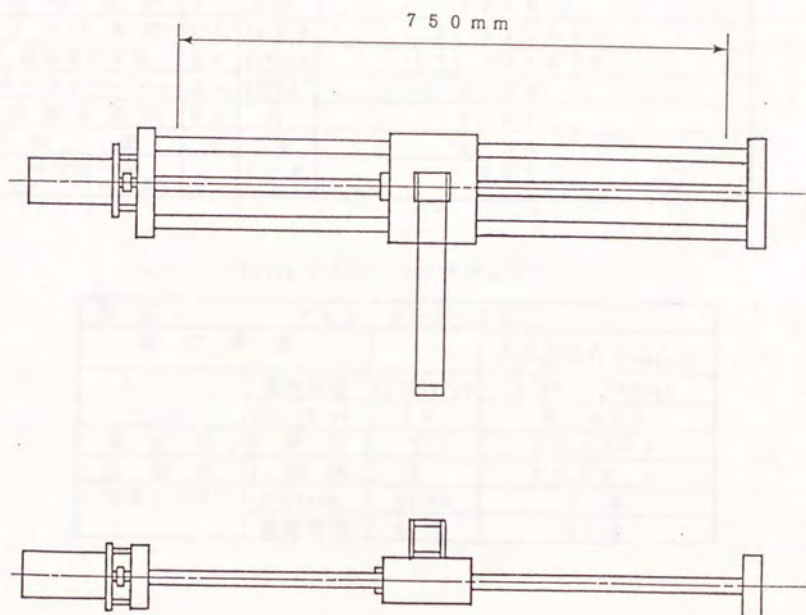


Fig.4.8 移動テーブル

使用するモータ、サーボバックは以下の通りである。

Table 4.1(a) モータ

形 式	R 5 1 1 T - 0 0 2		
項 目	記号	単位	定 格
定 格 出 力	P r	W	1 1 0
定 格 ト ル ク	T r	kg-cm	3 . 5
定 格 速 度	N r	RPM	3 0 0 0
ト ル ク 定 数	K t	kgcm/A	1 . 9 3 ± 1 0 %
誘起電圧定数	K e	V/Krpm	1 9 . 7 6 ± 1 0 %
ロータイナーシャ	J m	GRCMS ²	0 . 3 8
電 機 子 抵 抗	R a	Ω	4 . 9 1
重 量	W	K g	1 . 3 4
エンコーダ パルス数		P / R	2 0 0

Table 4.1(b) サーボバック

形 式	P D T - A 0 3 - 2 0		
速 度 帰 還			タコジェネレータ (7V+2V-0V/1000rpm)
入 力	指令電圧	V/1000rpm	DC3V / 1000rpm
	インピーダンス	K Ω	約 1 0 K Ω
最 大 出 力 電 圧	V		D C ± 1 3 0
定 格 出 力 電 流	A		D C ± 2 . 1
定 格 ト ル ク	1000rpm	kg-cm	3 . 3
	最高速度	kg-cm	3 . 3

次に、モータへのステップ入力（印加電圧）に対する、移動テーブル1の移動速度の応答をFig. 4.9に示す。ステップ入力の電圧は1 [V]である。

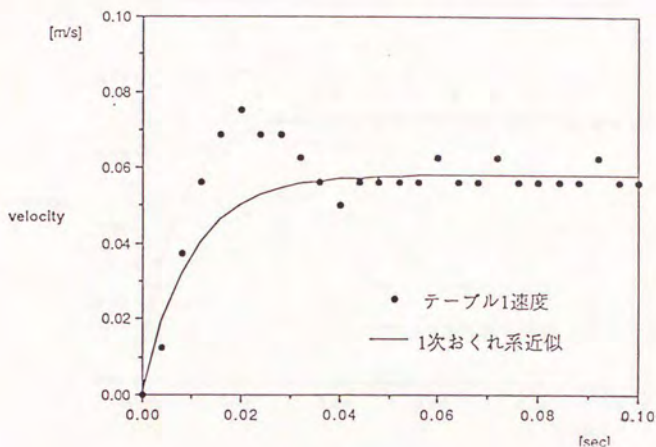


Fig. 4.9 テーブル1の送り方向のステップ応答

この応答は2次系の特性を示しているが、2次系モデルを利用すると新たなフィードバックが必要となり、3章の誤差システムが異なったものになってしまう。しかし、ステップ入力に対する振動成分はほとんど見られず、1次遅れ系とみなした場合との誤差は小さいと考えられる。そこで、本実験では敢えて移動テーブルの送り方向に対する応答を1次遅れ系で近似する。モータへの印加電圧を入力とし、移動テーブルの移動速度を出力としたときの伝達関数は式(4-15)となる。

$$G(s) = \frac{0.058}{0.010s + 1} \quad (\text{移動テーブル1の送りの応答}) \quad (4-15)$$

同様のステップ入力（印加電圧）に対する、移動テーブル 2 の移動速度の応答を Fig. 4.10 に示す。

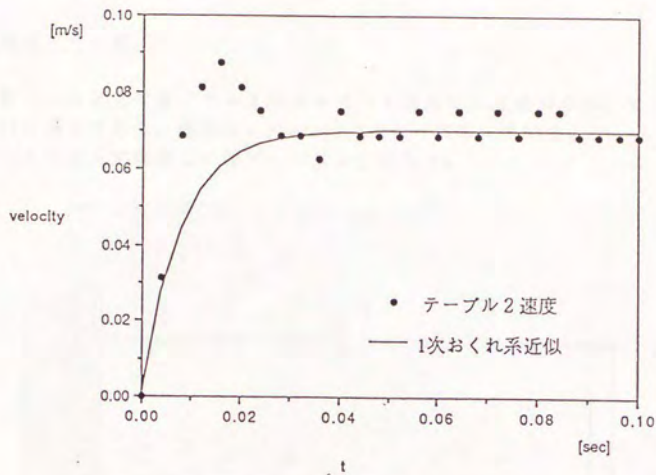


Fig. 4.10 テーブル 2 の送り方向のステップ応答

この応答から、移動テーブル 2 の送り方向に対する応答も移動テーブル 1 と同様に、1次遅れ系で近似する。モータへの印加電圧を入力とし、移動テーブルの移動速度を出力としたときの伝達関数は式(4-16)となる。

$$G(s) = \frac{0.070}{0.008s + 1} \quad (\text{移動テーブル 2 の送りの応答}) \quad (4-16)$$

4. 5. 2. 2 低剛性アーム部

低剛性アーム部については、アーム部と垂直移動機構部に分けて示す。

1) 低剛性アーム部

低剛性アームとしては、アルミ平板を板バネ構造にして使用する。アームの寸法は、Fig. 4.11の通りである。外観は、Photo. 4.3のようになっている。アームの歪の検出は、アームの根元に貼付した歪ゲージにより行なう。

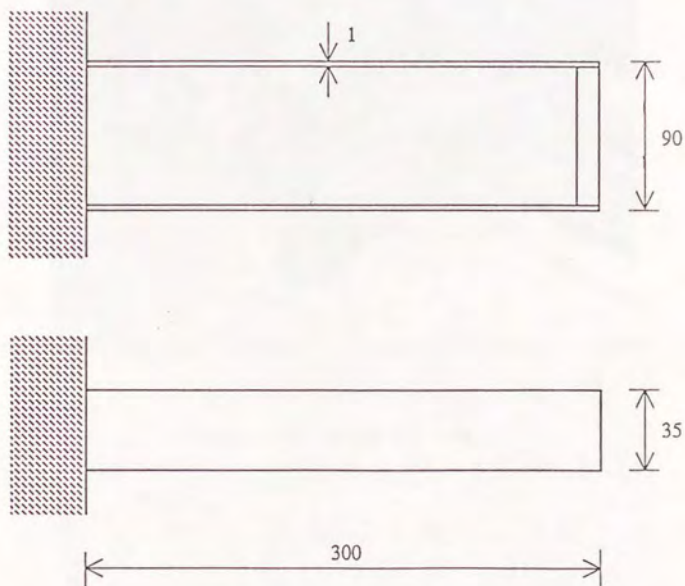


Fig. 4.11 低剛性アーム部

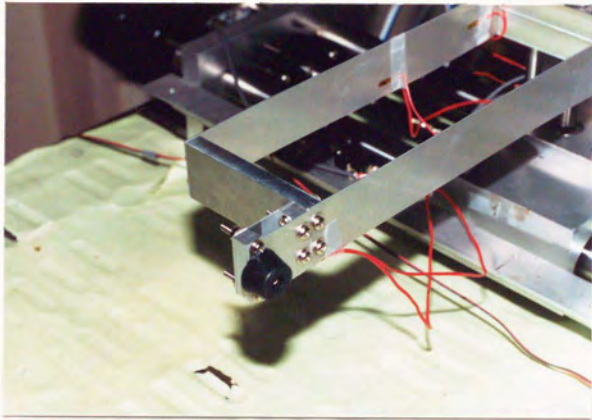


Photo. 4.3 低剛性アーム部

また、テーブルを固定した場合の低剛性アームの自由振動の様子をFig. 4.12に示し、そのFFT出力をPhoto. 4.4に示す。

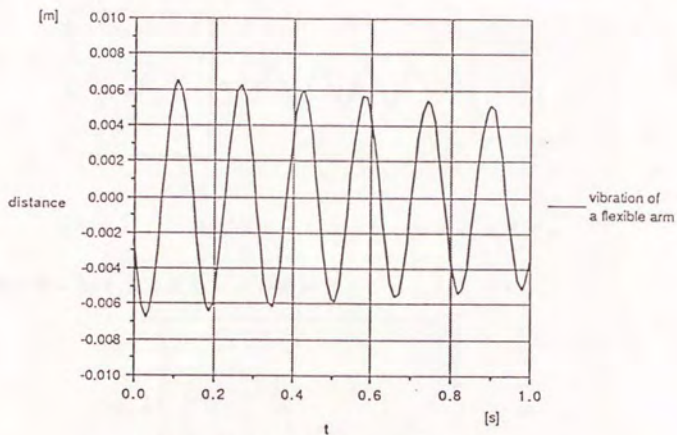


Fig. 4.12 低剛性アームの自由振動

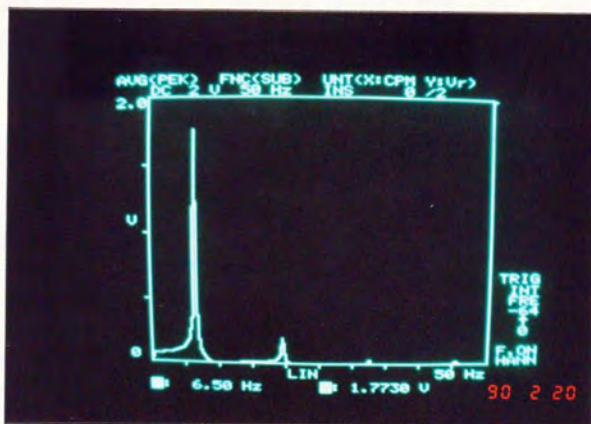


Photo. 4.4 アームの振動のFFT出力

この結果から、2次モード以上の振動の影響はほとんどみられず、この低剛性アームをFig. 4.13に示されるような1次のバネ・マス系で近似できることがわかる。



Fig. 4.13 低剛性アームのバネ・マス近似モデル

アーム部先端に加える力とアームの歪関係をFig. 4.14に示す。

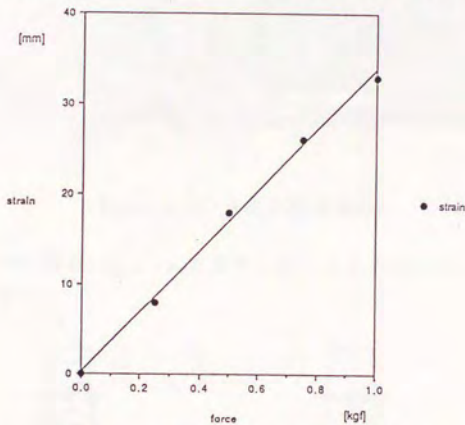


Fig. 4.14 低剛性アームの力-歪特性

これより、低剛性アーム部をバネで近似した場合のバネ定数をKとすると、

$$K = 300.0 \text{ (N/m)} \quad (\text{低剛性アームのバネ定数})$$

となる。したがって、Fig. 4.14、Photo. 4.4より得られた1次の振動周波数(6.6 Hz)とから、この低剛性アームの先端の等価マスの質量をMとすると、

$$M = 0.175 \text{ (kg)} \quad (\text{アーム先端のマスの質量})$$

となる。

2) 垂直移動機構部

低剛性アーム垂直移動機構の外観はPhoto. 4.5のようになっている。

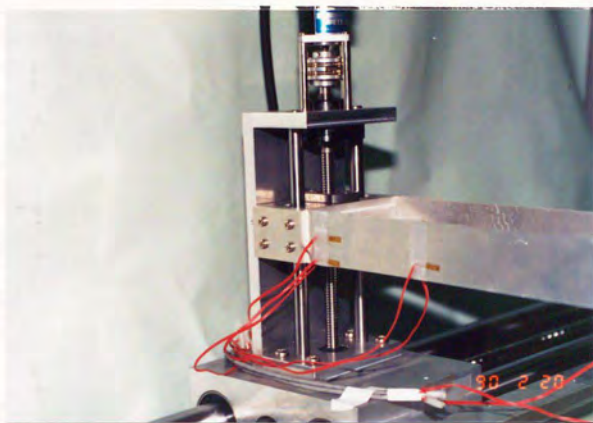


Photo. 4.5 垂直移動機構部

垂直移動機構部の外形をFig. 4.15 に示す。ボールネジのストロークは150 mm、ピッチは2 mmである。

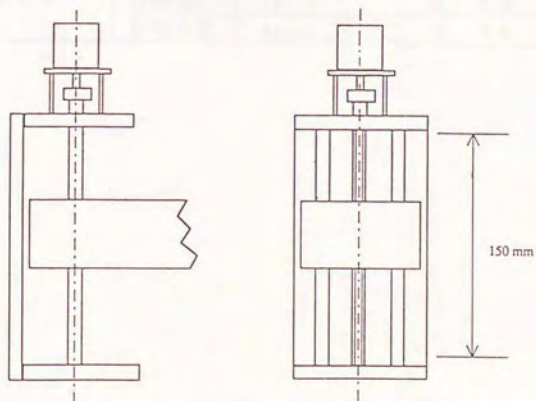


Fig. 4.15 低剛性アーム垂直移動機構部

使用するモータ、サーボバックは以下の通りである。

Table 4.2(a) モータ

形 式	R 3 0 1 - 0 1 1 E 1 7		
項 目	記号	単位	定 格
定 格 出 力	P r	W	1 1
定 格 ト ル ク	T r	kg-cm	0 . 3 6
定 格 速 度	N r	RPM	3 0 0 0
ト ル ク 定 数	K t	kgcm/A	0 . 3 5 ± 1 0 %
誘起電圧定数	K e	V/Krpm	3 . 6 ± 1 0 %
ロータイナーシャ	J m	GRCMS ²	0 . 0 0 1 9
電 機 子 抵 抗	R a	Ω	7 . 9
重 量	W	K g	0 . 1 6
エンコーダ パルス数		P / R	5 0 0

Table 4.2(b) サーボバック

形 式	P D T - A 0 1 - 1 5		
速 度 帰 還			F V 変換器による速 度信号 (3V±10%/1000rpm)
入 力	指令電圧	V/1000rpm	DC3V / 1000rpm
	インピーダンス	K Ω	約 1 0 K Ω
最 大 出 力 電 圧	V		D C ± 4 5
定 格 出 力 電 流	A		D C ± 1 . 2 5
定 格 ト ル ク	1000rpm	kg-cm	0 . 3 5
	最高速度	kg-cm	0 . 3 5

4. 5. 2. 3 力センサ

アーム先端の力を測定する力センサは、アルミの小型平行板バネに歪ゲージを張り付けたものを用いる。検出する力は、テーブルの移動方向のみとする。力センサ部は低剛性アームと同じく平行板バネ構造となっているが、剛性がアームより十分大きくなっているので、アームの特性に与える影響は無視してよい。Photo. 4. 6に力センサの外観を示す。このセンサは対象物にかかる合力を計測するために利用される。

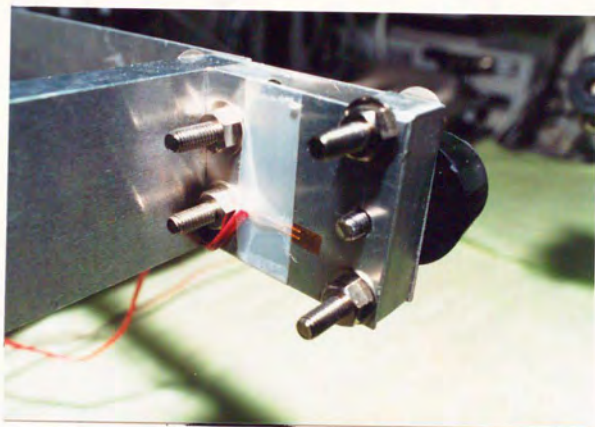
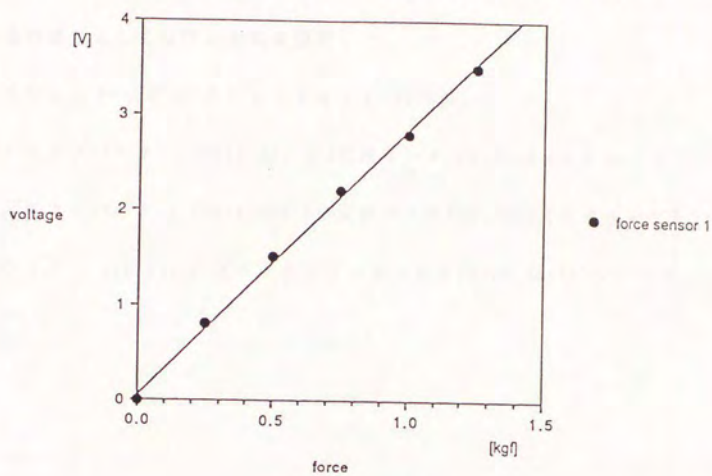
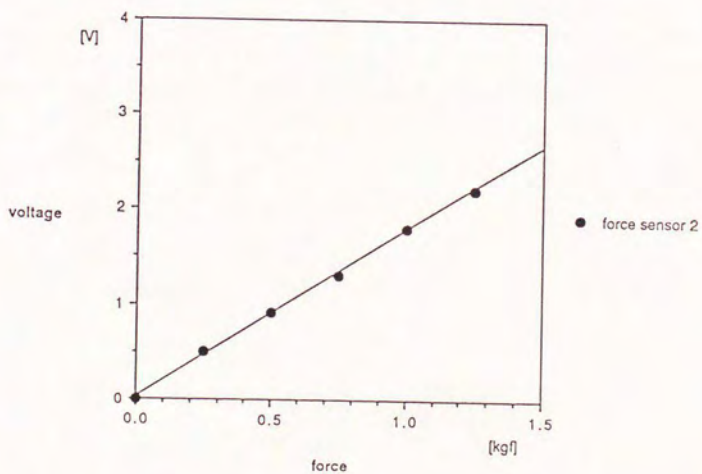


Photo. 4. 6 力センサ

Fig. 4.16にアーム先端に加わる力と歪ゲージの出力電圧の結果を示す。



(a) アーム 1



(b) アーム 2

Fig. 4.16 歪ゲージ出力

4. 5. 2. 4 その他

その他の機材としては次のものを使用した。

- ・コンピュータ : PC-9801VM21 (10MHz)
- ・D/Aコンバータ : 12bit 4ch D/A変換ボードPCN-3098 (ネオローク)
- ・A/Dコンバータ : 12bit 4ch A/D変換ボードPCN-2098 (ネオローク)
- ・カウンタ : 24bit 4ch プログラマブルカウンタCNT24-4A(98) (コンテック)

4.6 制御実験

本節では、前節までに示した実験システムを用いて、制振、搬送制御、挿入作業のシミュレーションと実験を行う。これにより本制御系の有効性を検証する。

実験に用いるパラメータをTable. 4.3にまとめて示す。

Table 4.3 システムのパラメータ

J_1, J_2 (移動テーブルの質量)	4.00 [kg]
M (対象物質量)	4.00×10^{-1} [kg]
m_1, m_2 (アーム先端の質量)	1.80×10^{-1} [kg]
k_1, k_2 (アームのバネ定数)	3.00×10^2 [N/m]
μ_1, μ_2 (接触点の摩擦係数)	5.00×10^{-1}

なお、本実験で使用するモータはDCモータであり、ボールネジによりアームを駆動する機構となっている。このため、アーム先端が対象物に加える力の反力が実際にはモータにはね返えず、モータが目標トルクを発生するよう制御しても、うまく制御が行えない。このため、本実験システムでは、目標トルクをアクチュエータが受けた時に発生するはずの加速度を計算し、この加速度が発生するよう、式(2-15), (2-16)を利用して指令電圧を与えるという手法を利用する。

4. 6. 1 フィードバックゲインの決定

さて、4. 4 にも示したように、誤差方程式の E は次のような構成になっている。

$$E = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ * & & Q \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

行列 E の固有値は小行列 E_1 、 E_2 、 Q の固有値と一致する。 E_1 、 E_2 がアームの誤差の挙動を表し、またアームの誤差が 0 に収束した後の対象物の誤差の挙動に対応するのが Q である。式 (4-17) より、対象物の誤差を表す式は

$$\ddot{p} = \frac{k_1}{M'} e_1 + \frac{k_2}{M'} e_2 - \frac{k_{PM}}{M'} p - \frac{k_{VM}}{M'} \dot{p} \quad (4-18)$$

となっている。式 (4-18) より、アームのアクチュエータ部の目標位置からの誤差 e_1 、 e_2 が対象物の誤差 p より早く 0 に近づけば、 e_1 、 e_2 の収束後、対象物の誤差収束が

$$\ddot{p} = -\frac{k_{PM}}{M'} p - \frac{k_{VM}}{M'} \dot{p}$$

に従うので、対象物の位置・速度に対するフィードバックゲインをそのまま対象物のコンプライアンスとすることができる。

ここでは、2つの同等なマニピュレータを用いることを想定し、簡単のため両アームに対するフィードバックゲイン (k_{v1} 、 k_{p1}) と (k_{v2} 、 k_{p2}) を等しく設定する。アームの誤差収束の極である $E_1 (= E_2)$ の固有値は

$$\alpha = \frac{-k_{v1} \pm \sqrt{(k_{v1})^2 - 4 J_1 (k_1 + k_{p1})}}{2 J_1} \quad (i = 1, 2) \quad (4-19)$$

であり、対象物の誤差収束の極は、対象物に対するフィードバックゲイン k_{PM} 、 k_{VM} を用いて

$$\beta = \frac{-k_{VM} \pm \sqrt{(k_{VM})^2 - 4 M' k_{PM}}}{2 M'} \quad (4-20)$$

と表される。この時アームの誤差収束を対象物の誤差収束より早くするための条件は

$$| \operatorname{Re}(\alpha) | > | \operatorname{Re}(\beta) | \quad (4-21)$$

として表される。

また、対象物にできるだけ振動を生じないことが望ましく、このためには式(4-20)、(4-21)の α 、 β が虚数部を含まないように

$$\begin{aligned} (k_{vi})^2 - 4 J_i (k_i + k_{pi}) &\geq 0 \\ (k_{vM})^2 - 4 M' k_{pM} &\geq 0 \end{aligned} \quad (4-22)$$

とする。これにより、誤差は過減衰か臨界減衰で減衰する。

以上のフィードバックゲイン決定指針に従ってゲインを決定し、シミュレーションを行う。

4.6.2 振動制御

前項で示したフィードバックゲイン決定の指針に従ってゲインを定め、誤差システムの極の設計が実機において可能なことを検証する。

フィードバックゲインとしては、式(4-20)、(4-21)を満たす候補の中で、アームの誤差をできる限り早く収束させるものが理想であるが、実際にはアクチュエータのトルク飽和、ボールねじ、カップリングに生じる振動の影響等により、アームの誤差収束の極をあまり大きく設定することができない。従って、シミュレーション、実験共に安定な応答を示す極を選んだ。この結果、フィードバックゲイン、極はTable 4.4に示す通りとなった。誤差システムの対象物の極とアームの極は非常に接近した値となった。

Table 4.4 フィードバックゲイン

フィードバックゲイン	アーム	K_{P1}, K_{P2}	2.46×10^3
		K_{V1}, K_{V2}	2.10×10^2
	対象物	K_{PM}	4.69×10^2
		K_{VM}	3.75×10
誤差システムの極			-2.50×10 (対象物) -2.65×10 (アーム)

シミュレーションと実験により、4章に示した制御則の妥当性を検証する。ここでは誤差の収束について調べるため、目標位置をつねに原点において、初期外乱の振動を制御するシミュレーション、実験を行う。シミュレーション条件は、Table 4.5の通りである。

Table 4.5 シミュレーション条件

与える初期外乱	位置	-5.00×10^{-3} [m]
	速度	3.30×10^{-1} [m/s]
N: 内力		6.00 [N]
サンプリング・タイム	制御入力 of 計算	10.0 [ms]
	状態 of 計算	2.0 [ms]
制御時間		1.0 [s]

実験結果との比較のため、シミュレーションでは実験で測定された初期外乱を利用している。内力については、対象物質量、摩擦係数を考慮すると、外乱のない状態において $N \approx 4$ [N] となるが、摩擦係数の変動、外乱による接触力の変化に対応できるよう、安全率を加え 6 [N] としている。

以上の条件における対象物の位置のシミュレーション結果と、対象物がバネ、ダンパ K_{PM} 、 K_{VM} により支えられた場合の応答を Fig. 4.17, Fig. 4.18 に示す。

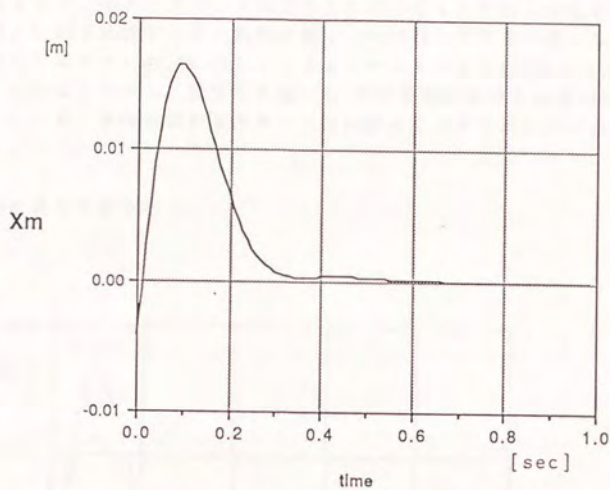


Fig. 4.17 振動制御シミュレーション結果

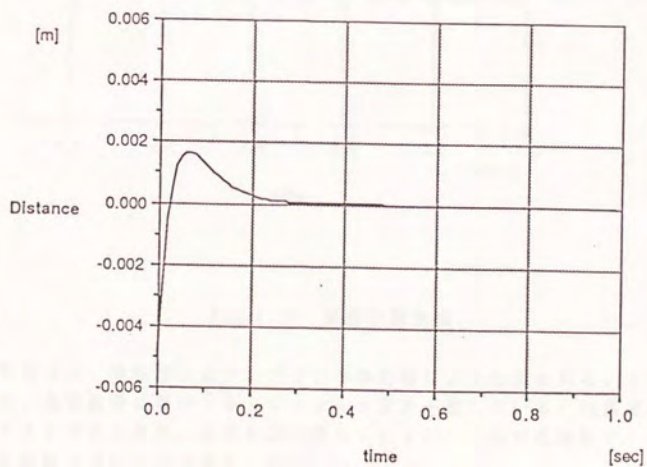


Fig. 4.18 対象物の運動を k_{PM} 、 k_{VM} による完全な
バネ・マス・ダンパ系とみなした場合

Fig. 4.17のシミュレーション結果から、全ての極を式(4-20), (4-21)を満たすよう設定してあるので、フィードバック系が誤差収束に対して有効に作用することが確認できる。Fig. 4.18と比較すると、初期状態 -0.005 に対してプラス側に生じる行過ぎが、バネとみなした場合の 0.0017 に対してシミュレーションでは 0.015 と非常に大きくなっている。これは、アームに設定した極 -26.5 が対象物に設定した極 -25.0 と非常に近い値となったため、系の応答が2次系では近似することができなかつたためであると考えられる。

Fig. 4.19に実験結果を示す。

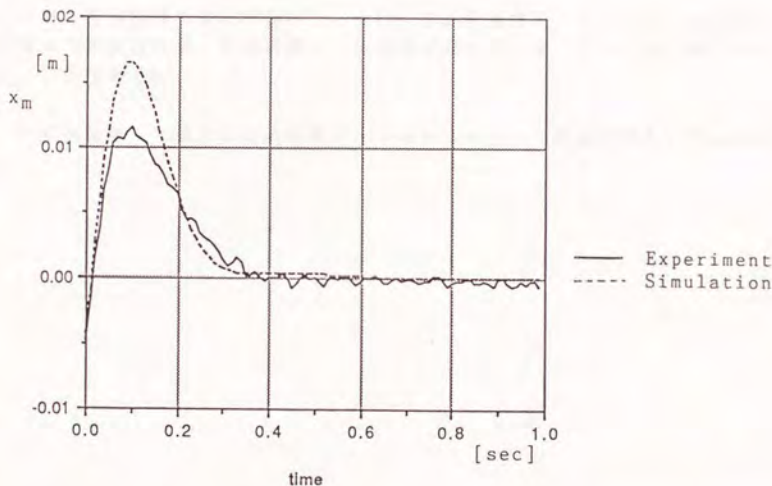


Fig. 4.19 振動制御実験

グラフを見ると、実験値にはサンプリングの影響によると思われるノイズが乗っているものの、実験結果はほぼシミュレーション値に一致している。行過ぎ量がシミュレーションより小さくなり、収束も少し遅れているが、これは低剛性アーム自身の粘性や機構の摩擦などによると考えられる。

以上の結果から、実験システムのモデル化の妥当性、また、誤差システムの解析に基づき設計されたフィードバック系の有効性が確認された。

4. 6. 3 搬送制御実験

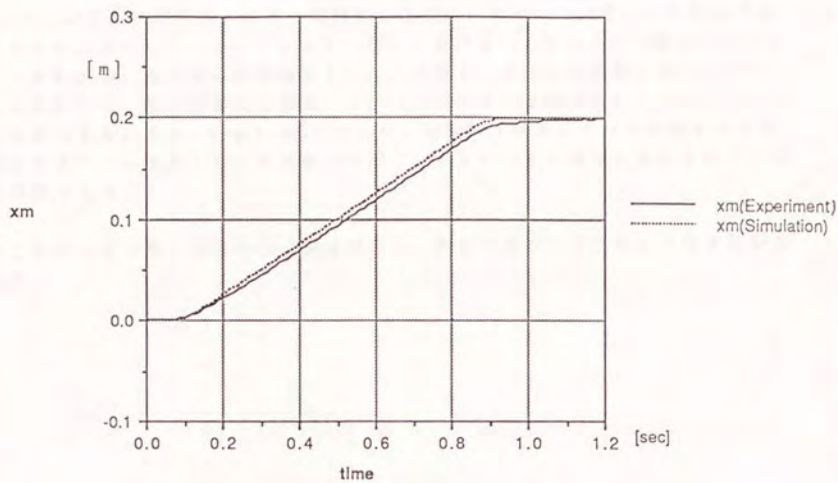
本節では、3. 8. 2で設計した対象物の搬送軌道での搬送制御シミュレーションと実験を行う。前節で利用したフィードバックゲインを用いる。本実験により、動力学補償項が正しく作用すること、外乱による誤差が存在する場合にも、誤差システムがフィードフォワード指令と独立に収束することを確認する。このため、初期外乱がない場合と、与えた場合の2通りのシミュレーション、実験を行なう。ここでの初期外乱は

位置： 1.45×10^{-2} [m]

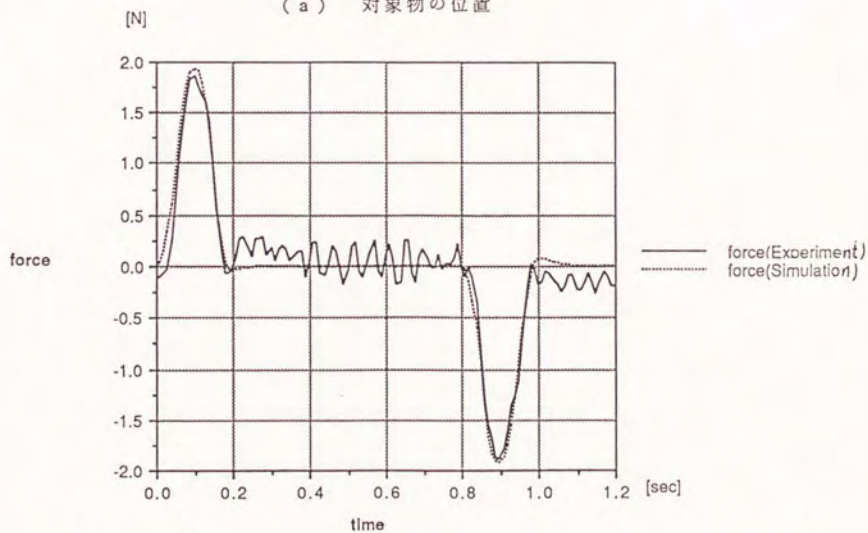
速度： 2.60×10^{-2} [m/s]

である。なお、目標軌道の搬送時間は1. 0秒、搬送距離0. 2m、また、停止時から等速状態までの移行時間、等速状態から位置決め点で停止するまでの移行時間はそれぞれ0. 2秒である。

まず、初期外乱がない場合の搬送制御のシミュレーションと実験結果を、Fig. 4. 20に示す。



(a) 対象物の位置

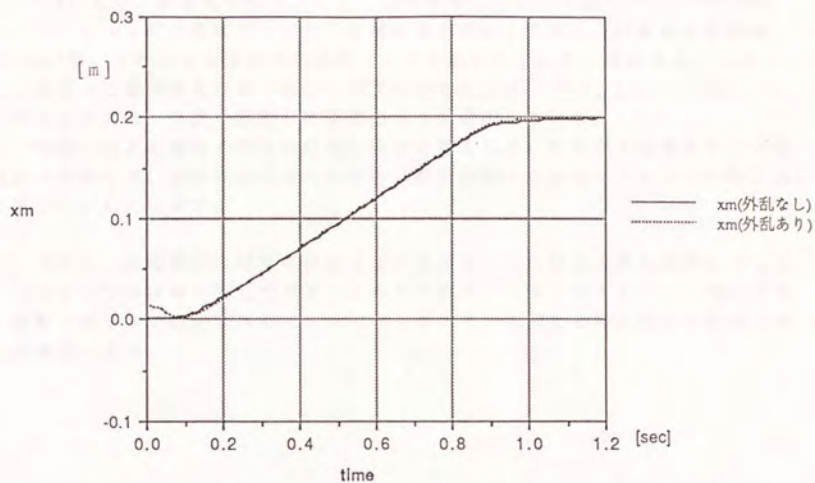


(b) 対象物にかかる合力

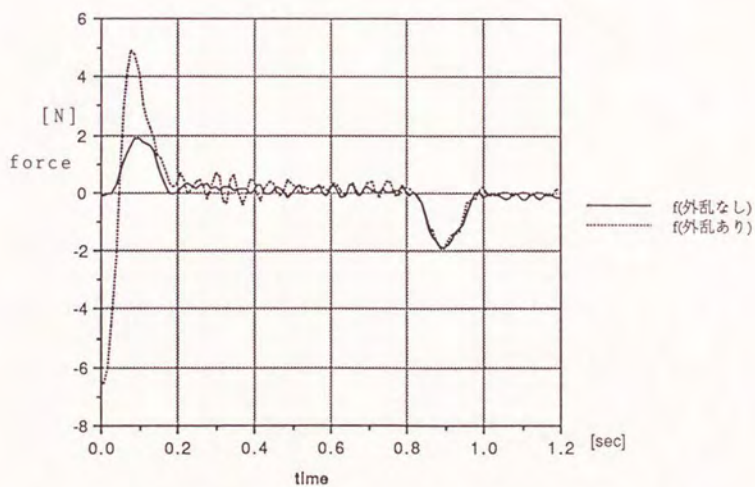
Fig. 4.20 搬送制御シミュレーションと実験結果

Fig. 4.20(a)より、搬送実験における対象物の位置は、モデル化誤差による遅れがみられるものの、ほぼシミュレーションと一致し、設計された軌道通りに搬送を行っていることがわかる。搬送後の位置偏差もほとんど無く、また残留振動も起こらない。これらの結果から、設計軌道の正当性、フィードフォワード項が正しく作用していることが確認できる。また、Fig. 4.20(b)からは、対象物が軌道にそって運動するために必要となるフィードフォワード力が、ほぼシミュレーション通りに達成されていることが確認できる。

次に、初期外乱が無い場合の搬送実験結果と、初期外乱を与えた場合の搬送制御実験を示す。



(a) 対象物の位置



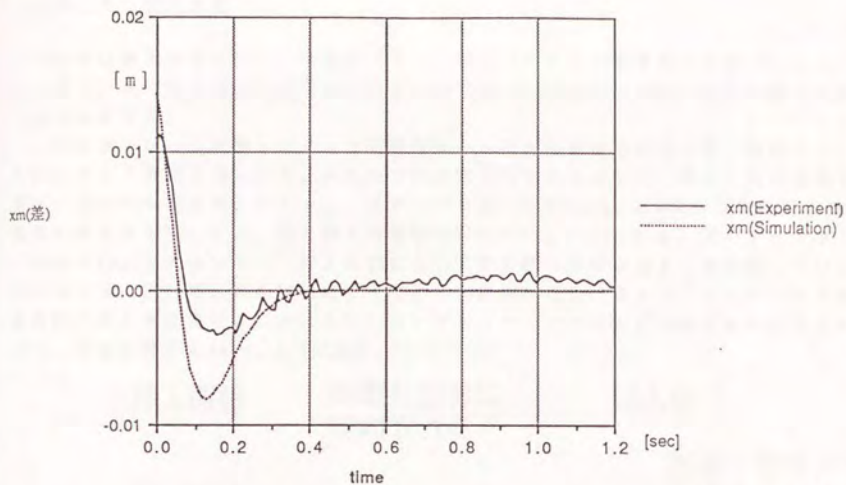
(b) 対象物にかかる合力

Fig. 4. 21 搬送制御実験結果の比較

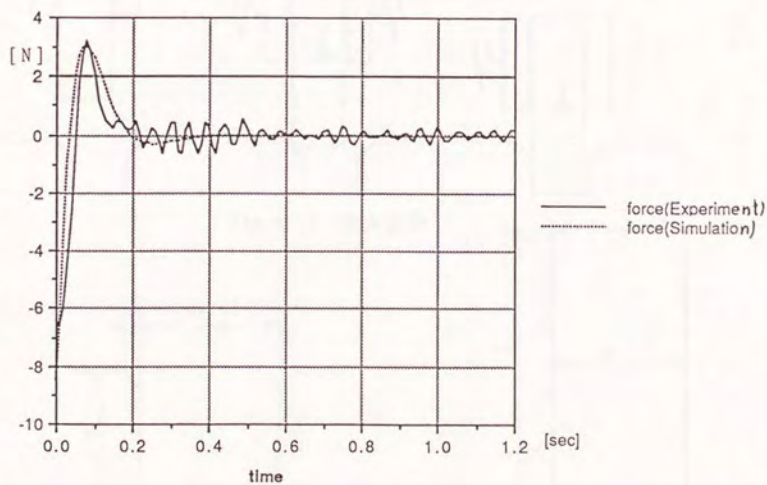
Fig. 4.21(a)より、搬送制御においても、振動制御と同様に初期外乱による誤差をフィードバックループが収束させながら目標軌道を達成している。対象物の位置は、0.3 [sec]ほどで外乱による誤差を吸収し、その後は外乱がない場合とよく一致している。また、位置決めも正確であり、残留振動も生じない。Fig. 4.21(b)では、対象物にかかる合力は、外乱を吸収して目標の合力を達成している。

また、外乱を与えた場合の誤差の収束の仕方を見るため、外乱がある場合とない場合の位置の差をとり、同じ外乱を与えた場合の振動制御シミュレーションと比較する。この結果をFig. 4.22に示す。

Fig. 4.22より、位置誤差の収束の仕方は振動制御を行った場合と同じ傾向を示しており、力に関してはほぼ一致している。このことから、フィードフォワード項とは独立に、誤差システムが設定されたフィードバックゲインで決まる極に従って収束しすることが確認できる。



(a) 位置の誤差収束



(b) 力の誤差収束

Fig. 4.22 誤差収束の様子

4. 6. 4 挿入実験

本節では挿入実験を行う。本実験により、誤差システムの極を決定するフィードバックゲインを利用することにより、外力に対するコンプライアンスが設計可能であることを検証する。

この実験では、本実験システムの低剛性アーム垂直移動機構を用いて、面取りをした穴にアルミ角材を挿入する。本実験で対象物を制御する方向は、搬送・振動制御を行った方向のみであり、またフィードバックゲインにはTable 4.6のものを利用する。実験の概念図をFig. 4.23、穴と挿入対象物の寸法をFig. 4.24に示す。穴のクリアランスは約2 [mm]と大きいので、挿入過程において対象物は片側の面としか接触しないと考えられる。従って、この実験によって挿入対象物から受けるコンプライアンスの制御方向の反力を測定することにより、コンプライアンスの検証が可能であると考えられる。実験の様子をPhoto. 4.7に示す。

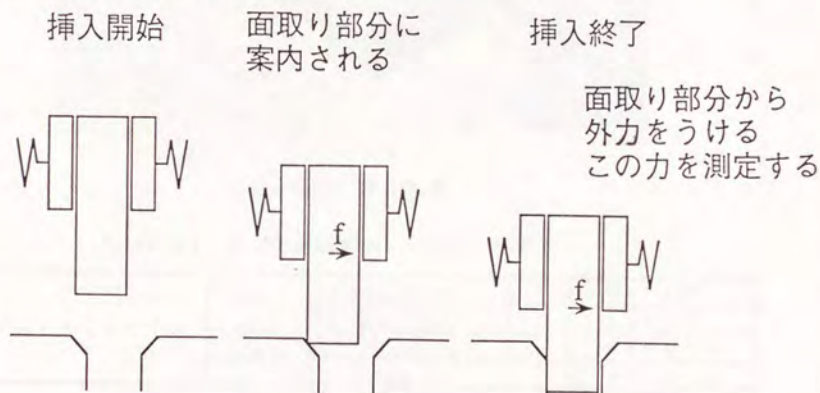


Fig. 4.23 挿入実験

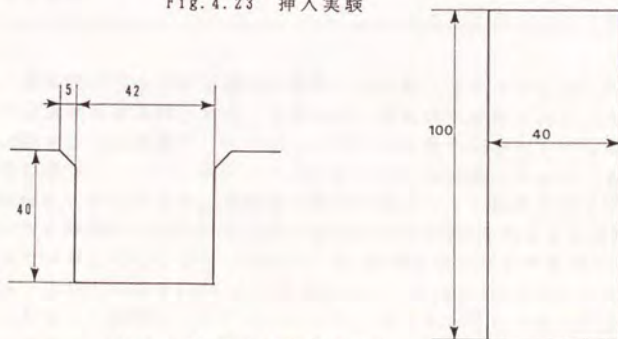


Fig. 4.24 挿入対象物の寸法

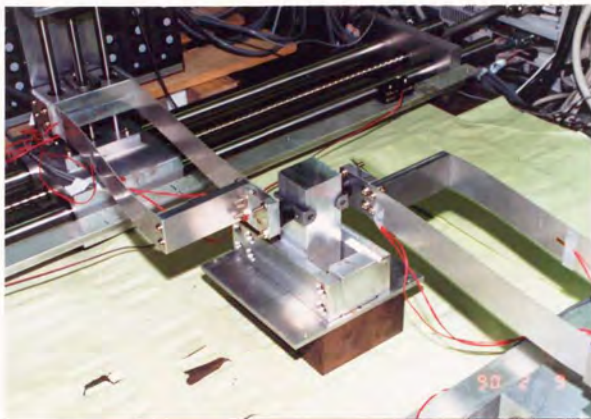


photo4.7 挿入実験

Table 4.6 挿入で用いるフィードバックゲイン

フィードバックゲイン	アーム	K_{p1} 、 K_{p2}	2.5×10^3
		K_{v1} 、 K_{v2}	2.1×10^2
	対象物	K_{PM}	2.0×10^2
		K_{VM}	2.5×10
誤差システムの極			-20.0, -13.3 (対象物) -26.25 (アーム)

挿入作業では、対象物が穴の面取り部分に案内されて挿入されるときに、Fig. 4.23のように挿入時の位置ずれに比例した力 f を受ける。挿入時の位置ずれにより受ける力 f は、対象物に設定された位置フィードバックゲインを静的剛性としたものである。つまり、対象物の位置フィードバックゲインが大きいと、対象物にかかる f も大きくなり、挿入作業が行ないにくくなる。対象物は挟みつけによって保持されているので、制御を行わないときは両アームのバネ定数の和600 [N/m]がそのままの対象物のコンプライアンスとなる。これに対し、Table 4.6に設定されている対象物のコンプライアンスはアーム自身の600 [N/m]より柔らかく200 [N/m]に設定されている。このようなゲインを用いて制御を行なうことにより、挿入時にかかる反力を小さくできることが期待できる。

挿入を行う際には、初期条件としてあらかじめ約3 [mm]位置をずらしておき、対象物が面取り部分に案内されて挿入される際の対象物にかかる合力を測定する。本制御系を用いてアクティブにコンプライアンスを制御した場合と、アームの剛性をそのまま利用した場合の2通りの挿入を行った。対象物のx方向の位置をFig. 4.25に、対象物にかかる合力と対象物の位置をFig. 4.26に示す。本実験での挿入速度は2.5 [cm/s]、対象物を保持する内力は6.0 [N]である。

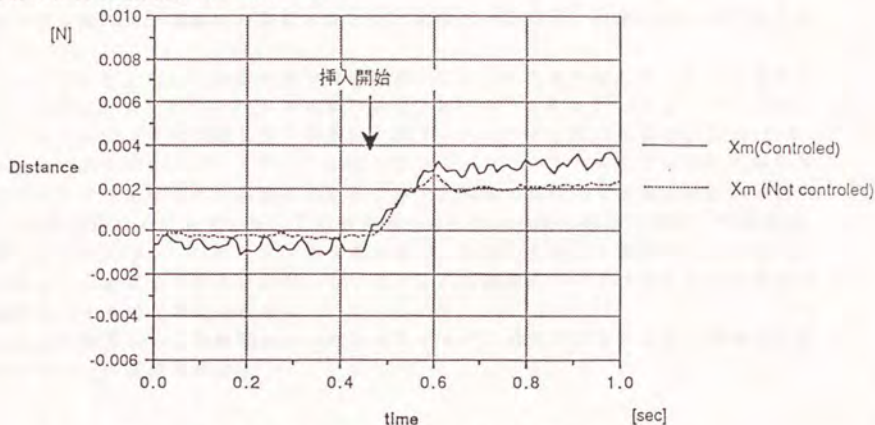


Fig. 4.25 挿入過程における対象物の位置

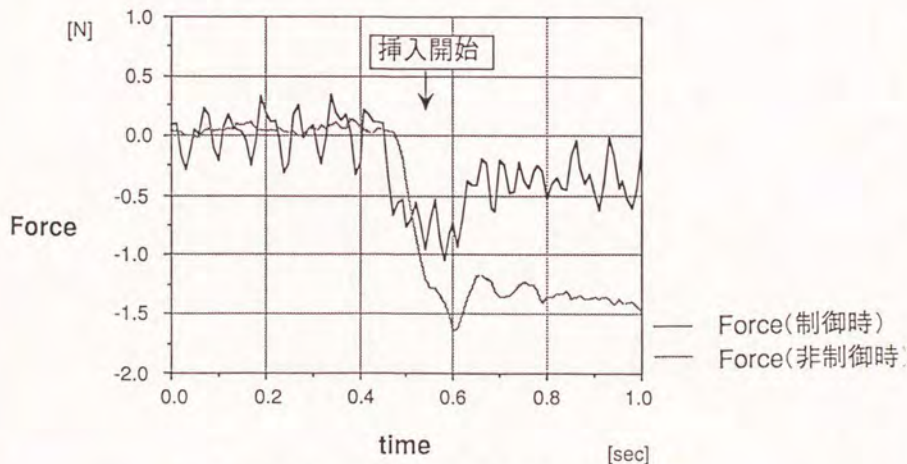


Fig. 4.26 挿入実験結果 (対象物にかかる合力)

Fig. 4.25より、約0.45sで挿入対象物が面取り部に接触し、その後0.6sまで面取り部からの反力により穴の中心方向に向い、その後は穴の片側の面に沿いながら挿入されている様子がわかる。挿入過程における振動成分の振幅をみると2mmと比べて小さく、接触が片側の面のみと生じていることが確認できるので、反力は、面取り部に案内されている時には面取り部の接触点から、面に沿って挿入されている時には片側の接触面から受けていることがわかる。また、制御を掛けた場合のグラフではノイズの影響が見られるが、接触時の振動はほとんど発生しておらず、安定な挿入が実現されている。

Fig. 4.25より、Fig. 4.26のグラフは接触点、面からの反力を表していると考えてよく、これによりコンプライアンスを調べることができる。Fig. 4.26より、コンプライアンスをアクティブに制御しない場合は、両アームのバネ定数の和600[N/m]がそのままの対象物のコンプライアンスとなっている。フィードバックゲインを利用しコンプライアンスを制御した場合には、しなかった場合に比較して対象物にかかる合力が約1/4程度小さくなっている。この合力をFig. 4.25から得られる対象物の移動距離で割ることによりコンプライアンスを求めると、制御した場合は約120[N/m]と、設定した値よりやや小さくなっている。これは測定系のドリフト、モデル誤差等の影響によるものと考えられる。

これらの結果から、対象物のコンプライアンスと、保持するための内力が独立に設計できることが確認された。

4. 7 まとめ

本章では、3. 6の式(3-29)に示した制御則を1自由度系に適用し、振動制御実験、搬送実験、挿入実験により、その有効性を検証した。

本実験では挟みつけにより対象物を保持しており、目標加速度の微分が連続関数であるという拘束条件の他に、落下させず破壊しないための条件を示した。また、アーム先端で発生できる力は微分が連続である必要があることから、剛体機構では把持力の2乗和が最も小さくなる最適内力を利用することができないことを示し、内力を常に一定に保つという特性を持つ力の配分法を示した。

DCモータとボールネジを用いた2台の移動テーブルと、平行板バネからなる装置を製作し、実機を用いて振動制御、搬送、挿入実験を行なった。それぞれのアームの誤差ベクトルを対象物の誤差ベクトルより早く収束するよう、更に実機の特性を考慮して、フィードバックゲインの決定を行なった。振動制御実験結果から、設計された誤差システムの極がほぼ理論通りに実現され、ゲイン決定の指針の妥当性が示された。搬送実験結果からは、動力学補償項が正しく作用することが確認された。更に、初期外乱を与えた場合の搬送実験から、誤差システムがフィードフォワード指令と独立に収束することが確認された。挿入実験では外力に対するコンプライアンスが設計可能であることが検証された。

第5章

産業用ロボットを利用した 協調制御系の構成法

第5章 産業用ロボットを利用した協調制御系の構成法

目次

- 5.1 はじめに
- 5.2 協調システムの構成法
- 5.3 速度コントローラを利用した制御手法
- 5.4 まとめ

5. 1 はじめに

前章までにおいて、動力学を考慮しトルク制御を用いた協調制御系の設計を行なった。これらの手法は理論的な特性は極めて高く、将来的には必須のものであるが、現状の産業用ロボットは、モデルで考慮していない機構の摩擦、ガタ等の影響が極めて大きく、理論を適用するには程遠い。これは、ロボット利用の現状を眺めると明らかである。本章ではロボット制御技術の現状を考慮し、2章において行なった剛性解析の結果を利用し、位置、あるいは速度制御コントローラを用いた一般の産業用ロボットを協調制御に利用するためのシステム構成の指針を述べる。

産業用ロボットを利用し協調制御を行おうとした場合に最も問題となるのは、ロボット先端に幾何的な拘束が与えられる点である。これを満足するためには拘束を与える相手の機構との干渉力の制御が不可欠となるが、一般のPID制御を利用した位置制御系により力を制御することは困難だからである。DCモータを利用した1自由度系を例に取り、PID制御を利用した位置コントローラを利用して力制御を行なう場合の制御系のブロック線図をFig. 5.1に示す。PID制御による位置制御系のサーボ剛性は無限大となるため、インピーダンス制御時のようにロボットの目標値からの位置偏差を利用して力を発生するといった手法が利用できない。従って、ロボット先端での力制御のためにはロボット先端の変位を力に変換するためのバネの存在が前提となる。一方、産業用ロボットはオープンループ制御により、目標の位置精度を、残留振動を発生せず達成するよう設計されており、その機構的な剛性はかなり高い。しかも、大きな減速比を有する関節に静止摩擦が加わると、ロボット手先の力はアクチュエータにほとんど伝達されないと考えられる。このため、ロボット先端が幾何的な拘束を受けた状態でロボットの位置誤差が生じると、その誤差がわずかなものであっても、ロボット手先には剛性と変位の積に比例した力が発生し、機構的な破壊を招く恐れがある。

このように、PID制御を用いた位置制御系をベースとしたコントローラ、摩擦、減速比の大きな機構を利用して、トルク制御に基づいた制御則を利用することは事実上不可能である。しかし一方で、ロボットの協調制御への利用により実現が可能となる作業も多く、実用的な制御手法、そのためのシステム構成法を明らかにしておくことは非常に重要なことである。本章では、ロボット本体を剛体機構とみなし、ロボット制御系は外乱を受けずに動作することが可能であるという前提をおき、協調制御システムの構成法を論じる。5. 2では協調システムを構成するための指針を示す。ここでは2章に示した剛性行列の解析結果が利用される。5. 3では産業用ロボットの制御特性を考慮した協調手法を述べる。なお、本節を通じて、対象物はそれぞれの機構にrigidに把持されており、過大な内力が加わらない限り内力に拘束条件はないものとする。

本章の結果は、次節においてクレーン、ロボットの協調制御システムを設計し、制御実験を行なう際に利用される。

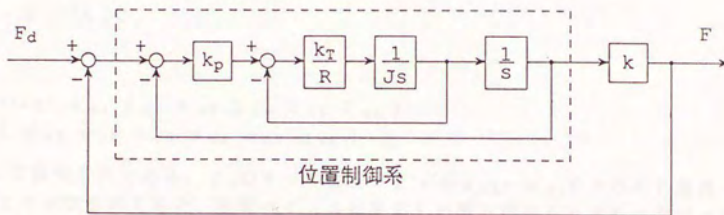


Fig. 5.1 P I D 位置制御系を利用した力の制御

5. 2 協調システムの構成

本節では協調に利用される機構の剛性行列を解析し、産業用ロボットに低剛性部を導入する。前節において、ロボットの位置誤差が過大な内力を発生することを指摘したが、これはロボットの剛性が高いことに起因する。従って低剛性部を導入すれば、位置誤差が低剛性部に吸収されるので内力の変動を小さくすることが可能となる。剛性を低下させることは一般に、振動の原因となる、制御特性を劣化させる等の理由から好ましいこととはされていないが、低剛性部の適当な導入は協調システムを実現する上で非常に有効であることを示す。以下では、ロボットが任意の剛性行列で表現される機構と協調するための手法を述べる。

ロボットとの協調相手の対象物重心座標に関する剛性行列を K_c とすると、2. 2. 3 に示した通り対角化を行なうことで、この機構に対する弾性体空間と剛体空間を求めることができる。

$$K_c' = U_c^{-1} K_c U_c \quad (5-1)$$

但し

$$K' = \text{diag}(\lambda_{c1} \lambda_{c2} \lambda_{c3} \lambda_{c4} \lambda_{c5} \lambda_{c6})$$

$$U_c = [u_{c1} \ u_{c2} \ u_{c3} \ u_{c4} \ u_{c5} \ u_{c6}]$$

で、 U_c は直交行列である。 U_c の6つの固有ベクトル $u_{c1} \sim u_{c6}$ をそれぞれ基底ベクトルとする空間を考えると、固有ベクトルに対応した固有値はそれぞれの空間の剛性を表す。従って、その大きさによって、空間を剛体空間 $S_{cr}(V_{cr})$ 、弾性体空間 $S_{cf}(V_{cf})$ に振分けることができる。 $S(V)$ は行列 V の全ての縦ベクトルの張る空間を表す。また、

$$V_{cr} = [u_{cr1} \ u_{cr2} \ \dots \ u_{crm}]$$

$$V_{cf} = [u_{cf1} \ u_{cf2} \ \dots \ u_{cfn}]$$

$$V_{cr} \in R^{6 \times m}$$

$$V_{cf} \in R^{6 \times n}$$

$$m + n = 6$$

とする。 u_{cr1} は剛体空間に対応した固有ベクトルを、 u_{cf1} は弾性体空間に対応した固有ベクトルを表す。ロボット本体を剛体とみなすと、2つの機構が閉ループ系を構成した時、 S_{cr} においては剛体同士が協調制御され、 S_{cf} においては剛体と弾性体が協調制御されることになる。ロボットに位置誤差が発生すると、 S_{cf} の誤差成分は弾性部が吸収するが、 S_{cr} においては過大な内力が発生する。これを回避するには、 S_{cr} においてロボットが弾性を有すれば良い。つまり、ロボットの手先に、 S_{cr} 空間を張るよう、即ち相手機構の弾性空間の補空間を張るよう弾性を有する機構を付加すれば、過大な内力がいきい発生することのない系が機構的に実現できる (Fig. 5. 2)。

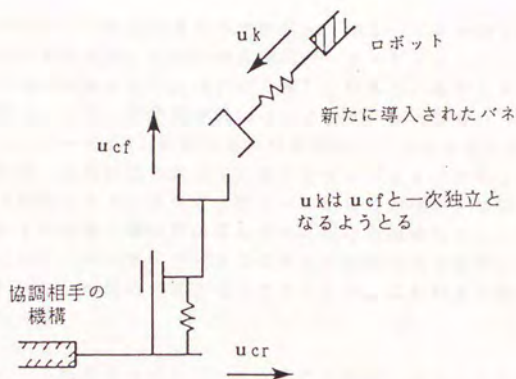
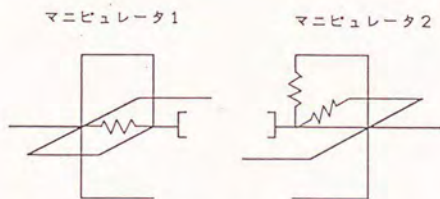
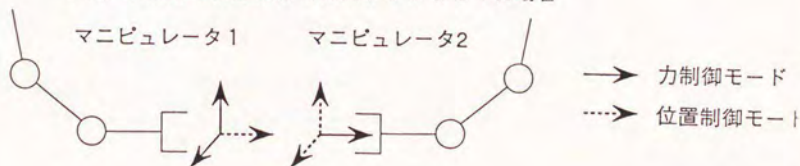


Fig. 5.2 協調相手の剛性とロボットの剛性（2次元平面の例）

弾性空間を直交するようにとった場合、本手法は[Mason 1981]に示されたハイブリッド制御を利用した協調制御手法の応用とみなすことができる (Fig. 5.3)。これは、初めに片方のマニピュレータに位置制御方向、力制御方向を割り振っておき、次のマニピュレータには、初めのマニピュレータが位置制御モードを割付けられた方向には力制御モードを、力制御モードを割付けられた方向には位置制御モードを割付けるといものである。本節の手法は、位置制御モード方向に剛体、力制御方向に弾性体を割付けることに対応する。



(a) 本手法で弾性空間を直交するようにとった場合



(b) ハイブリッド制御を利用した協調制御

Fig. 5.3 ハイブリッド制御系を利用した協調制御系との比較

この手法を2.3に示した解析結果から考察する。例として2台の6自由度マニピュレータの協調制御系を考える。低剛性部を導入するマニピュレータ1の協調相手となるマニピュレータ2が m 次元の弾性体空間を有していると、2台のマニピュレータにより構成される閉ループ系の自由度は式(2-11)より $6+m$ となる。

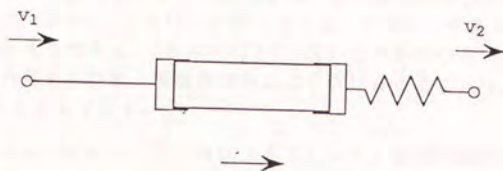
一方両方のマニピュレータをPID制御により位置制御し、しかも過大な内力を発生させないという条件は、低剛性部を含まない両方のマニピュレータの12関節を任意に固定できることと等価である。従って、閉ループ系の自由度が12以上となればよい。マニピュレータ1の先端に弾性部が導入される前の自由度は $6+m$ であるから、マニピュレータ1先端に、マニピュレータ2の弾性体空間と共通空間を持たないように $12 - (6+m) = 6-m$ 個のバネを導入すればよい。これが上で述べた手法である。

以上が産業用ロボット利用のためのシステム構成の基本であり、これにより簡単に協調システムを構成することができる。

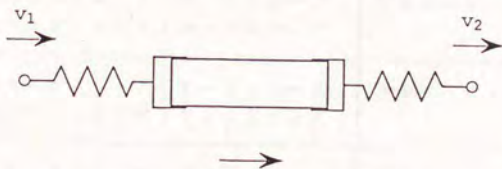
5.3 位置制御コントローラを利用した制御手法

本節では、協調を行なうそれぞれの制御系が外乱を受けずに動作することが可能であるという前提をおき、剛体と弾性体 (Fig. 5.4(a))、弾性体同士 (Fig. 5.4(b)) の協調制御手法を論じる。本論において導入されるバネの数は、産業用ロボットにとって協調相手が固いか柔らかいかによって決定される。従って、対象物の質量が非常に大きな場合、ロボットからみた相手機構の剛性は高くとも、その方向に振動が発生する可能性がある。従って、本節では弾性体同士の協調手法についても考察を行う。

3.1 においても協調手法を示したが、本節における考察は内力の制御を考慮しない点と、より現実的な機構を対象とした点が異なる。本節の手法は実現性を重視しているので、3章の動力学を考慮した手法と比較した場合の理論的な制御特性は悪い。なお、対象物はそれぞれの機構に rigid に把持されており、過大な内力が加わらない限り内力に拘束条件はないものとする。



(a) 剛体マニピュレータと弾性マニピュレータの協調



(b) 弾性マニピュレータの協調

Fig. 5.4 協調制御モデル

まず、1自由度の剛体と弾性体の協調手法を考える (Fig. 5.4(a))。マニピュレータ 1 を剛体マニピュレータ、マニピュレータ 2 を弾性マニピュレータとする。制御手法としては以下の 3 つが考えられる。

[方式 1-1] 両方のマニピュレータを、それぞれ対象物の目標値から算出される目標値に向って位置制御する。

[方式 1-2] マニピュレータ 1 を対象物の目標値に位置制御する。一方マニピュレ

タ2をバネのたわみが0となるよう位置、あるいは速度制御する。

[方式1-3] マニピュレータ2を対象物の目標値に位置制御する。一方マニピュレータ1をバネのたわみが0となるよう位置、あるいは速度制御する。

[方式1-1]の手法は、2つの機構に対してそれぞれ目標値を与えるというもので、5.2のシステム構成を行なっている限り非常に簡単な手法である。但し機構誤差が存在するとバネがたわんだ状態で位置決めがなされる。また、対象物の位置精度はマニピュレータ1の精度となる。

[方式1-2]の手法は、マニピュレータ1にのみ目標値を与えるというもので、マニピュレータ2には目標値が与えられない。[方式1-1]の手法では2つのマニピュレータを動かすための制御系と、両方の制御系に指令を送るためのホストとなる制御系が必要となるが、本手法と[方式1-3]の手法では、2つの制御系のみで実現が可能となる。本手法においても対象物の位置精度はマニピュレータ1の精度と一致する。

[方式1-3]の手法は、マニピュレータ2に目標値を与え、マニピュレータ1をマニピュレータ2に追従するよう制御するものである。この場合にも[方式1-2]と同様2つの制御系で実現ができる。[方式1-2]と異なるのは、対象物の位置精度がマニピュレータ2で与えられる点である。[方式1-2]と[方式1-3]の手法の違いは本質的にはないが、協調制御を利用する作業、機構精度等により使い分けることなどが考えられる。以上をTable. 5.1にまとめて示す。

Table. 5.1 剛体マニピュレータと弾性マニピュレータ協調手法の比較

方式	制御系の構成	精度
[1-1]	剛体マニピュレータ：オープンループ 弾性マニピュレータ：オープンループ	剛体マニピュレータ
[1-2]	剛体マニピュレータ：オープンループ 弾性マニピュレータ：フィードバック	剛体マニピュレータ
[1-3]	剛体マニピュレータ：フィードバック 弾性マニピュレータ：オープンループ	弾性マニピュレータ

次に弾性体同士の協調手法を考える(Fig. 5.4(b))。

[方式2-1] 両方のマニピュレータを、それぞれ対象物の目標値から算出される目標値に向けて位置制御する。

[方式2-2] 両方のマニピュレータを、対象物に生じる振動を制御しながらそれぞれの目標に位置制御する。

[方式2-3] 片方のマニピュレータを対象物の目標値に位置制御する。もう一方のマニピュレータをバネのたわみが0となるよう制振を行ないながら位置制御する。

[方式2-1]は[方式1-1]と全く同じ制御系を有するものである。[方式1-1]では対象物が剛体で保持されており振動は発生しないが、[方式2-1]では対象物が2つのバネにより保持されているため、振動を生じる。従って自然減衰の小さな系では極めて性能が悪い。

[方式2-2]は両方のマニピュレータにより、対象物に発生する振動を制御するものである。これに用いる制御系の構成も[方式2-1]と同じであるが、ホストのコントローラはマニピュレータ1、2のそれぞれの運動（位置、速度）と対象物の位置、速度全てを管理しながら両方のマニピュレータに指令を送らねばならない。振動制御の立場からは、2つの入力を利用できるので、本制御系は上の3つの手法の中で最も制御特性が良い。但し、2つのマニピュレータの制御特性が全く異なる場合には、制振のための指令が片方のマニピュレータにかたよってしまう可能性もある。

[方式2-3]の手法ではホストとなるコントローラは必要なく、しかも振動制御が実現できる。制御特性の異なる機構間の場合にも非常に有効である。2つの同等なマニピュレータを利用している場合には[方式2-2]と比較して制御性は悪い。

以上の3つの方式の特徴をTable. 5.2にまとめて示す。

Table. 5.2 弾性マニピュレータ同士の協調手法の比較

方式	2腕の制御系の構成	特徴
[2-1]	オープンループ、オープンループ	制御系単純、自然減衰の大きな場合適
[2-2]	フィードバック、フィードバック	同等な機構に適、制振特性が良い
[2-3]	オープンループ、フィードバック	異なる特性の機構間に適する

以上に考えられる手法と、その特徴を述べた。これらの手法ではマニピュレータが対象物からの力を受けず位置制御ができるという仮定をおいたので、2つの機構の動きにより対象物が振動することはなく、対象物から算出される目標値、あるいはバネのたわみを補正するための微小移動量をコントローラに与えること以外に制御には必要ない。これに対して弾性体同士の協調では振動制御が必要となるため、対象物の動特性を考慮した制御アルゴリズムが必要となる。

そこで本節では弾性マニピュレータ同士の協調手法の具体的な手順を示す。対象物に加える力を制御対象とするのではなく、対象物の位置を目標位置に収束させることをのみを目的とする。対象物の運動が遅く非線形項の影響がほとんどないとし、更に慣性行列も非対角成分を持たない場合、制御系は6自由度のそれぞれに対して独立に設計できる。従って以下の制御系設計では対象を1自由度系と設定する。また、位置コントローラを利用して疑似速度制御が可能であることを前提に、速度制御系を利用する。

Fig. 5.5に制御対象のモデルを示す。 x_1 はマニピュレータ1の変位、 x_2 はマニピュレータ2の変位、 x_m は対象物の変位をそれぞれ表す。対象物、マニピュレータ1、2に対する運動方程式は

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x}_m &= -(k_1 + k_2)x_m - (\lambda_1 + \lambda_2)\dot{x}_m \\
 &\quad + K_1x_1 + K_2x_2 + \lambda_1\dot{x}_1 + \lambda_2\dot{x}_2 \\
 T_1\ddot{x}_1 + \dot{x}_1 &= k_{m1}e_1 \\
 T_2\ddot{x}_2 + \dot{x}_2 &= k_{m2}e_2
 \end{aligned} \tag{5-2}$$

となる。但し、それぞれの機構のアクチュエータにはDCモータを仮定し、それぞれのモータへの印加電圧 e_1, e_2 により速度制御されるとする。モータの入力を電圧、出力を回転速度とする伝達関数が1次遅れ系で近似できるとし、 T_1, T_2 をそれぞれの系の時定数、 k_{mi} を速度/電圧比とする。これから状態方程式を求めると

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1+K_2}{M} & -\frac{\lambda_1+\lambda_2}{M} & \frac{K_1}{M} & \frac{\lambda_1}{M} & \frac{K_2}{M} & \frac{\lambda_2}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{m1}}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{m2}}{T_2} \end{bmatrix} u$$

$$= Ax + Bu \tag{5-3}$$

$$\begin{aligned}
 x &= [x_m \ \dot{x}_m \ x_1 \ \dot{x}_1 \ x_2 \ \dot{x}_2]^T \\
 u &= [e_1 \ e_2]^T
 \end{aligned}$$

となる。入力は e_1, e_2 である。

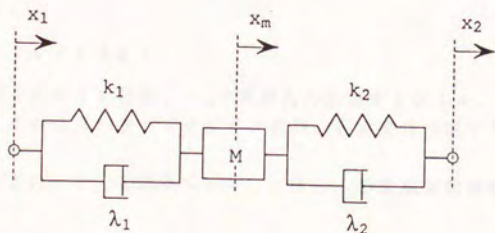


Fig. 5.5 制御対象のモデル

式(5-3)の状態方程式を基に、対象物の位置決め制御系を構成する。[方式2-2]の手法は、この2つの入力を用いて振動制御、位置制御を行なうものであり、また[方式2-3]の手法は、一方の入力電圧にのみ対象物の目標位置を含んだ指令を与え、もう一方の入力電圧は状態のフィードバックのみで作り返すという構成を取る。

両方の入力を用いて位置決めを行なう最も簡単な手法は状態フィードバックによるレギュレータを利用した手法である。

最小化したい評価関数を

$$J = \int (x^T Q_1 x + u^T Q_2 u) dt$$

とする。但し $Q_1 \in R^{6 \times 6}$ 、 $Q_2 \in R^{2 \times 2}$ はそれぞれ重み行列である。この時最適入力 u^0 は

$$u^0 = -Q_2^{-1} B^T P x$$

と表される。但し P はリッカチ方程式

$$P A + A^T P - P B Q_2^{-1} B^T P + Q_1 = 0$$

の解である。この手法は、対象物の位置決め点近傍では非常に有効であると思われるが、位置決め点から離れている場合には、極端に大きな指令値が入力される恐れがある。従って、位置決め点近傍までは両方のマニピュレータを独立に、即ち[方式2-1]の手法により搬送する、あるいは2つのマニピュレータの両者を、残留振動が発生しないような目標軌道に沿って搬送し、外乱等により発生した振動成分のみ位置決め点で制振するといった手法が考えられる。

[2-3]の手法は、片方のマニピュレータのみに目標指令を与え、もう一方のマニピュレータを、バネのたわみ等のフィードバックにより制御し、振動を抑制するというものである。これは式(5-3)の状態方程式をフィードバックにより安定化しておき、更に目標指令に対して追従が行なわれるようにフィードバックループを追加するものである。例えばマニピュレータ2をマニピュレータ1に追従させる場合は

$$e_2 = F x + f_0 e_1 \tag{5-4}$$

$$F = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6]$$

但し F はフィードバックゲイン行列、 f_0 は目標入力に対するゲイン、とし、系が安定に動作するよう、このフィードバックゲイン行列の各要素を決定すればよい。

本手法は若干修正され、6.2のクレーン、ロボットの協調制御実験において用いられる。

5. 4 まとめ

本章では、産業用ロボットの現状を考慮し、剛性行列の解析に基づいた協調制御系の構成法を示した。

まず、協調相手となる機構の剛性行列から、相手機構の剛体空間を求め、マニピュレータの剛体空間がこの空間と交わりの空間を持たないようにマニピュレータ側に弾性部を導入する。この弾性体空間が相手機構の弾性体空間と交わりを持たないようにすることで過大な内力はいっさい発生しないといった機構系が実現できる。

更に、産業用ロボットのように高い減速比を有する位置決め機構では、マニピュレータ先端に発生する外力はいっさいマニピュレータのサーボ系に伝達されないとの仮定の基に、協調制御手法を考察した。

2つの機構の弾性体空間が交わりを有する場合を想定し、2つのバネと対象物、速度制御指令を与えることのできるサーボ系を仮定し、振動制御を含めた位置決め制御系の構成を示した。

本章で示した手法を利用し、次章でクレーンとロボットの協調制御に適用する。

第6章

クレーンとロボットの 協調制御システム

第6章 クレーンとロボットの協調制御システム

目次

- 6.1 はじめに
- 6.2 クレーン、ロボット協調システムの構成
- 6.3 クレーンとロボットの協調制御による搬送
 - 6.3.1 クレーン・ロボット協調制御系の機構的特性
 - 6.3.2 制御系の設計
 - 6.3.3 制振、搬送制御実験
 - 6.3.3.1 実験システムの構成
 - 6.3.3.2 制振、搬送制御実験
 - 6.3.3.3 実験結果の考察
- 6.4 懸垂物の姿勢制御実験
 - 6.4.1 ワイヤ懸垂機構の剛性マトリックス
 - 6.4.2 クレーン、ロボット協調系の逆運動学
 - 6.4.3 姿勢制御実験
 - 6.4.3.1 実験システムの構成
 - 6.4.3.2 姿勢制御実験と考察
- 6.5 まとめ

6. 1 はじめに

建設業における柱、梁などの建設部品の組付け、射出成型用の鋳型交換作業等においては、重量が数トン～数十トンに及ぶ重量物のハンドリングが必要である。これらの部品のハンドリングには、①組付け点で待機している熟練者がクレーンで搬送されてきた重量物の揺れを止め、②重量物を保持し、③クレーン操縦者へ無線で連絡をとりながら組付け点へ誘導する、といった方法がとられている。この方法では作業者が柱や壁と懸垂物の間に挟まれる、あるいは突飛ばされるといった事故の危険が常に伴うため、自動化に対する要求は極めて高いが、現状では依然として人手に頼っており、自動化に対するメドは立っていない。

重量物ハンドリング作業には、1)数トン～数十トンの可搬重量、2)数メートル～数十メートルの可動範囲、3)数ミリメートル以下の相対位置決め精度、といった仕様が要求される。1)と2)に関する仕様を満足するにはクレーンなどのワイヤ懸垂機構の利用が不可欠となるが、単体では振動を生じやすく、3)の位置決め精度を達成することが不可能である。このため、現在の熟練者の機能を代行する小型ロボットの補助が必要である。つまり、重量物組立実現のためには重力補償、可動範囲を確保するためのクレーンと、位置決め精度を確保するためのロボットの協調システムが有力と考えられる。これまで、バラサとロボットの協調制御による重量物組立の例【松井 1982】が報告されているが、クレーンとロボットを協調させた例は非常に少ない。

クレーンのようなワイヤ懸垂機構では、ワイヤ張力により懸垂物に発生することのできる力の方向が懸垂物の位置、姿勢に依存しており、多指ハンドの操りのように自由な方向に力が発生できず、非常に複雑な制御対象となっている。本研究では、ワイヤにより懸垂された対象物を、剛性行列で表現されるバネに支持された機構と捉えることにより制御系を設計する。本研究における剛性行列は定数行列であり、懸垂物をハンドリングする際ワイヤ長が変化すると本研究のモデルは適用できないことになる。しかし現実には、クレーン側のワイヤ支点から作業空間までのワイヤ長は、作業空間の高さと比較して非常に長く、作業中のワイヤ長の変化は無視して差し支えない。

本章では、懸垂重量物のハンドリングに既存の産業用ロボットを利用可能とするためのシステム構成を示す。クレーンとロボットの協調制御実験を行ない、実作業へも十分適用が可能であることを示す。

6. 2では、クレーン、ロボット協調システムの構成を示す。重量物の質量に応じて2つのシステム構成を提案する。

まず、6. 3では、重量物の重量がロボットの発生可能な力と比較して非常に大きな場合を想定したシステム構成に基づき、クレーンとロボットの協調制御を行なう（[大隅 1987(a)], [大隅 1987(b)], [大隅 1987(c)], [太田 1987]）。クレーンを剛性行列でモデル化する場合、その剛性は懸垂物の質量に比例する。このため、数十トンといった非常に大きな懸垂物を扱う場合、ロボットから見た水平方向剛性はもはや弾性

体とはみなすことができず、ロボット側にも弾性部を導入する必要がある。そこで本システムではロボット先端に5自由度方向に弾性を有する機構を導入する([Arai 1990])。重量物の水平方向にはクレーン、ロボット両者が弾性体として存在することになるため、この方向には振動制御が必要となる。重量物を質点としてモデル化し、更に6章の結果を利用した制御系を構成し、搬送時に生じる振動制御実験を行なう。

6.4では、重量物の重量があまり大きくない場合のシステム構成に基づき、位置決め制御を行なう。この場合、水平方向剛性は弾性体とみなすことができるので、ロボット先端にワイヤ軸方向のみ弾性を有する機構を導入すればよい([大隅 1990(b)])。ロボット本体の剛性は十分大きく、剛体とみなして差し支えないので、懸垂物は全ての方向を剛体で保持されたことになり、機構的な振動は発生しない。本システムでは、懸垂物の位置、姿勢制御を行なう。このシステムにおいてロボットとクレーンにより構成される閉ループ系は機構的に冗長自由度を有するため、逆運動学解は無数に存在する。そこで、ロボットに加わる力とモーメントの重み付二乗和を最小とする解を求め、幾何学的な考察を加える。また、実験により剛性行列のモデル化の妥当性を示す。

6. 2 クレーン、ロボット協調システムの構成

クレーンにより懸垂された対象物を、1本のワイヤにより懸垂された振り子と考慮し、剛性行列と慣性行列でモデル化することにより、本研究の結果の適用が期待できる。次節以降において、剛性行列による懸垂物のモデル化を示すが、ワイヤ方向、即ち鉛直軸方向の剛性を ∞ としてモデル化する。従って、剛体としてのロボットを利用すると、ワイヤ方向には剛体同士の協調制御が行なわれることになる。剛体機構同士の協調制御においては、微小な位置誤差が過大な内力の変化を及ぼすため、機構には高い応答性が求められ、位置制御をベースとした産業用ロボットの利用は難しい。そこで、5章の結果に基づき、ロボットの先端に低剛性部を導入し、内力の過大な変化を抑制する。

次に、クレーン、ロボット協調制御システムにおけるクレーン、ロボットの役割について考える。クレーン、ロボットからなる協調システムの構成は、現状でのクレーンと人間との協調を参考としており、ロボットは人間の代りに存在する。人間の役割は6. 1に述べたように、①重量物の揺れを止める、②クレーン操縦者へ無線で連絡をとりながら組付け点へ誘導する、の2つである。①の振動抑制は協調動作に入るための準備であると考え、協調時における役割は重量物の組付け点への誘導のみと考えると、協調時における役割は重量物の組付け点への誘導のみと考えると良い。この組付け点への誘導は、1)クレーン操縦者への位置の指令、2)移動中の振動の発生防止、3)微小誤差の補正、の3つの作業からなる。1)は組付け点に設定された座標系における位置、姿勢センサとしての機能、また2)、3)はアクチュエータとしての機能に対応している。ロボットにもこの3つの役割が期待される。しかしロボットの発生することのできる力は、重さの同じ人間が発生できる力と比較して遙かに小さい。懸垂物の重量が大きいと、懸垂物の水平方向の剛性が質量に比例して大きくなるため、位置の補正に必要なトルクをロボットが発生できなくなる。このような理由により、懸垂物の重量によっては2)、3)の機能のロボットによる実現が難しい場合もある。そこで本章では、懸垂物の重量に合わせて2)、3)の機能が実現できる場合、できない場合の2種類のシステムを構成する。

6. 3では、懸垂物の質量が大きく、位置、姿勢の補正に必要なトルクをロボットが発生できない場合を考える。この場合、ロボットから見たクレーンの全ての方向を剛体空間として考えなければならず、ロボットには水平方向にも弾性部の導入が必要となる。このようにロボットがセンサとしてしか機能しないシステムで、ワイヤが1本のみ用いられている通常のクレーンを用い、姿勢の変化を得ることは不可能である。従って、懸垂物の姿勢制御は目標とせず、懸垂物を質点としてモデル化する。ワイヤを複数本利用したクレーンに関する研究もあるが([Higuchi 1988], [大隅 1989(c)], [大隅 1989(d)])実用には至っておらず、本研究では扱わない。6. 3ではロボット先端に低剛性アームを導入したシステムを構成し、搬送、振動制御実験を行なう。

6. 4ではロボットにより懸垂物の位置、姿勢の変化を達成することが可能な場合

のシステムを扱う。ロボットから見たクレーン剛性が弾性体とみなすことができる場合には、ロボット先端にワイヤ方向のみ弾性部を導入すればよい。これにより、懸垂物は全ての方向に剛体で保持され、しかもどの方向にも振動を発生することがなくなる[大隅 1990(b)]。6.4のシステムは機構的に冗長自由度となるので、ロボット手先に加わる力の2乗和を最小とする最適解を求め、位置、姿勢制御を行なう。



6. 3 クレーンとロボットの協調制御による搬送

本節では、ハンドリング対象となる懸垂物の質量が非常に大きく、ロボットから見た水平方向剛性がもはや弾性体とはみなせない場合を想定したシステムを構成する。懸垂物を質点でモデル化し、ロボット側に弾性体を導入すると、懸垂物の搬送、位置決め時に水平面内2自由度方向に振動が発生する (Fig. 6.1)。この振動を抑制する際、 x, y 方向それぞれに独立の制御系を構成することができる。本節では基礎実験として、1自由度方向のみの搬送、振動制御実験を行なう。ロボット先端にアルミの丸棒を導入しているが、棒の軸方向の剛性は極めて高いため、振動は1自由度方向にしか発生しない。この振動をクレーンのフィードバック制御により抑制する。なお、本システムではロボットはセンサ機能のみを有することになるので、導入する低剛性アームの剛性は低ければ低いほど良い。また、ロボットのダイナミクスは無視して考えることとする。

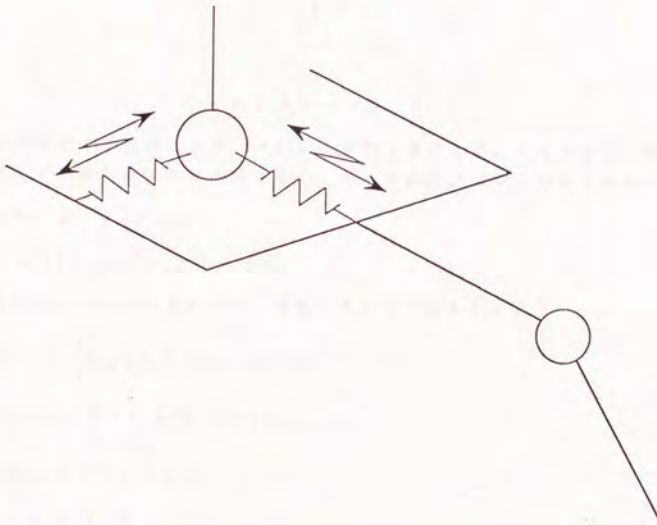


Fig. 6.1 懸垂物の振動方向

6.3.1 クレーン・ロボット協調制御系の機構的特性

本節では、1本のワイヤにより懸垂された物体を質点とみなした場合における剛性行列をラグランジュ方程式により算出する。懸垂機構のそれぞれのパラメータをFig. 6.2のように設定する。

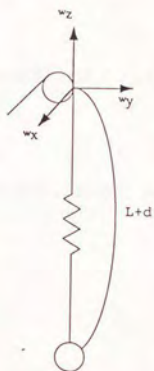


Fig. 6.2 クレーン各パラメータ

座標系原点をワイヤ支点にとり、z軸を鉛直軸上方にとる。ワイヤ引張り剛性を k_z とし、ワイヤの釣合点における長さを L 、ワイヤの釣合点からの変位を d とすると

$$x^2 + y^2 + z^2 = (L+d)^2 \quad (6-1)$$

$$\therefore z = -\sqrt{((L+d)^2 - x^2 - y^2)}$$

懸垂物のポテンシャルエネルギー P 、運動エネルギー T はそれぞれ

$$P = mgz + \frac{1}{2}k_z d^2 = P(x, y, d) \quad (6-2)$$

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) = T(x, y, d) \quad (6-3)$$

である。ラグランジアン L は

$$L = T - P = L(x, y, d) \quad (6-4)$$

であるから、x方向の力 f_x は

$$f_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} \quad (6-5)$$

となる。釣合点近傍を想定し、 $x=0, y=0, d=0$ を代入すると

$$f_x = m \ddot{x} + \frac{m g}{L} x$$

が得られる。これより、懸垂物に重力以外の外力が作用しない状態の運動方程式は

$$m \ddot{x} = - \frac{m g}{L} x \quad (6-6)$$

となる。y方向に関しても同様の結果が得られる。式(6-6)の運動はバネ定数 K_1 が

$$K_1 = \frac{m g}{L} \quad (6-7)$$

の単振動と同じとなる。また、d方向、即ちz方向における剛性も同様の手順で計算することにより

$$K_2 = k_z \quad (6-8)$$

となる。これより、剛性行列は

$$K_c = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (6-9)$$

となる。この行列は初めから対角行列となっており、x, y, z方向を直交基底としている。K₂はワイヤ引張り剛性で、K₁と比較して非常に大きな値となる。従って、クレーンの弾性空間を張る行列 V_{cf} 、剛体空間を張る行列 V_{cr} はそれぞれ

$$V_{cf} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad V_{cr} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

となる。また、懸垂物の釣合姿勢はクレーン位置に拘らず一定であるので、基準座標系から対象物に設定したクレーン座標系への姿勢変換行列 A_c は

$$A_c = I$$

である。

次にロボットの剛性行列を求める。対象物が質点モデルなので、低剛性アーム先端の姿勢は無視し、力に対する変位から剛性を計算する。低剛性アームは片持ち梁なので、その剛性行列 K_r は簡単な計算により以下のように求まる。但し座標系は棒の先端に原点を持ち、軸方向にz軸を取るものとする(Fig. 6.3)。

$$K_r = \begin{bmatrix} K_3 & & \\ & K_3 & \\ & & K_a \end{bmatrix} \quad (6-10)$$

$$K_3 = \frac{E I_z}{6 l^3}$$

K_a は丸棒の引張り剛性、 E はヤング率、 I_z は断面2次モーメント、 l はアーム長である。

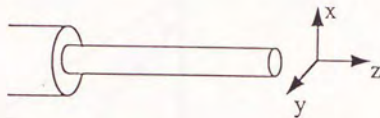


Fig. 6.3 低剛性アーム先端座標系

この剛性行列においても z 方向の剛性が K_3 と比較して非常に大きな値となるため、クレーンの場合同様、低剛性アーム先端座標系の弾性空間を張る行列 V_{cf} 、剛体空間を張る行列 V_{cr} はそれぞれ

$$V_{rf} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad V_{rr} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

となる。また、ロボットが Fig. 6.4 に示す位置関係で対象物を把持しているとする、低剛性アーム先端座標系の対象物座標系からの姿勢変換行列 A_r は

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

となる。従って対象物座標系における剛性行列 K_r は

$${}^0K_r = \begin{bmatrix} K_3 & & \\ & K_a & \\ & & K_3 \end{bmatrix} \quad (6-11)$$

と求まる。但し上付添字 o は対象物座標系による表示を表す。これから、ロボット側においては y 方向が剛体空間となり、 x, z 方向が弾性空間ということになる。本節では、両者の機構が共に弾性空間となる x 方向への搬送を対象とし、制御系を構成する。クレーン、ロボット共に x 方向を可動空間として有するので、制御系設計においては両機構を1自由度機構としてモデル化する。

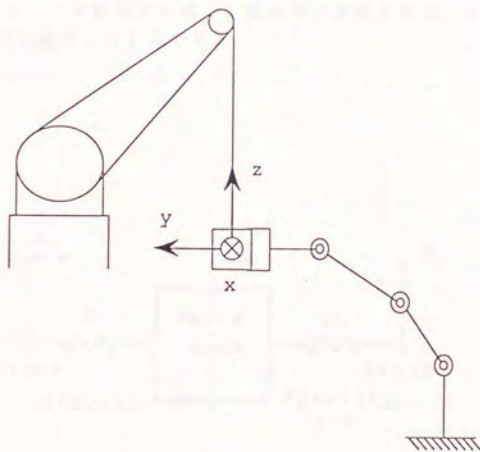
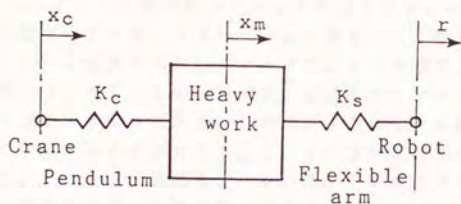


Fig.6.4 クレーンとロボットの相対位置関係

6. 3. 2 制御系の設計

前節に述べたように両方の機構を1自由度機構とみなすと、協調制御系の機構部分は、Fig. 6.5のように懸垂物が2つのばねで支持された非常に単純なモデルとすることができる。但し、振り部の等価ばね定数を K_c 、低剛性アームばね定数を K_s と置き換えてある。 M は懸垂物質量である。また x_m は対象物の位置、 r はロボットの位置、 x_c はクレーンの位置である。ロボットを等価質量 m_r 、クレーンを等価質量 m_c でモデル化する。

6. 2にも述べたように、本システムではロボットをセンサとして利用する。具体的には、ロボットを目標点に位置決めしアームのたわみを測定することにより、懸垂物と位置決め点との誤差をクレーンに知らせることができる。従って、このたわみが0となるようにクレーンを制御すれば、位置決めが達成される。なお、この形態は5章の方式[2-2]を若干修正したものである。



K_s : spring constant of flexible arm

K_c : spring constant of pendulum

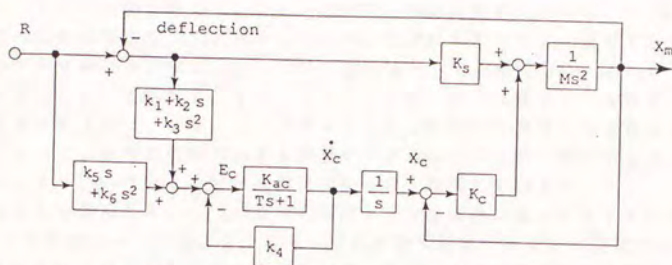
M : mass of suspended work

r : robot position

x_c : crane position

x_m : work position

Fig. 6.5 クレーン、ロボット協調モデル



- | | |
|---|--|
| k_1 : feedback gain of arm deflection | R : robot position |
| k_2 : feedback gain of velocity of arm deflection | X_c : crane position |
| k_3 : feedback gain of acceleration of arm deflection | X_m : work position |
| k_4 : feedback gain of crane velocity | K_{ac} : velocity of crane / voltage |
| k_5 : feedforward gain of velocity of robot | T : time constant of crane |
| k_6 : feedforward gain of acceleration of robot | E_c : input voltage |
| | s : differential operator |

Fig. 6.6 クレーン制御系のブロック線図

Fig. 6.6に設計したクレーン制御系のブロック線図を示す。入力をロボットの位置、出力を懸垂物の位置としている。フィードバック信号として低剛性アームの歪、歪速度、歪加速度、クレーン速度を用い、フィードフォワード信号としてロボットの目標速度、加速度を用いる。ロボットの目標速度、加速度をフィードフォワードするのは、ゼロ点の設計を可能とするためである。これに対するゲインを利用して、制御系の特性を2次系として近似することができる。これらの信号の和をクレーン速度指令 e として与えている。クレーンは低剛性アームの歪がゼロとなるように制御されるので、懸垂物の位置決め精度にロボットの精度が利用できる。式(6-12)に、ロボットの位置を入力、懸垂物の位置を出力とする制御系の伝達関数を示す。

$$G(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (6-12)$$

$$\begin{aligned} a_4 &= TM \\ a_3 &= M(K_{ac}k_4 + 1) \\ a_2 &= T(K_s + K_c) + K_{ac}K_c k_3 \\ a_1 &= (K_s + K_c)(K_{ac}k_4 + 1) + K_{ac}K_c k_2 \\ a_0 &= K_{ac}K_c k_1 \\ b_2 &= TM + K_{ac}K_c(k_3 + k_6) \\ b_1 &= K_s(K_{ac}k_4 + 1) + K_{ac}K_c(k_2 + k_5) \\ b_0 &= K_{ac}K_c k_1 \end{aligned}$$

但し、クレーン時定数を T 、クレーン速度/電圧比を K_{ac} とする。 e_c はクレーン制御系への指令電圧で、クレーンはこれにより速度制御される。使用する産業用ロボットのサーボ剛性は非常に大きいので、低剛性アームの復元力によるロボットの位置ずれは発生しないとみなす。また、クレーン本体、即ち移動テーブルはボールネジにより駆動されるので、クレーンアクチュエータとの間にも非常に大きな減速比が存在する。従って、懸垂物の振れにより移動テーブルの水平方向に発生する力もクレーンアクチュエータへはほとんど伝達されないと考え無視している。

本制御系を利用し $k_1 \sim k_6$ の 6 つの制御ゲインを適当な値に設定することで、式 (6-12) の伝達関数の 4 つの極、2 つのゼロ点が任意に決定できる。本論文では、極配置法により 6 つのゲインを決定する。その際、ロボットの動作に対して懸垂物が行過ぎを生じると、懸垂物が組付け対象と衝突するおそれがあるため、制御特性が過減衰を示すように極、ゼロ点を設計する。

6. 3. 3 制振、搬送制御実験

6. 3. 3. 1 実験システムの構成

クレーン、ロボットの協調制御による振動制御、搬送実験を行った。実験システムの外観をFig. 6. 7、Photo. 6. 1に、構成をFig. 6. 8に示す。

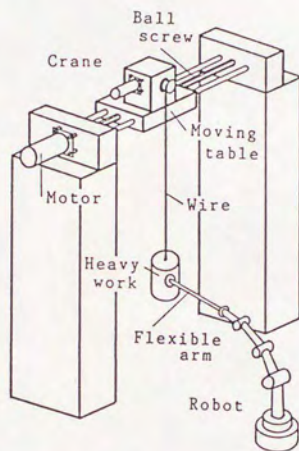


Fig. 6.7 クレーン、ロボット協調システムの外観

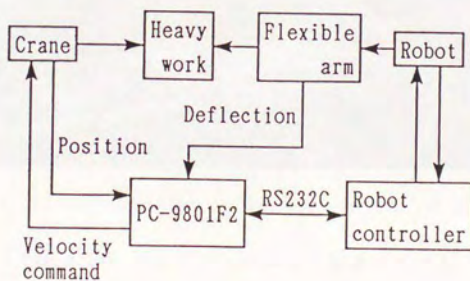


Fig. 6.8 協調システムの構成

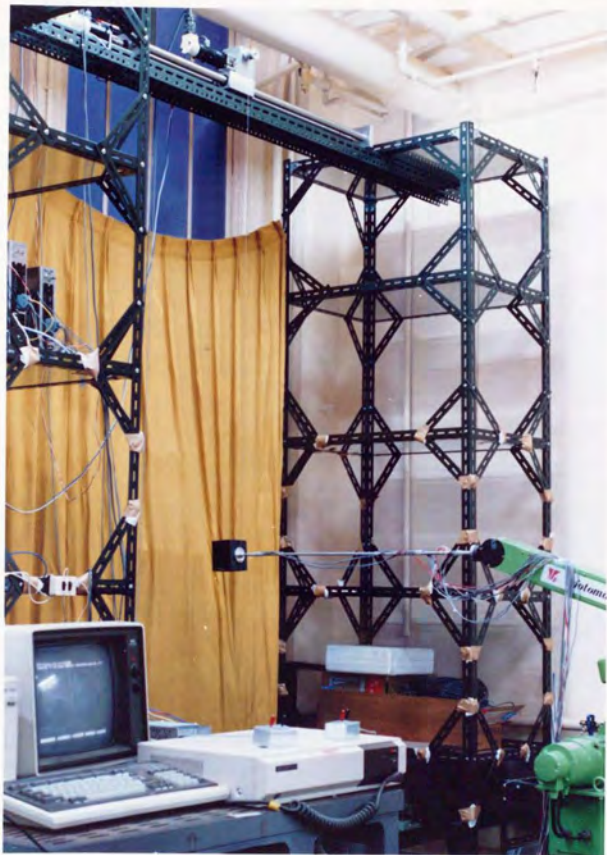


Photo. 6.1 クレーン・ロボット協調システム

制御用コンピュータにはPC-9801F2(8MHz)を使用、ロボットコントローラ、コンピュータ間はRS232C(9600baud)で接続されており、24ms毎にコンピュータからコントローラへ目標移動量が転送される。低剛性アーム上の歪ゲージの信号を12bitA/Dコンバータでコンピュータに入力することにより低剛性アーム歪が算出できる。対象物の位置 x_m はロボットの現在値と低剛性アームの歪の和として計測される。位置の分解能は $1.7 \times 10^{-3} \text{mm}$ である。クレーンはコンピュータの12bitD/Aコンバータからの電圧指令により速度制御される。制御サンプリング周期は24msである。以下にシステム各部の特性を示す。

1) ロボット、ロボットコントローラ

ロボットには安川電機製5自由度多関節型ロボットMOTOMAN L3を使用。可搬重量3kgである。外形、寸法をFig. 6.9に示す。

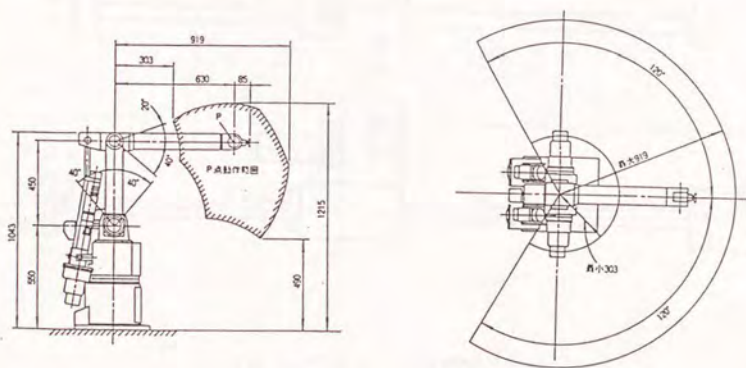


Fig. 6.9 産業用ロボット(安川電機:Motoman-L3)

ロボットコントローラにはYASNAC RXを使用している。RS232Cによりコンピュータと接続され、24ms毎に各関節の目標移動量、現在位置等が通信できる。

2) クレーン

クレーンは並進とワイヤ送りの2自由度を有しており、並進方向にはボールネジで駆動される。ボールネジのリードは10mmとなっている。また、エンコーダの1回転当りのパルス数は200なので、最小送り量は $50\mu\text{m}$ である。ワイヤ送り方向には減速比20のウォームホイールと、1周100mmのプーリが利用されている。ワイヤ送り方向のエンコーダも200パルスであり、最小送りは $25\mu\text{m}$ である。利用したモータは山洋電気製で並進方向がR720、ワイヤ送り方向がR510である。R510の仕様は4章に記載したので、R720とサーボバックのみTable. 6.1に示す。最大速度は並進方向500mm/s、ワイヤ送り方向250mm/sである。但し実験ではワイヤ送り方向の制御は行っていない。

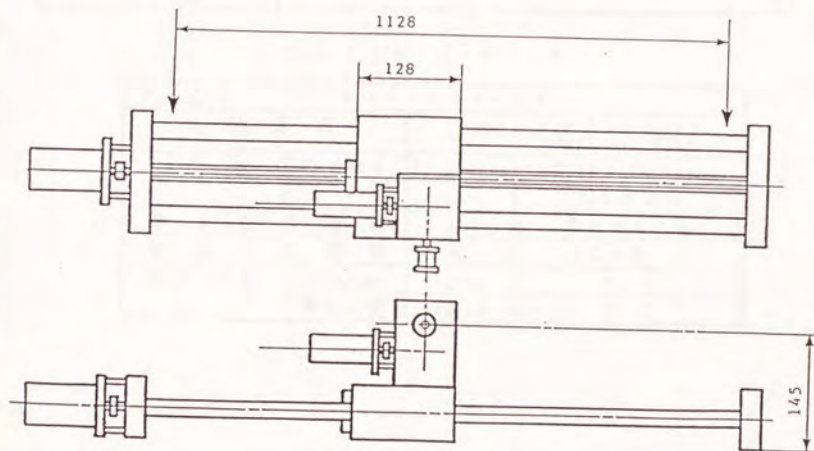


Fig. 6.10 クレーンの外形

Table 6.1(a) モータの仕様

形 式		R 5 1 1 T - 0 0 2		
項 目	記号	単位	定 格	
定 格 出 力	P r	W	1 1 0	
定 格 ト ル ク	T r	kg-cm	3 . 5	
定 格 速 度	N r	RPM	3 0 0 0	
ト ル ク 定 数	K t	kgcm/A	1 . 9 3 ± 1 0 %	
誘起電圧定数	K e	V/Krpm	1 9 . 7 6 ± 1 0 %	
ロータイナーシャ	J m	GRCMS ²	0 . 3 8	
電機子抵抗	R a	Ω	4 . 9 1	
重 量	W	K g	1 . 3 4	
エンコード パルス数		P / R	2 0 0	

Table 6.1(b) サーボバック

形 式		P D T - A 0 3 - 2 0	
速 度 帰 還		タコジェネレータ (7V+2V-0V/1000rpm)	
入 力	指令電圧	V/1000rpm	DC3V / 1000rpm
	インピーダンス	K Ω	約 1 0 K Ω
最 大 出 力 電 圧		V	D C ± 1 3 0
定 格 出 力 電 流		A	D C ± 2 . 1
定 格 ト ル ク	1000rpm	kg-cm	3 . 3
	最高速度	kg-cm	3 . 3

Fig. 6.11にモータへのステップ入力（印加電圧）に対する移動テーブルの応答を示す。

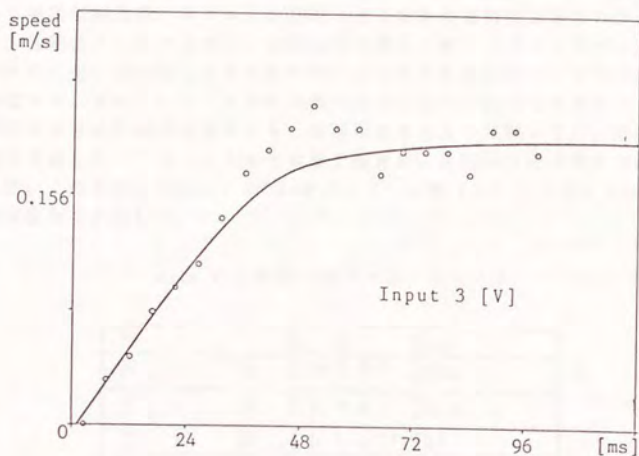


Fig. 6.11 移動テーブルの送り方向のステップ応答

この応答から、移動テーブルの送り方向に対する応答を1次遅れ系で近似する。モータへの印加電圧を入力とし、移動テーブルの移動速度を出力としたときの伝達関数は式(6-13)となる。

$$G(s) = \frac{0.058}{0.010s + 1} \quad (6-13)$$

3) 低剛性アーム

低剛性アームにはアルミの丸棒を使用。直径10mm、長さ1000mmである。先端のバネ定数は115N/mである。アーム上に歪ゲージが貼付してあり、先端の変位が測定できる。

6. 3. 3. 2 制振、搬送制御実験

システムの各パラメータはTable. 6.2の通りである。Kcは懸垂物の振動周期と質量から、Ksはアーム先端に加える力と歪の測定から算出した。ロボットを固定した状態における振動制御実験、ロボットを移動させた場合の協調制御実験の2通りの実験を行った。低剛性アームの歪速度、歪加速度の算出にはサンプリングデータの差分を利用するため、歪、歪速度、歪加速度の間には位相ずれが存在し、これが制御特性に大きく影響する。また、クレーン速度の最大値は $5.0 \times 10^{-1} \text{m/s}$ で飽和するため、応答の速い制御特性を示す極を設定しても、実現可能であるとは限らない。従って、これらの影響を考慮したシミュレーション結果を参考に、最終的な伝達関数の極、ゼロ点を決定した。このため、Table. 6.3に示すように、実験(1)、(2)ではそれぞれ異なる極が設定されている。

Table 6.2 実験システム各パラメータ

M	3.9	[kg]
K_s	1.0×10^2	[N/m]
K_c	2.3×10	[N/m]
T	2.6×10^{-2}	[s]
K_{ac}	5.2×10^{-2}	[m/sec/V]

Table 6.3 設定した閉ループ系極

	(a) exp.1	(b) exp.2
p1	$-1.7 + 1.6j$	-4.0
p2	$-1.7 - 1.6j$	-4.0
p3	$-6.3 + 4.4j$	-8.0
p4	$-6.3 - 4.4j$	-8.0
z1	...	-4.0
z2	...	-8.0

p1~4: pole, z1~2: zero

(1) 制振実験

ロボットを固定した状態で懸垂物を加振し、制振実験を行った。懸垂物を自由振動させた時の低剛性アームの歪をFig.6.12に示す。懸垂物の固有振動周期は約1.3秒で減衰はほとんどない。この値はTable 6.2のパラメータを用いた場合の理論値1.1秒と若干異なるが、これは本来分布定数系としてモデル化されるべき低剛性アームにばねモデルを利用したことによる。なお、懸垂物が振動することにより低剛性アームに振れが生じるが、振れ量は片振幅10cmの振動が生じた時最大で3°程度と小さいので、この影響は無視している。設定した極はTable 6.3(a)の通りである。ロボットは停止しているので、フィードフォワード指令は0である。懸垂物の初期振幅として6.0x10mmを与えた。Fig.6.13にシミュレーション結果と実験結果を示す。両者の結果はかなりよく一致しており、モデル化の妥当性が検証できる。シミュレーションで生じている微小振動が実験で観測されていないのは、低剛性アームの根元歪ゲージを利用して対象物の位置を測定していることにより、高周波成分がカットされているためであると考えられる。制御開始後、懸垂物の振動は振動周期1.3秒の約4倍に当たる5秒程度ではほぼ減衰しており、制御効果は十分であるといえる。更に、設計したフィードバックゲインの妥当性も確認できる。

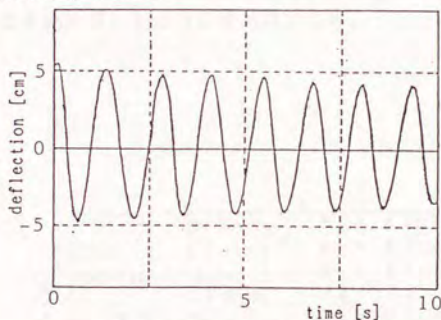


Fig. 6.12 懸垂物の自由振動

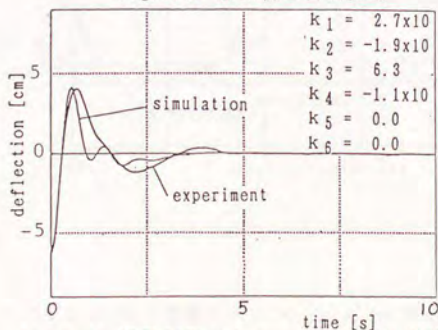


Fig. 6.13 振動制御シミュレーションと実験結果

(2) 搬送実験

ロボットを一定の速度で作動させ、クレーンとの協調制御を行った。ロボットの速度を入力、アームのたわみ量を出力とする伝達関数を算出し、その定常応答を求めると、ロボットが一定速度 v で動作する時、懸垂物の遅れにより生じるアームのたわみ量が式(6-14)で求まることがわかる。

$$d = \left(\frac{k_4 - k_5}{k_1} + \frac{1}{K_{ac} k_1} \right) v \quad (6-14)$$

この値ができるだけ小さく、しかもロボットに対して懸垂物の行過ぎが生じないような極を決定することが必要である。この実験において設定した極、ゼロ点はTable. 6. 3(b)の通りである。Fig. 6. 14にシミュレーション結果、実験結果を示す。ロボットは $1.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ の速度でクレーン可動範囲直下を $4.0 \times 10^{-1} \text{ m}$ だけ移動する。この場合の搬送中の低剛性アームの定常歪は式(6-14)より $3.8 \times 10^{-2} \text{ m}$ となる。シミュレーション結果と比較して実験結果では、モデル誤差の影響により、ロボットの停止時に微小な振動が生じているが、搬送中のたわみ量は理論値とほぼ一致しており、フィードフォワード項が有効に作用していることが確認できる。停止後の行過ぎもほとんど生じておらず、壁際への位置決め等にも十分利用可能である。

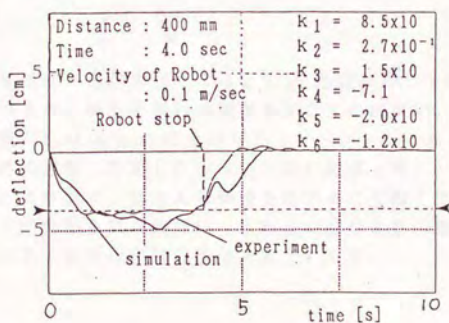


Fig. 6.14 搬送制御シミュレーションと実験結果

6. 3. 3. 3 実験結果の考察

以上の実験結果を基に、重量物ハンドリングへの適用可能性についての考察を行う。

(1) 制振実験結果に関する考察

本制御系は、ロボットに掴まれた懸垂物の制御を振り子側のばね（等価ばね定数 K_c ）を介して行う。試作システムにおいては、 $K_c = 2.3 \times 10^4 \text{ N/m}$ であるのに対して低剛性アームのばね定数 $K_s = 1.0 \times 10^4 \text{ N/m}$ である。そのため、懸垂物の振動周期 $t = 1.1$ 秒は振り子単独の固有周期 $t_0 = 2.7$ 秒と比べてかなり短い。すなわち、柔らかいばねを介して、周波数の高い振動の制御を行っているといえる。このため、クレーンには速い動作が求められる。これにより、制振実験におけるクレーン速度指令電圧は飽和を生じている (Fig. 6.15)。

次に、建設現場を想定し、 M/L (L はワイヤ長) が非常に大きい場合を想定する。 K_c は

$$K_c = \frac{Mg}{L} \quad (6-15)$$

で算出できる。但し g は重力加速度である。この式からわかるように、 M/L が大きくなると、 K_c も M/L に比例して増加する。従って、試作システムより固いばねを介して制御を行えると理解できる。例えば質量 4 ton、ワイヤ長 30m の現場では、試作システムと比べて K_c は 60 倍となり、 K_s のおよそ 1.4 倍の値をとる。これを振動周期の側から見ると、ロボットに掴まれた懸垂物の振動周期 t は、

$$t = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{K_c}{M} + \frac{K_s}{M}\right)}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{g}{L} + \frac{K_s}{M}\right)}} \quad (6-16)$$

であり、懸垂物の質量 M/L が大きくなると K_s の影響が減じて振り子の振動周期 $t_0 = 2.7$ s に近づく。つまり、振り子単独の制御を想定すれば良い。

Fig. 6.16 に、質量が $1.0 \times 10^3 \text{ kg}$ の場合のシミュレーションによる応答と指令電圧を示す。但し質量以外の定数、設定した極は全て制振実験と等しい。アームの歪は、実験 (1) に比べて、より早く、ほとんど振動を生じること無く制振されており、しかもクレーン指令電圧の飽和も見られない。これらの結果より、懸垂物の質量が増大した場合にも、本制御系は有効に利用可能であるといえる。

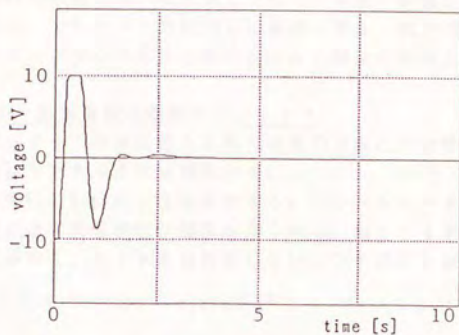


Fig. 6.15 クレーンへの指令電圧

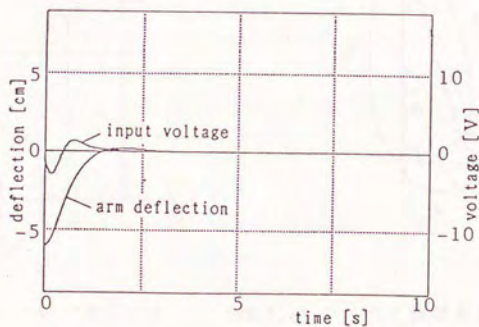


Fig. 6.16 振動制御シミュレーション(懸垂物質量1000kgの場合)

(2) 搬送実験結果に関する考察

大型重量物の搬送に適用した場合を考える。クレーンによる懸垂物の制御特性は、考察の(1)に述べた理由により、懸垂物の質量が増大しても悪くなることはない。また低剛性アームのたわみ量も式(6-14)から分るように質量には依存しない。従って、本システム構成は大型重量物の搬送制御にもそのまま適用が可能である。

6. 4 懸垂物の姿勢制御

本節では懸垂物の剛性行列が弾性体とみなせる場合の重量物ハンドリングシステムを構成する。クレーンをワイヤ方向のみに剛体と考え、残りの方向には弾性を有すると考える。従って、ロボットにはz軸方向のみに弾性部を導入する。

6. 4. 1 ワイヤ懸垂機構の剛性マトリックス

次に、1本のワイヤで懸垂状態とされた重量物の重心に設定された座標系に対し、釣合点近傍の剛性マトリックスを算出する。

各パラメータをFig. 6. 17のように設定する。このパラメータを利用すると、Fig. 6. 18から式(6-17)に示す幾何学的な関係が得られる。但しワイヤ引張り方向に関してはワイヤを剛体とみなし、ワイヤ長は変化しないという仮定をおいている。

$$z = d_1 \cos \theta + \sqrt{(L_1^2 - (x - d_1 \sin \theta)^2)} \quad (6-17)$$

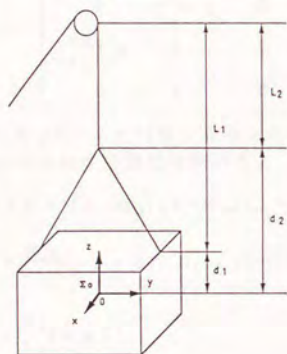


Fig. 6.17 クレーンパラメータ

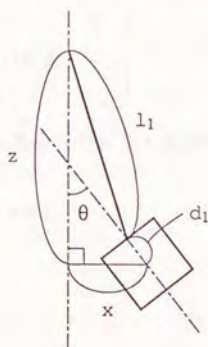


Fig. 6.18 ワイヤと座標系の幾何的關係

この時ポテンシャルエネルギーPは

$$P = m g z + \frac{1}{2} K_w \phi^2$$

として与えられる。但し K_w はワイヤの振れ剛性を表す。従ってx方向に関する剛性行列は

$$K_x = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$$

また、y 軸回りの振り剛性は

$$K_b = \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2}$$

を、x 軸並進方向と y 軸回りの回転の干渉項は

$$K_{xb} = \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial \theta}$$

をそれぞれ計算し、 $x=y=\phi=\theta=\dot{\phi}=\dot{\theta}=0$ を代入することにより求めることができる。この結果、剛性マトリックスは式(6-18)のように算出できる。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} m g & 0 & 0 & 0 & \frac{d_1}{L_1} m g & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} m g & 0 & -\frac{d_2}{L_2} m g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{d_2}{L_2} m g & 0 & \frac{d_2}{L_2} (L_2 + d_2) m g & 0 & 0 \\ \frac{d_1}{L_1} m g & 0 & 0 & 0 & \frac{d_1}{L_1} (L_1 + d_1) m g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_w \end{bmatrix} \quad (6-18)$$

但し K_z はワイヤ引張り剛性である。この剛性行列を直交行列により対角化する。この行列の特性方程式を求めると

$$F(\lambda) = (\lambda - K_z)(\lambda - K_w)(\lambda^2 - a\lambda + b)(\lambda^2 - c\lambda + d) \quad (6-19)$$

$$a = \frac{m g}{L_1} \{ 1 + d_1(L_1 + d_1) \}$$

$$b = \frac{d_1}{L_1} (m g)^2$$

$$c = \frac{m g}{L_2} \{ 1 + d_2(L_2 + d_2) \}$$

$$d = \frac{d_2}{L_2} (m g)^2$$

となる。(6-19)を λ について解くことにより、式(6-20)の6つの固有値が求まる。

$$\lambda_1 = K_z \quad (6-20)$$

$$\lambda_2 = K_w$$

$$\lambda_{3,4} = \frac{m g}{2 L_1} \{ p_1 \pm \sqrt{p_1^2 - 4 L_1 d_1} \}$$

$$\lambda_{5,6} = \frac{mg}{2L_2} \{ p_2 \pm \sqrt{(p_2^2 - 4L_2d_2)} \}$$

$$p_1 = 1 + d_1(d_1 + L_1)$$

$$p_2 = 1 + d_2(d_2 + L_2)$$

次にそれぞれの固有値に対応した固有ベクトルを求める。

$$\begin{aligned} \lambda_1: \mathbf{u}_1 &= [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \lambda_2: \mathbf{u}_2 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ \lambda_3: \mathbf{u}_3 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ q_1 \ 0]^T \\ \lambda_4: \mathbf{u}_4 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ q_2 \ 0]^T \\ \lambda_5: \mathbf{u}_5 &= [0 \ 1 \ 0 \ r_1 \ 0 \ 0]^T \\ \lambda_6: \mathbf{u}_6 &= [0 \ 1 \ 0 \ r_2 \ 0 \ 0]^T \end{aligned} \quad (6-21)$$

$$q_{1,2} = \frac{1}{2d_1} \{ p_1 \pm \sqrt{(p_1^2 - 4L_1d_1)} \}$$

$$r_{1,2} = \frac{1}{2d_2} \{ p_2 \pm \sqrt{(p_2^2 - 4L_2d_2)} \}$$

式(6-21)より、6次元空間の基底は、z軸並進方向の空間 S_1 、z軸回りの回転 S_2 、x軸並進方向とy軸回りの回転の2次元空間 S_3 、y軸並進方向とx軸回りの回転の2次元空間 S_4 に分類することができる。また、これらの4つの部分空間はそれぞれ直交している。

S_1 に対する剛性はワイヤ引張り剛性で非常に大きく、 S_2 に対する剛性はワイヤ振れ剛性で非常に小さい値である。 S_3 、 S_4 に対する剛性は懸垂物のポテンシャルエネルギーの変化によって生じる力、モーメントと変位の関係から導かれる等価剛性であり、並進成分と回転成分が干渉する。通常の振り子振動はこの S_3 と S_4 に生じる。本章の実験では、 S_1 のみ剛体空間とみなし、残りの5次元空間を弾性空間とする。

6. 4. 2 クレーン、ロボット協調系の逆運動学

本システムでは懸垂物に振動が発生せず、しかもクレーン、ロボットの間に相対的な位置誤差が生じても過大な内力は作用しない。従って、クレーン、ロボットはそれぞれの目標値に独立に位置制御される。もし、重量物の目標位置、姿勢がそれぞれの機構で達成できる値であれば、クレーン、ロボットの弾性部ともにたわみを0とすることができる。6. 3のシステムではクレーン、ロボットともに3自由度を有しており、しかも対象物に与えられる目標値もこの3自由度の空間内のものであったので、クレーンとロボットの位置が同じとなるようクレーンを制御することで、弾性方向全てのたわみを0とすることが可能であった。これに対して懸垂物の姿勢を含めた6自由度を制御しようとする、クレーン側が3自由度しか有していないため、目標姿勢によってはたわみを0とすることが不可能となる。そこで、目標位置、姿勢を達成する際発生する内力の重み付2乗和が最も小さくなるよう、クレーンとロボットの目標位置を決定する。

クレーンを3自由度、ロボットを6自由度とし、ロボットに低剛性部を導入すると、系の自由度は2章の結果より9となる。従って、対象物の目標位置、姿勢を決定しても3つの自由度が残る。この3つの自由度としては、クレーンのx, y座標、ロボット側の弾性部のたわみの等価関節値 p_r を考えるのが分りやすい。これらの座標は全てバネのたわみと単純な関係となっているからである。従って内力の2乗和が最小となるよう、この3つの値を決定すればよい。

対象物の目標釣合点における座標を

$$x_d = [x_d \ y_d \ z_d \ \phi_d \ \theta_d \ \phi_d]^T$$

とする。但し、姿勢を表す3つのパラメータはそれぞれx y z軸回りの微小回転角とする。また、懸垂物が外力を受けずに釣り合う時の対象物座標系における位置、姿勢をクレーン座標系とし、その位置、姿勢を

$$x_c = [x_c \ y_c \ z_c \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

とする。更に、ロボット先端の座標系を

$$x_r = [x_r \ y_r \ z_r \ \phi_r \ \theta_r \ \phi_r]^T$$

とする。それぞれの機構が剛体として存在する空間の対象物座標系における座標は対象物の目標座標と同じであるから、

$$\begin{aligned} z_c &= z_d \\ x_r &= -\theta_d p_r \\ y_r &= \phi_d p_r \\ z_r &= -p_r \\ \phi_r &= \phi_d \\ \theta_r &= \theta_d \\ \phi_r &= \phi_d \end{aligned} \quad (6-22)$$

である。但し上付添字oは対象物座標系表示を表す。これよりクレーン、ロボットが

$$\begin{aligned} x_c &= [x_c \ y_c \ z_d \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ x_r &= [-\theta_d \ p_r \ \phi_d \ p_r - p_r \ \phi_d \ \theta_d \ \phi_d]^T \end{aligned}$$

の値をとった時の内力を x_c, y_c, p_r の関数として求め、内力を最小とする x_c, y_c, p_r を決定すればよい。クレーン剛性行列で表されたバネにより発生する内力 f_c は式(6-19)を用いると

$$f_c = K_c \Delta x_c \quad (6-23)$$

$$\begin{aligned} f_c &= [f_{cx} \ f_{cy} \ f_{cz} \ m_{cx} \ m_{cy} \ m_{cz}]^T \\ \Delta x_c &= [x_c - x_d \ y_c - y_d \ 0 \ -\phi_d \ -\theta_d \ -\phi_d]^T \end{aligned}$$

と表される。また、ロボット側のバネのたわみにより発生する内力 f_r は

$$f_r = A_r K_r V_r f_p \quad (6-24)$$

と表わされる。但し

$$\begin{aligned} A_r &= \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \\ R_r &= \begin{bmatrix} 1 & -\phi_d & \theta_d \\ \phi_d & 1 & -\phi_d \\ -\theta_d & \phi_d & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$V_r f_p = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$K_r = \text{diag}(0 \ 0 \ k_r \ 0 \ 0 \ 0)$$

である。 K_r に姿勢変換の行列がかかるのは、剛性行列が対象物座標系（ロボット先端座標系と同じ）に定義されているためである。

さて、 f_r は目標位置、姿勢にかかわらず

$$p_r = 0 \quad (6-25)$$

とすることで0にできる。従って x_c, y_c 2つの値の算出のみを示す。式(6-23)より

$$\begin{aligned} f_{cx} &= \frac{m g}{L_1} (x_c - x_d) - \frac{d_1}{L_1} m g \theta_d \\ f_{cy} &= \frac{m g}{L_2} (y_c - y_d) - \frac{d_2}{L_2} m g \phi_d \\ f_{cz} &= 0 \\ m_{cx} &= -\frac{d_2}{L_2} m g (y_c - y_d) - \frac{d_2}{L_2} (L_2 + d_2) m g \phi_d \end{aligned}$$

$$m_{cy} = \frac{d_1}{L_1} m g (x_c - x_d) - \frac{d_1}{L_1} (L_1 + d_1) m g \theta_d$$

$$m_{cz} = -K_w \phi_d$$

が得られる。ここで評価関数として力ベクトルの重み付2乗和を用い、これが最小となる最適解を求める。評価関数PIは

$$PI = \mathbf{f}_c^T \mathbf{W}_c \mathbf{f}_c \quad (6-26)$$

$$\mathbf{W}_c = \text{diag}(w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5)$$

で、これを計算すると

$$\begin{aligned} PI &= w_1 f_{cx}^2 + w_2 f_{cy}^2 + w_3 m_{cx}^2 + w_4 m_{cy}^2 + w_5 m_{cz}^2 \\ &= (w_1 + w_4 d_1^2) \alpha_1^2 X^2 - 2 d_1 (w_1 + w_4 d_1 (L_1 + d_1)) \alpha_1^2 \theta_d X \\ &\quad + (w_2 + w_3 d_2^2) \alpha_2^2 Y^2 + 2 d_2 (w_2 + w_3 d_2 (L_2 + d_2)) \alpha_2^2 \phi_d Y \\ &\quad + d_1^2 (w_1 + w_4 (L_1 + d_1)^2) \alpha_1^2 \theta_d^2 + d_2^2 (w_2 + w_3 (L_2 + d_2)^2) \alpha_2^2 \phi_d^2 \end{aligned} \quad (6-27)$$

$$X = x_c - x_d$$

$$Y = y_c - y_d$$

$$\alpha_1 = \frac{m g}{L_1}$$

$$\alpha_2 = \frac{m g}{L_2}$$

となる。(6-27)はX、Yそれぞれの2次式の和となっているので、これより簡単に最適解を得ることができる。

$$x_c = x_d + \frac{d_1 (w_1 + w_4 d_1 (L_1 + d_1)) \theta_d}{w_1 + w_4 d_1^2} \quad (6-28)$$

$$y_c = y_d - \frac{d_2 (w_2 + w_3 d_2 (L_2 + d_2)) \phi_d}{w_2 + w_3 d_2^2} \quad (6-29)$$

式(6-22)、(6-25)、(6-28)、(6-29)より、ロボット、クレーンの最適解を得ることができた。

例えば、 $w_1 = 0$ 、 $w_4 = 1$ の時には、

$$x_c = x_d + (L_1 + d_1) \theta_d \quad (6-30)$$

また、 $w_1 = 1$ 、 $w_4 = 0$ の時には、

$$x_c = x_d + d_1 \theta_d \quad (6-31)$$

となる。これを幾何学的に考察するとFig. 6.19(a)、(b)となり、(a)の場合には傾けた

懸垂物の重心をワイヤが通る位置が、また(b)の場合には傾けた懸垂物のワイヤ支点の鉛直上方となる。これは力の釣合を考慮すると当然の結果といえる。また、 y 方向についても全く同じ関係が得られる。

$$w_2 = 0, w_3 = 1 : y_c = y_d - (L_2 + d_2) \phi_d$$

$$w_2 = 1, w_3 = 0 : y_c = y_d - d_2 \phi_d$$

クレーンを位置制御する場合には、与えられた θ_d 、 ϕ_d に従って、目標位置を計算すればよい。

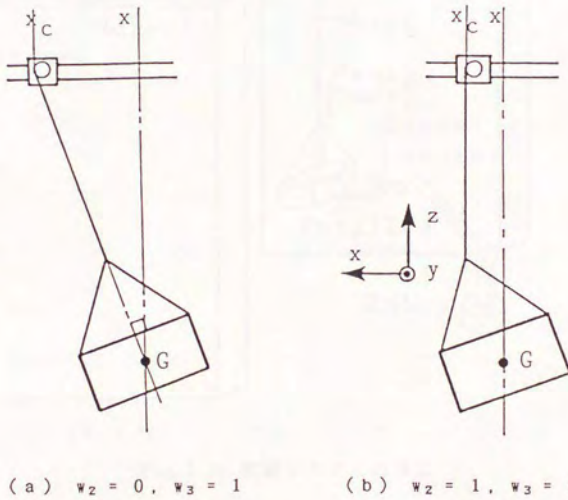


Fig. 6.19 クレーン位置の最適解

6. 4. 3 姿勢制御実験

6. 4. 3. 1 実験システムの構成

Fig. 6. 20に、本研究で試作した重量物組立システムの概観を示す。

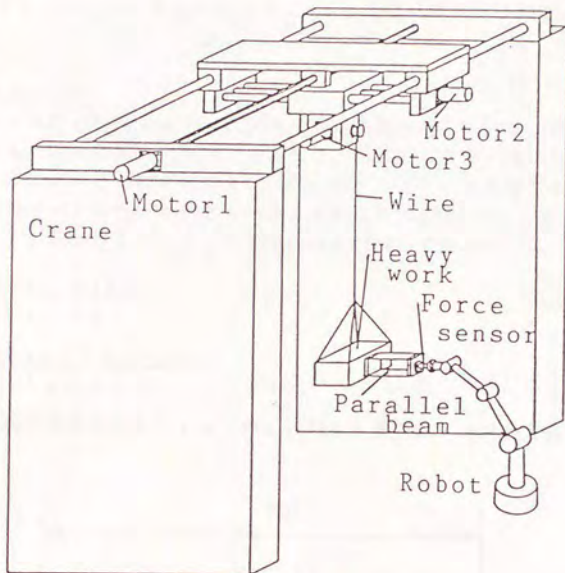


Fig. 6. 20 実験システムの構成

クレーンはボールネジにより駆動されるx yテーブルと、ウォームホイールを利用したワイヤ送り機構の3自由度を有している。クレーンの高さは2.5mである。

ロボットには前項同様に安川電機製Motoman-L3を使用しているが、本節では位置決め点において固定している。ロボットの先端には5軸の力センサと、鉛直方向に低剛性アームとして平行板バネ構造が付加されている。

重量物はクレーンのワイヤにより懸垂されており、更に予め低剛性アームに固定されている。なお、重量物の質量は8.9kgである。

コンピュータにはEPSON社製コンピュータPC-386V(20MHz, 80387使用)を用いている。力センサからの出力電圧は12bit A/Dコンバータによりコンピュータへ入力される。

1) クレーン

クレーンは3自由度を有しており、x y方向はボールネジで駆動される。x方向、y方向のボールネジのリードはそれぞれ10mm、8mmとなっている。また、エンコーダは両方向共に1回転200pulseとなっている。モータにはx方向に山洋電気製R720、y方向、ワイヤ送り方向にR510を使用。仕様は4章、前項に記載。最大速度はx方向500mm/s、y方向400mm/sである。また、最小送り量はx方向50 μ m、y方向40 μ m、ワイヤ送り方向25 μ mである。クレーンには速度制御用のコントローラが利用されており、12bitDAコンバータを介してコンピュータから送られてくる電圧により速度制御される。

2) 5軸力センサ

力センサはFig. 6. 21のように、アルミの丸棒を利用している。長さは50mmで、直径12mmである。剛性は 3.4×10^6 N/mであるので、剛体とみなす。棒には歪ゲージが貼付しており、これによりそれぞれの場所におけるモーメントが測定できる。Fig. 6. 21のそれぞれの歪ゲージの出力電圧とモーメントの比を k_i とすると、出力電圧とx y方向の力、x y z軸回りのモーメントの関係は式(6-32)で表される。

$$F = \frac{k_2 u_2 - k_1 u_1}{L_2 - L_1}$$

$$M = \frac{k_2 L_2 u_2 - k_1 L_1 u_1}{L_2 - L_1} \quad (6-32)$$

また、振れ方向のモーメントは、Fig. 6. 21の3番の歪ゲージ出力に比例する。

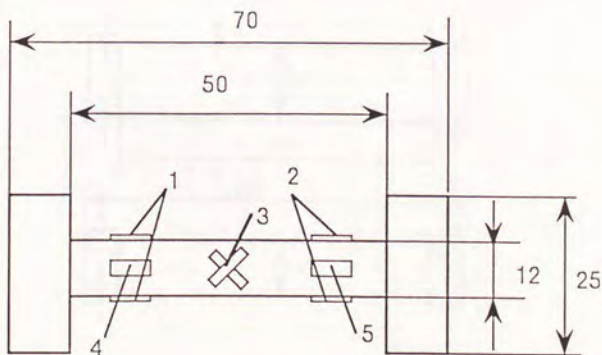


Fig. 6. 21 歪ゲージの図



Photo. 6.2 カセンサ

3) 平行板バネ

平行板バネには1mm厚のアルミ板を使用した。外形をFig.6.22に示す。バネ定数は $2.0 \times 10^3 \text{N/m}$ である。

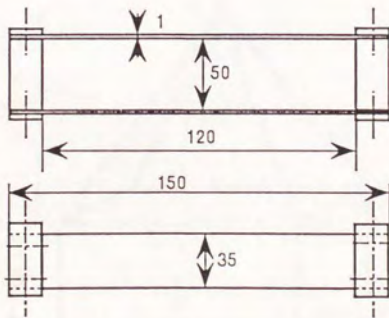


Fig. 6.22 平行板バネ

平行板バネと力センサはロボット手先にPhoto. 6.3のように結合されている。

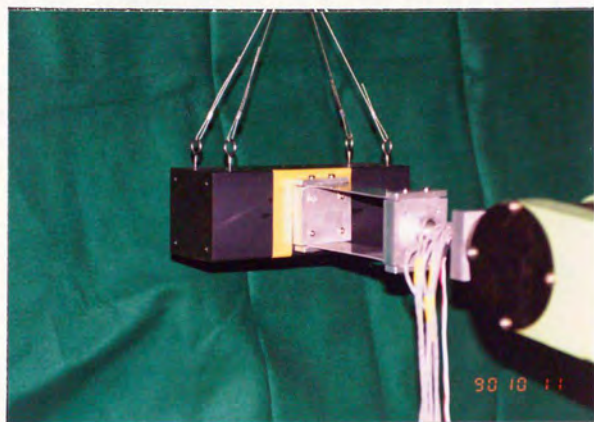


Photo. 6.3 カセンサと平行板バネ

4) 重量物

重量物には鉄のブロックを用いる。寸法は75mmx75mmx200mm、質量は8.8kgである。重量物を懸垂するワイヤとの幾何学的関係をFig. 6.23に示す。

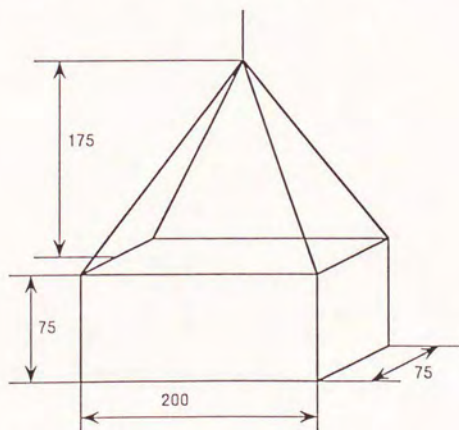


Fig. 6.23 懸垂物とワイヤの幾何学的関係

5) コンピュータ、カウンタ、ADC、DAC

使用したカウンタ、ADコンバータ、DAコンバータの機種を示す。カウンタは25bit、ADコンバータ、DAコンバータはそれぞれ12bitである。

- ・コンピュータ : PC-386V (20MHz, 80387使用)
- ・D/Aコンバータ : 12bit 4ch D/A変換ボードDA12-4(98) (コンテック)
- ・A/Dコンバータ : 12bit 16ch A/D変換ボードAD12-16TA(98) (コンテック)
- ・カウンタ : 24bit 4ch プログラマブルカウンタCNT24-4A(98) (コンテック)

6. 4. 3. 2 姿勢制御実験と考察

本節では、前節で示したクレーンの剛性行列としてのモデル化の妥当性、力配分法の正当性を、クレーンの姿勢制御実験により検証する。位置制御をベースとした産業用ロボットを利用しても、剛性行列に基づいた機構の工夫、即ち特定方向に弾性部を導入することにより、ロボットに位置誤差が生じても過大な内力を発生しない。このような弾性部の導入された協調システムにおいて、本論文で提案した制御則を利用することにより作業が実現できることを証明する。

実験ではx方向のみにクレーンを移動させ、x方向の力 f_{rx} と、y軸回りのモーメント m_{ry} のみを測定した。各パラメータは以下の通りである。

$$L_1 = 0.9 \text{ [m]} \quad d_1 = 0.25 \text{ [m]}$$

$$L_2 = 0.9 \text{ [m]} \quad d_2 = 0.25 \text{ [m]}$$

$$m = 8.9 \text{ [kg]}$$

これらの値を用いると、クレーンの剛性行列は

$$K_c = \begin{bmatrix} 8.7 \times 10 & 0 & 0 & 0 & 1.9 \times 10 & 0 \\ 0 & 8.7 \times 10 & 0 & -1.9 \times 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.7 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.9 \times 10 & 0 & 2.3 \times 10 & 0 & 0 \\ 1.9 \times 10 & 0 & 0 & 0 & 2.3 \times 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.2 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (6-33)$$

と求まる。ワイヤ引張り剛性は規格より、また振れ剛性は懸垂物の振動周期から求めた。これより、式(6-30)、(6-31)の値、即ちロボットに加わるモーメントが0となるクレーン座標、力が0となるクレーン座標をそれぞれ求めると、

$$f_x = 0 : \quad x_c = 1.1 \times 10^{-2} \text{ [m]}$$

$$m_y = 0 : \quad x_c = 6.1 \times 10^{-2} \text{ [m]}$$

となる。

実験は、1)懸垂物を水平に保ったままクレーンを移動させ、ロボットの力とモーメントを測定することにより、剛性行列の妥当性を検証する、2)ロボットで懸垂物を傾かせ、クレーンを移動させた時の各位置におけるロボットの力、モーメントを測定し、式(6-28)、(6-29)に示した評価関数の正当性を検証する、の2つを行なう。

本システムでは機構の誤差により過大な内力は生じないように設計がなされているので、それぞれの機構は懸垂物の目標位置、姿勢に対して決定される目標値を達成するよう位置制御することで、協調が実現が可能である。従って上記の実験の妥当性が検証できれば、容易に実作業に適用できる。

実験1：剛性行列の検証実験

まず、懸垂物が水平の状態ではクレーンを懸垂物の真上に固定し、ロボットのリストを $0 \sim 0.1 \text{ rad}$ まで回転させ、その時ロボットの手先で x 方向に発生する力と y 軸回りのモーメントを測定した (Fig. 6.24)。

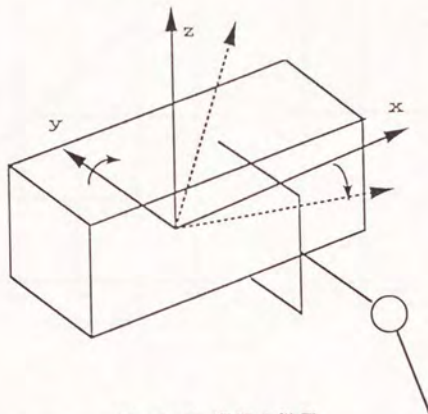


Fig. 6.24 実験の様子

ロボットのリストのみを変位させるので、

$$\Delta x_c = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \Delta \theta \ 0]^T$$

である。従ってロボットの手先に発生する力ベクトル $F = K_c \Delta x_c$ の成分は x 方向の力と y 軸回りのモーメントであり、これらの値は剛性行列の (1, 5) 成分と (5, 5) 成分に傾き角 $\Delta \theta$ を掛けたものとなる。(式(6-34)参照)

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & K_{15} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6-34)$$

$$\begin{aligned} \therefore f_x &= K_{15} \Delta \theta \\ m_y &= K_{55} \Delta \theta \end{aligned}$$

この結果をグラフに示す。グラフ中の直線は最小二乗法により求めた。

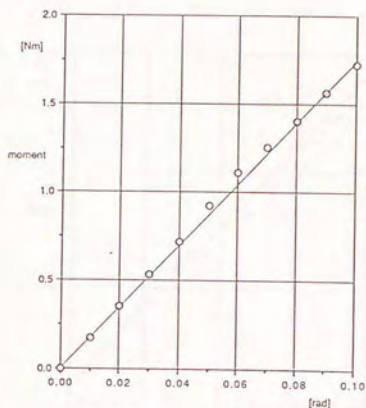
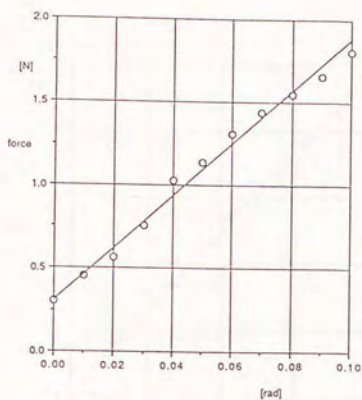


Fig. 6.25 ロボットリストの変化による力、モーメントの変化

この結果から

$$K_{15} = 1.6 \times 10$$

$$K_{55} = 1.7 \times 10$$

と得られる。これらの値はモデルから算出される値 1.9×10 、 2.3×10 と比較してそれぞれ 16%、22% 程度異なっている。この誤差は懸垂物に取付けたワイヤの幾何的誤差、ワイヤ長の変化を無視して剛性行列を定義したための影響と考えられる。

次にロボットと懸垂物を水平に保ったまま、クレーンを x 方向に移動させ、ロボット先端に発生する力とモーメントを測定した。グラフを Fig. 6.26 に示す。この結果からは剛性行列の (1,1) 成分、(5,1) 成分が求まる。

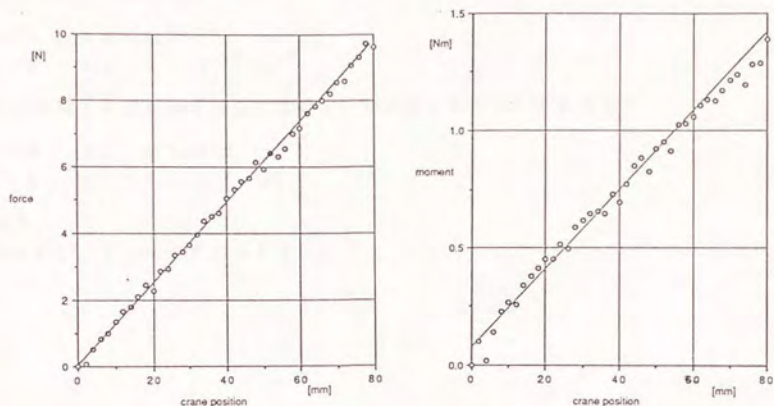


Fig. 6.26 クレーン位置による力、モーメントの変化

この結果から

$$K_{11} = 1.2 \times 10^2$$

$$K_{51} = 1.6 \times 10 \quad (K_{15} = 1.5 \times 10)$$

が得られる。 K_{15} と K_{51} の値はほぼ同じ値となっており、理論通りである。また、モデルとの誤差は K_{11} が29%、 K_{15} が16%程度である。これも前の実験と同様の原因と考えられる。

以上の結果から、モデルとの間に20~30%程度の誤差が出たが、実験(1-1)と(1-2)における K_{15} と K_{51} 成分は良く一致しており、剛性行列の形態は妥当であると思われる。従って、この実験によって得られた剛性行列(式(6-34))を利用することにより、最適解を算出する。

実験 2 : 最適解の検証実験

懸垂物をロボットにより y 軸回りに 0.05rad 回転させておき、クレーンを x 座標 $0 \sim 70\text{mm}$ まで移動させ、ロボット手先に発生する力とモーメントを測定した。

式(6-33)のモデルから

$$f_x = 0 : x_c = 1.1 \times 10^{-2} \quad [\text{m}]$$

$$m_y = 0 : x_c = 6.1 \times 10^{-2} \quad [\text{m}]$$

また、実験 1 の結果から得られる剛性行列の成分を利用して求めると

$$f_x = 0 : x_c = 6.7 \times 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$m_y = 0 : x_c = 5.3 \times 10^{-2} \quad [\text{m}]$$

となる。

Fig. 6.27、6.28に測定結果を示す。

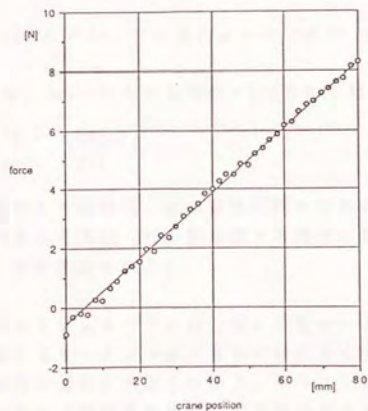


Fig. 6.27 クレーン位置による力の変化

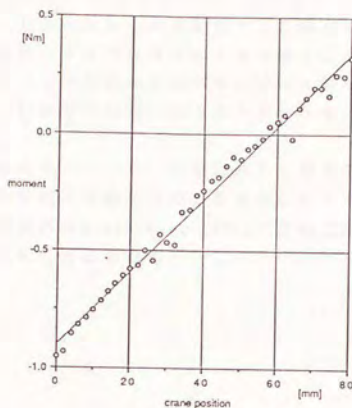


Fig. 6.28 クレーン位置によるモーメントの変化

この結果から、 $f_x = 0$ 、 $m_y = 0$ となる時の x_c はそれぞれ

$$f_x = 0 : x_c = 6.2 \times 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$m_y = 0 : x_c = 5.8 \times 10^{-2} \quad [\text{m}]$$

と求まる。この値は実験 1 の結果得られる剛性行列を利用した場合の理論値とほぼ一致しており、剛性行列として式(6-18)の形を有する機構に対する最適解が式(6-28)、(6-29)で与えられることが検証された。

ロボットのリスト用アクチュエータには一般に小型モータが利用されるため、ロボット先端において発生するモーメントはできるだけ小さくすることが望まれる。しかし一方で、懸垂物の重力が非常に大きくなると、モーメントを 0 とするためにロボットに必要な水平方向の力が非常に大きくなる恐れがある。そこで、クレーン位置に対するモーメントと水平方向の力の大きさを考察する。

$f_x = 0$ となる時の m_y の値と $m_y = 0$ となる時の f_x の値をそれぞれ計算すると

$$f_x = 0 \quad \Rightarrow \quad m_y = m g d_{\perp} \Delta \theta$$

$$m_y = 0 \quad \Rightarrow \quad f_x = m g \Delta \theta$$

となる。

f_x が0の時の m_y の大きさは、懸垂物の傾き $\Delta\theta$ のみならず d_1 の大きさにも比例する。従って、 d_1 の値が小さい場合には、 $f_x=0$ の時にロボットに働くモーメントも小さいと考えて良い。

これに対して $m_y=0$ の時の f_x の大きさは、 $\Delta\theta$ のみに依存している。このため、懸垂物の質量が大きくしかも $\Delta\theta$ も大きな値をとる場合に $m_y=0$ の解を選択すると、そのために水平方向に発生する力は非常に大きな値となり、好ましいとはいえない。

以上の考察から、ロボット手先が受持つモーメントのみに注目し、常に $m_y=0$ となる解を利用することは非常に危険であることがわかる。

ロボット手先にかかるモーメント、力を総合して重みを決定するためには、ロボットが先端で発生可能な6次元方向全ての力を考慮しなくてはならない。このためにはロボット先端の操作力楕円体[Yoshikawa 1984]の各軸方向の長さに比例した重みを利用する方法が有効であると考えられる。

6. 5 まとめ

本章では、6章で示したシステム構成をクレーンとロボットの協調制御システムに適用し、その実用性を検証した。ハンドリング対象となる重量物の質量に合せて2通りのシステム構成を示した。

6. 2において、ハンドリング対象となる重量物の質量とロボットの発生可能なトルクに応じて、クレーン、ロボット協調システムとして2通りの構成が可能であることを示した。

ワイヤに懸垂された重量物の質量が極めて大きい場合には、ロボットから見た水平方向剛性が高くなり、もはや弾性体とみなすことが不可能となるため、ロボット先端に低剛性アームを導入する必要がある。6. 3では、ロボット先端に低剛性アームを導入した。この結果、重量物は水平面内において振動を発生するため、重量物の位置決め、振動制御を行うためのクレーンのフィードバック制御系を設計した。懸垂物を質点としてモデル化した。試作システムを用いた実験を行ない、その結果対象物に行過ぎを生じさせることなく目標点での位置決めが可能であることが示された。また、重量物の質量が増加した場合にも本システムが有効であることを示した。ロボットには水平面内2自由度に弾性部の導入が必要となるが、本節で導入した低剛性アームは水平面内には1自由度方向にしか弾性部を有していない。しかし、平面内の振動は直交する2つの振動の和と考えることができるので、本制御則が有効であるといえる。

6. 4ではロボットにより重量物の微小移動を得ることが可能である場合のシステムを構築した。ワイヤ方向のみロボットが弾性を有するよう、ロボット先端に鉛直方向に平行板バネを導入した。このシステムに対して、内力の2乗和が最小となる逆運動学解を求め、実験により検証を行なった。この結果、懸垂物に対する剛性行列モデルの適用、最適解の正当性が検証された。また、制御法、実現が非常に簡単で、本システムにおける弾性部の導入が非常に効果的であることが示されたといえる。

第7章

結論と今後の展望

第7章 結論と展望

7.1 結論

7.2 今後の展望

7. 1 結論

本論文は、先端に弾性部の付加された複数のマニピュレータの協調制御手法の確立を目的とし、運動学、逆運動学計算、動力学を考慮した制御系の設計を行なった。また、逆に先端に弾性部を導入することにより、実際の産業用ロボットの利用が可能な協調システムの構成法を示し、クレーンとロボットの協調制御に応用し、その実用性を検証した。

2章の運動学においては、以下の点を示した。

- 1) 協調制御系では機構が閉ループ系を構成することから、まず機構の有する自由度について考察し、先端に弾性部を含む2つのマニピュレータにより構成される閉ループ機構を代表する関節の選び方を示し、更に対象物の可動空間を求めた。
 - ・与えられた剛性行列を解析し、剛体とみなさなければならない空間、弾性体としてモデル化の可能な空間への分離手法を示した。
 - ・弾性空間に等価関節モデルを利用することで、幾何的拘束条件を単純に表現することを可能にした。
 - ・力の釣合条件を加えることにより、自由度、関節の選び方を算出した。
 - ・対象物座標系を6自由度方向に動かすことが可能となる条件を考察した。
- 2) 逆運動学計算に際しては、機構に弾性部がある場合、目標となる対象物座標系に対して機構が冗長自由度となることから、これに対する手法として、いくつかの関節を予め固定しておく方法、ヤコビ行列を用いた収束演算手法、非線形連立方程式による解法が本論でも適用可能なことを示した。

3章では、剛性行列を考慮したマニピュレータの協調制御系の設計を行ない、シミュレーションによりその正当性を証明した。

- 1) 動力学を考慮した協調制御系の形態を考察し、2つのマニピュレータ両方を用いて対象物の軌道実現と内力の制御を行なう形態が制御特性の点で優れていることを示した。
- 2) 剛体マニピュレータ同士の協調制御系において、フィードバックゲイン行列と対象物の誤差収束の関係を明らかにし、対象物の挙動を2次系モデルとできることを示した。
- 3) 剛体マニピュレータの協調制御系を弾性マニピュレータの協調制御系に拡張した。
 - ・対象物に目標力を伝達するための弾性マニピュレータの目標位置を算出した。弾性マニピュレータにおいては目標力発生のために弾性部をたわませることが必要となるため、対象物先端で発生できる力は微分関数が連続となることが条件として付加されることを示した。
 - ・弾性マニピュレータにおける制御則を示し、フィードバックゲイン行列と誤差収束の関係を求めた。マニピュレータの目標誤差収束を対象物の目標誤差収束より速く

設定することにより、剛体マニピュレータの場合同様、2次系モデルとできること、対象物に設定するフィードバックゲインを用いて、対象物の外力に対するコンプライアンスを指定することが可能であることを示した。

- 4) 2台の3自由度水平多関節型マニピュレータを用いたシミュレーションにより、弾性マニピュレータ同士の協調制御系の正当性を証明した。
 - ・目標軌道として、等速軌道の始点、終点のみを4次関数で補間するという関数を設計した。

4章では1自由度方向のみに弾性を有する2台のアームを利用し、弾性アームの協調制御実験を行ない、3章の制御則の有効性を検証した。実験では2腕の挟みつけにより対象物を保持した。

- 1) 3章に示した拘束条件の他に、落下させず破壊しないための条件を示した。
- 2) アーム先端で発生できる力は微分が連続である必要があることから、剛体機構では把持力の2乗和が最も小さくなる最適内力を利用することができないことを示し、内力を常に一定に保つという特性を持つ力の配分法を示した。
- 3) DCモータとボールネジを用いた2台の移動テーブルと、平行板バネからなる装置を製作し、実機を用いて振動制御、搬送、挿入実験を行なった。実験結果からも、目標内力が達成され、誤差収束とフィードフォワードが共に有効に作用することが確認された。

3、4章では、誤差が存在せずトルク制御が可能な理想のマニピュレータを想定し、理論的な観点からのみ、協調制御系の設計を行なった。これらの定式化は将来的には不可欠なものであるが、現状での実現は極めて難しく、トルク制御をベースとした協調制御は剛体同士ですら実現されていない。これは、現状の産業用ロボットのコントローラには位置制御系が利用されていることから、先端での力の制御特性が低く、協調対象との位置誤差が生じると過大な内力が発生してしまうことが原因である。このような現状を考慮し、2章の結果を利用することで、産業用ロボットの協調制御への利用が可能なシステムを構成した。

5章では、既存の産業用ロボットの特性を考慮した協調制御系の構成法を示した。

- 1) 協調相手の剛性行列から、相手が剛体として存在する空間、弾性体として存在する空間を算出し、相手が剛体となる空間には弾性部を導入することにより、過大な内力を防ぐことができることを示した。

6章では、5章で示したシステム構成をクレーンとロボットの協調制御システムに適用し、その実用性を検証した。ハンドリング対象となる重量物の質量に合せて2通りのシステム構成を示した。

- 1) 重量物の質量が極めて大きくなる場合にはロボットにより懸垂物の位置、姿勢を決定するための力を発生することが不可能となるため、重量物をrigidに把持した。

ロボットが位置制御されると重量物の慣性の影響によりロボットに過大な内力が作用してしまふ。これを防ぐため、ロボット先端に低剛性アームを導入し、クレーンによるフィードバックにより位置決め、振動制御を行なう必要がある。試作システムを用いた位置決め、振動制御実験を行なった。その結果、対象物に行過ぎを生じさせることなく目標点での位置決めが可能であることが示された。また、重量物の質量が増加した場合にもシステムが有効に作用することを示した。

- 2) ロボットにより重量物の微小移動を得ることが可能である場合のシステムを構築した。ワイヤ方向のみロボットが弾性を有するよう、ロボット先端に鉛直方向に平行板バネを導入した。このシステムに対して、内力の2乗和が最小となる逆運動学解を求め、実験により検証を行なった。

以上、5章、6章では、機構の有する剛性行列の特性を利用し、産業用ロボットの利用が可能なシステムを構築した。この手法は非常に単純で、しかも応用範囲が広い。クレーンのようにある方向には不可避免的に剛性の低い機構の補助としてロボットを利用する場合、あるいは柔らかい対象物、例えば非常に長い棒をハンドリングする場合などに有効となる。

本論文は、2章から4章において弾性部を含む機構に対する特性解析、それに基づく制御系設計を行なった。また、5章、6章においては弾性部をあえて導入することで、2章から4章における知識を有効に利用することができた。これまで、剛体を制御対象とした研究で、機構の剛性を考慮したものは非常に少なく、本研究成果の利用価値は非常に高い。

7. 2 今後の展望

ロボットの協調制御への利用の有効性については異論のない所であるが、実現されたシステムは極めて少ない。この理由は本文中にも度々述べたように、位置制御系を利用した機構では、位置誤差により過大な内力が発生し非常に危険なためである。このような機構をそのまま利用して協調制御を行なっても、その動作速度は極めて遅いものとなり、実用にはいたらない。

協調制御を実現する方法は大きく分類して2つある。

1つは現状のロボットの欠点を補うため、本論文で示したように弾性部を導入する方法である。この手法は実現が極めて簡単であり、弾性部が存在しても支障のない作業には有効である。しかし、例えば2つのマニピュレータが対象物の重力を半分ずつ分担しなくてはならない場合など、両方のマニピュレータが同じ方向に対して同等の力を発生しなくてはならない場合には利用することが難しい。

もう1つの手法は、ロボットのトルク制御を実現することである。本論文に示したように、これまで一般に用いられてきたマニピュレータモデルに近い特性、即ち摩擦、ガタ、機構誤差が極めて少ないロボットを開発することである。これにはリアルタイムで演算を行なうことの可能な計算機の実在も条件となる。このための研究として、DDロボットの開発が行なわれているが、モータが大型化すること、DDモータを利用してもあまり摩擦を小さくすることができないことなどがネックとなっている。

ロボットの汎用性、高速化、高精度化を考えると後者の手法が是非とも必要であり、上述のようなロボットの出現が待たれる。

本論文で示した制御則は、弾性部がマニピュレータ先端のみに存在することを前提としている。しかし現実のマニピュレータでは、弾性部がそれぞれの関節、あるいはアーム自身に存在することが多い。このような弾性部が分散したマニピュレータに対する制御を行なおうとすると、制御対象モデルの次数が非常に高くなるため、制御則は本論文のものと比較して遙かに複雑となることが予想される。しかし、今後の理論的な展開としては、次数のより高い制御対象に対する制御則の確立が必要となるであろう。現在、マニピュレータ自身の弾性を考慮した研究として、多リンクフレキシブルアームを2腕用いた協調システムの開発が進められており[内山 1989(b)]、その成果が期待される。

謝辭

本論文は、筆者が東京大学工学部精密機械工学科在学中から助手の間の約7年間、新井研究室において行った研究の成果をまとめたものです。その間絶えず熱心にご指導いただきました

東京大学工学部精密機械工学科教授 新井民夫先生

に心より感謝いたします。先生の研究テーマに対する教授の卓越した発想、視点は言うに及ばず、研究者としての在り方、生活のすみずみに至るまで数多くのことを教えていただきました。

本論文をまとめるにあたり、適切にご教示を賜りました

東京大学工学部精密機械工学科教授 高野政晴先生

東京大学工学部機械工学科教授 井上博允先生

東京大学工学部生産技術研究所助教授 樋口俊郎先生

東京大学先端科学技術センター助教授 佐々木健先生

に、心から感謝の意を表します。特に佐々木先生には、常日頃からロボット研究の在り方等についてご議論いただきました。

筆者が在学中の同研究室助手の松元明弘先生（現、東洋大学工学部助教授）には、先輩として常日頃から適切な助言をいただき、論文をまとめる際にも大いに励ましの言葉をいただきました。遠山茂樹先生（現、東京農工大学助教授）には、ことある毎に研究に関する適切な助言をいただき、研究を進める際に大変参考とさせていただきます。浅川一雄氏（現、富士通研究所）には主にコンプライアンスに関する考え方を教えていただきました。氏の研究者としての幅広い好奇心は、筆者がこれから研究を進める上でも大いに見習わせていただきたいと思います。淺間一氏（現、理化学研究所）には研究の概念の重要性を、また福田敏男先生（現、名古屋大学工学部教授）には研究の着眼点、進め方を教えていただきました。渡辺匡通氏（現、鹿島建設）には、建設作業、現場の現状等についてお教えいただき、本論文を完成させる上で大変参考となりました。ここに謹んで感謝の意を表します。

筆者が学生時代から研究を共にした太田順氏（現、新日鐵）、宇野真彦氏（現、三菱電機）には、常日頃から制御に関する議論の相手をしていただきました。本論文の

動力学シミュレーションに関しましては、宇野氏の修士論文を参考とさせていただきます。また太田氏には本論文の校正もしていただきました。

本論文中の協調制御実験に関しましては、佐藤宏行氏（現、富士通）、吉田英一氏（修士課程在学中）の卒業論文が大いに参考となりました。また、両氏の研究に対する熱心な態度にはつくづく感心させられました。

論文の完成に当っては、相山康道氏（修士課程在学中）、梅田和昇氏（修士課程在学中）、石渡亮伸氏（修士課程在学中）にご協力いただき、筆者が論文を完成させる際の大きな助けとなりました。また、邱士軒氏（博士課程在学中）と行った制御法に関する議論は本論文を完成させる上で大いに参考となりました。

この他にも筆者が在学中から助手として現在に至るまで数多くの方々のご協力、ご援助をいただきました。中でも東京大学工学部精密機械工学科の先生方、職員の方々には、さまざまな面でご協力いただきました。特に新井教授秘書の田中延枝さんには、論文執筆中の雑務を一手に引受けていただきました。大変有難うございました。

平成2年11月

大隅 久

大隅 久

参考文献

参考文献

- 欧文文献
- 和文文献
- 参考図書

【欧文献】

- [Ahmad 1988] S. Ahmad and H. Guo
Dynamic Coordination of Dual-Arm Robotic Systems with
Joint Flexibility
Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 344-349,
1988.
- [Alford 1984] C. O. Alford and S. M. Belyeu
Coordinated Control of Two Robot Arms
IEEE Proc. of Int. Conf. on Robotics, Georgia, pp. 468-473,
March 1984.
- [An 1987(a)] C. H. An and J. M. Hollerbach
Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators
Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 890-896,
1987.
- [An 1987(b)] C. H. An and J. M. Hollerbach
Kinematic Stability Issues in Force Control of Manipulators
Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 897-903,
1987.
- [Anderson 1987] R. J. Anderson and M. W. Spong
Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators
Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1073-1080,
1987.
- [Arai 1988] T. Arai, H. Osumi and J. Ohta
Crane Control with an Industrial Robot
Proc. 5th Int. Symp. Robotics in Contrs., pp. 747-754, 1988.
- [Arai 1989] T. Arai, H. Ogata and T. Suzuki
Collision Avoidance among Multiple Robots Using Virtual
Impedance
Proc. IEEE/JRS Int. Workshop on Intelligent Robots & System,
pp. 479-485, 1989.
- [Arai 1990] T. Arai, H. Osumi and H. Makino
Assembly of Suspended Heavy Works
Circp vol. 39/1/1990, 37-40, 1990.
- [Arimoto 1987] S. Arimoto, F. Miyazaki and S. Kawamura
Cooperative Motion Control of Multiple Robot Arms or
Fingers
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp. 1407-1412, 1987.
- [Asada 1986] H. Asada and J.-J. E. Slotine
Robot Analysis and Control

Wiley-Interscience, 1986.

- [Baillieul 1985] J. Baillieul
Kinematic Programming Alternatives for Redundant Manipulators
Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 722-728, 1985.
- [Benati 1982] M. Benati, P. Morasso and V. Tagliasco
The Inverse Kinematic Problem for Anthropomorphic Manipulator Arms
Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 104, pp. 110-113, 1982.
- [Book 1975] W. J. Book, O. Maizza-Neto and D. E. Whitney
Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility
J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Trans. of ASME, pp. 424-431, 1975.
- [Book 1979] W. J. Book
Analysis of Massless Elastic Chains With Servo Controlled Joints,
J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control
Trans. of ASME, Vol. 101, September, pp. 424-431, 1979.
- [Brady 1982] M. Brady, J. M. Hollerbach, T. L. Johnson, T. Lozano-Perez, M. Mason.
Robot Motion: Planning and Control,
The MIT Press, 1982.
(和訳) 長谷川健介、高野政晴、古田勝久、花房秀郎、長田正
監訳
ロボット・モーション I ~ III
HBJ出版、1985.
- [Cannon 1983] R. H. Cannon and J. E. Schmitz
Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot
Int. J. of Robotics Research, Vol. 3, No. 3, pp. 62-75, 1983.
- [Chang 1986] P. H. Chang
A Closed Form Solution for Inverse Kinematics of Robot Manipulators
MIT AI Lab. A. I. Memo No. 854, March, 1986.
- [Dauchez 1987(a)] P. Dauchez and M. Uchiyama
Kinematic Formulation for Two Force-Controlled Cooperating Robots
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 457-467, 1987.

- [Dauchez 1987(b)] P. Dauchez and R. Zapata
Co-ordinated Control of Two Cooperative Manipulators
The Use of a Kinematic Model
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp. 641-648, 1987.
- [Eppinger 1986] S.D. Eppinger and W.P. Seering
On Dynamic Models of Robot Force Control
MIT AI Lab. A.I. Memo No. 910, July, 1986.
- [Eppinger 1987] S.D. Eppinger and W.P. Seering
Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control
MIT AI Lab. A.I. Memo No. 948, August, 1987.
- [Eppinger 1988] S.D. Eppinger and W.P. Seering
Modeling Robot Flexibility for Endpoint Force Control
MIT AI Lab. A.I. Memo No. 1046, May, 1988.
- [Freund 1984] E. Freund
Hierarchical Nonlinear Control for Robots
Proc. 1st Int. Symp. on Robotics Research, pp. 817-840, 1984.
- [Freund 1985] E. Freund and H. Hoyer
Collision Avoidance in Multi-Robot Systems
Proc. 2nd Int. Symp. on Robotics Research, pp. 135-146, 1985.
- [Freund 1986] E. Freund and H. Hoyer
On the On-Line Solution of the Findpath Problem
in Multi-Robot Systems
Proc. 3rd Int. Symp. on Robotics Research, pp. 253-262, 1986.
- [Hanafusa 1977] H. Hanafusa and H. Asada
Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers
Proc. of 7th Int. Symp. on Industrial Robots, Tokyo,
pp. 361-368, 1977.
- [Hanafusa 1983] H. Hanafusa, H. Kobayashi and N. Terasaki
Fine Control of the Object with Articulated Multi-Finger
Robot Hands
Proc. ICAR, pp. 245-252, 1983.
- [Hanafusa 1985] H. Hanafusa, T. Yoshikawa, Y. Nakamura and K. Nagai
Structural Analysis and Robust Prehension of Robotic
Hand-Arm System
Proc. ICAR, pp. 311-318, 1985.
- [Hayati 1986] S. Hayati
Hybrid Position/Force Control of Multi-Arm Cooperating
Robots
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.

pp. 82-89, 1986.

- [Higuchi 1988] T.Higuchi, A.Ming and J.Jiang-yu
Application of Multi-dimensional Wire Cranes
in Construction
Proc. 5th Int. Symp. Robotics in Constr., pp.661-668, 1988.
- [Hogan 1985(a)] N.Hogan
Impidance Control: An Approach to Manipulation:
Part1 - Theory
ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control,
pp.1-7, 1985.
- [Hogan 1985(b)] N.Hogan
Impidance Control:An Approach to Manipulation:
Part2 - Implementation
ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control,
pp.8-16, 1985.
- [Hogan 1985(c)] N.Hogan
Impidance Control:An Approach to Manipulation:
Part3 - Applications
ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control,
pp.17-24, 1985.
- [Hogan 1987] N.Hogan
Stable Execution of Contact Tasks Using Impidance Control
Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.741-750,
1987.
- [Hollerbach 1984] J.M.Hollerbach
Optimum Kinematic Design for a Seven Degree of Freedom
Manipulator
Proc. of the 2nd Int. Symp. of Robotics Research,
pp.215-222, 1984.
- [Hollerbach 1986] J.M.Hollerbach and K.C.Suh
Redundancy Resolution of Manipulators through Torque
Optimization
MIT AI Lab. A.I.Memo No.882, January, 1986.
- [Ishida 1977] T.Ishida
Force Control in Coordination of Two Arms
Proc. 5th Int. Conf. on Artificial Intelligence, pp.717-722,
1977.
- [Khatib 1986] O.Khatib and J.Burdick
Motion and Force Control of Robot Manipulators
Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1381-1386,
1986.

- [Khatib 1987] O. Khatib
The Operational Space Formulation in Robot Manipulator Control,
Proc. IEEE Int. Conf. robotics and Automation, pp.1025-1032, 1987.
- [Kim 1989] K. I. Kim and Y. F. Zheng
Two Strategies of Position and Force Control for Two Industrial Robots Handlink a Single Object
J. of Robotics andn Autonomous Systems 5, pp395-403, 1989.
- [Klein 1983] C. A. Klein and C. H. Huang
Review of Pseudoinverse Control for Use with Kinematically Redundant Manipulators
IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-13, No. 3, pp.245-250, March, 1983.
- [Kobayashi 1983] H. Kobayashi
On the Articulated Hands
Prep. 2th ISRR, pp.128-135, 1983.
- [Konstantinov 1981] M. S. Konstantinov, M. D. Markov and D. N. Nenchev
Kinematic Control of Redundant Manipulators
Proc. of 11th ISIR, pp.561-568, 1981.
- [Kopf 1988] C. D. Koph and T. Yabuta
Experimental Comparison of Master/Slave and Hybrid Two Arm Position/Force Control
Proc. IEEE Int. Conf. robotics and Automation, pp.1633-1637, 1988.
- [Liegeois 1977] A. Liegeois
Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms
IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-7, No. 12, Dec. 1977.
- [Lim 1985] J. Lim and D. H. Chyung
On a Control Scheme for Two Cooperating Robot Arms
Proc. of Conf. on Decision and Control, pp.334-337, 1985.
- [Lozano-Perez 1981] T. Lozano-Perez
Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements
IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 10, pp.681-698, 1981.
- [Luh 1980] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. Paul
Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators
J. Dynamic System, Measurement, Control 25-3, pp.468-474, 1980.

- [Mason 1981] M. T. Mason
Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulator
IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics SMC-11, 6, pp.418-432, 1981.
- [Mason 1985] M. T. Mason and J. K. Salisbury
Robot Hands and the Mechanics of Manipulation
The MIT Press, 1985.
- [Nakano 1974] E. Nakano and S. Ozaki
Cooperational Control of the Anthropomorphous Manipulator 'MELARM', Proc. 4th Int. Symp. Industrial Robots, pp. 251-260, 1974.
- [Orin 1981] D. E. Orin and S. Y. Oh:
Control of Force Distribution in Robotic Mechanisms Containing Closed Kinematic Chains
J. of Dynamic Systems, Measurements, and Control, Vol. 102, pp. 134-141, June 1981.
- [Paul 1976] R. P. Paul and B. Shimano
Compliance and Control
Proc. 1976 Joint Automatic Control Conf., pp. 694-699, 1976.
- [Paul 1979] R. P. Paul
Manipulator Cartesian Path Control
IEEE Trans. Vol. SMC-9, No. 11, pp. 702-711, 1979.
- [Paul 1981] R. P. Paul
Robot Manipulators, Programming and Control
The MIT Press, 1981.
吉川恒夫訳：ロボット・マニピュレータ、コロナ社
- [Paul 1987] R. P. Paul
Problems and Research Issues Associated with the Hybrid Control of Force and Displacement
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1966-1971, 1987.
- [Raibert 1981] M. H. Raibert, J. J. Craig
Hybrid Position/Force Control of Manipulators
Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 103, No. 2, pp. 126-133, 1981.
- [Roberts 1985] R. K. Roberts, R. P. Paul and B. M. Hillberry
The Effect of Wrist Force Sensor Stiffness on the Control of Robot Manipulators
Proc. IEEE Int. Conf. robotics and Automation, pp. 269-274,

1985.

- [Salisbury 1980] J.K. Salisbury
Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian
Coordinates
Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control, 1980.
- [Salisbury 1982] J.K. Salisbury and J.J. Craig
Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues
Int. J. of Robotics Research 1-1, pp.4-17, 1982.
- [Sakawa, Y 1985] Y. Sakawa, F. Matsuno and S. Fukushima
Modeling and Feedback Control of a Flexible Arm
J. of Robotic Systems, 2(4), pp.453-472, 1985.
- [Sunada 1983] W. H. Sunada and S. Dubowsky
On the Dynamic Analysis and Behavior of Industrial
Robotic Manipulators With Elastic Members
J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design,
Vol.105, 1983.
- [Tao 1987] J. M. Tao, J. Y. S. Luh and Y. F. Zheng
Compliant Coordination Control of Two Moving Industrial
Robots
Proc. of the 26th IEEE Conf. on Decision and Control,
pp.186-191, 1987.
- [Tarn 1987] T. J. Tarn, A. K. Bejczy and X. Yun:
Design of Dynamic Control of Two Cooperating Robot Arms
Closed Chain Formulation
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp.7-13, 1987.
- [Taylor 1979] R. H. Taylor
Planning and Execution of Straight-Line Manipulator
Trajectories
IBM Journal of Research and Development, 23, pp.314-322, 1979,
- [Truckenbrodt 1981] Truckenbrodt, A.
Modeling and Control of Flexible Manipulator Structures
Proc. 4th CISM/IFToMM Symp. on Theory and Practice of
Robots and Manipulators, Warszawa, 90/101, 1981.
- [Uchiyama 1987] M. Uchiyama, N. Iwasawa and K. Hakomori
Hybrid Position/Force Control for Coordination of
a Two-Arm Robot
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp.1242-1247, 1987.
- [Uchiyama 1988] M. Uchiyama and P. Dauchez

- A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme
for the Coordination of Two Robots
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp.350-356, 1988.
- [West 1987] H. West and H. Asada
A Method for the Design of Hybrid Position/Force Controller
for Manipulators Constrained by Contact with the Environment
Proc. IEEE Int. Conf. robotics and Automation, pp. 251-259,
1985.
- [Whitney 1972] D. E. Whitney
The Mathematics of Coordinated Control of Prostheses and
Manipulators
J. Dynamic Systems, Measurement, Control, pp.303-309, 1972.
- [Whitney 1977] D. E. Whitney
Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions
ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control,
pp.91-97, 1977.
- [Whitney 1987] D. E. Whitney
Historical Perspective and State of the Art
in Robot Force Control
The Int. J. of Robotics Research, Vol. 6, No. 1, pp. 3-14, 1987.
- [Yabuta 1988] T. Yabuta, A. Chona and G. Beni
On the Asymptotic Stability of the Hybrid Position/Force
Control Scheme for Robot Manipulators
Proc. IEEE Int. Conf. robotics and Automation, pp. 338-343,
1988.
- [Yoshikawa 1983] T. Yoshikawa
Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy
Proc. of 1st Int. Symp. Robotics Research, pp.735-747, 1983.
- [Zapata 1983] R. Zapata, P. Dauchez and P. Coiffet
Co-operation of Robots in Gripping Tasks:
The Exchange Problem
Robotica, Vol. 1, pp. 73-77, 1983.
- [Zapata 1987] R. Zapata, A. Fournier and P. Dauchez
True Cooperation of Robots in Multi-Arms Tasks
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp.1255-1260, 1987.
- [Zhang 1985] H. Zhang, R. P. Paul
Hybrid Control of Robot Manipulators
IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 602-607,
1985.

[Zheng 1986] Y. F. Zheng and J. Y. S. Luh
Joint Torques for Control of Two Coordinated Moving Robots
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp.1375-1380, 1986.

[Zheng 1988] Y. F. Zheng and J. Y. S. Luh
Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots
Handling a Single Object
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,
pp.344-349, 1988.

【和文文献】

- [浅川 1985] 浅川和雄
"センサフィードバックによる高精度作業の実現"
精密機械 51/11/1985, pp.2034-2039, 1985.
- [浅川 1987] 浅川和雄
機械インピーダンス制御を適用した組立ロボットに関する研究
東京大学博士論文, 1987.
- [浅田 1983] 浅田春比古
"ダイレクト・ドライブロボットの開発とその制御性能の評価"
計測自動制御学会論文集 Vol.19, No.1 77-84, 1983.
- [浅田 1986] 浅田春比古
"ダイレクト・ドライブアームのための関節トルクの計測と制御"
計測自動制御学会論文集 Vol.22, No.8 891-896, 1986.
- [新井 1986] 新井民夫、大隅久
小型ロボットによる懸垂重量物の組み立て
東京大学工学部紀要 A No.24, pp.18-19, 1986.
- [内山 1979] 内山勝
人工の手の運動制御に関する研究(第1報)
日本機械学会論文集(C編), Vol.45, No.391, pp.314-322, 1979.
- [内山 1983] 内山勝, 箱守京次郎, 清水邦敏
マルチアーム協調のためのサーボ構成法
第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.101-102, 1983.
- [内山 1989(a)] 内山勝、姜兆慧、箱守京二郎
フレキシブルロボットアームの補償制御
日本ロボット学会誌 Vol.7 No.4, pp.20-29, 1989.
- [内山 1989(b)] 内山勝、近野敦、内山隆、神田真司
宇宙用双腕マニピュレータ実験機(A D A M)の開発
第7回日本ロボット学会学術講演論文集, pp.393-394, 1989.
- [宇野 1985] 宇野知之、西義和、久保貞夫、伊藤隆
状態観測器を用いたロボットの制御性能の向上
第29回システムと制御研究発表講演会, 38-39, 1985.
- [宇野 1989] 宇野真彦
インピーダンス制御の漸近安定性について
東京大学修士論文, 1989.
- [大隅 1985] 大隅久、新井民夫
小型ロボットによる重量物組立
第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.69-70, 1985.

- [大隅 1987(a)] 大隅久
小型ロボットによる重量物組立システムの開発
東京大学修士論文, 1987.
- [大隅 1987(b)] 大隅久, 新井民夫, 太田順
低剛性アームを用いた重量物組み立てに関する研究
昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 711-712,
1987.
- [大隅 1987(c)] 大隅久, 太田順, 新井民夫
小型ロボットによる重量物組立システムの開発 (第1報)
第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.487-488, 1987.
- [大隅 1989(a)] 大隅久, 太田順, 新井民夫
振り子付きフレキシブルアームの制御 (第2報)
1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.645-646, 1989.
- [大隅 1989(b)] 大隅久, 新井民夫, 吉田英一, 佐藤宏行
2つの弾性アームにより保持された物体の搬送制御
第7回日本ロボット学会学術講演論文集, pp.403-404, 1989.
- [大隅 1989(c)] 大隅久, 新井民夫, 淺間一
複数のワイヤによる懸垂機構の制御 (第1報)
1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.647-648, 1989.
- [大隅 1989(d)] 大隅久, 新井民夫, 淺間一, 遠藤勲
3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発 (第1報)
第7回日本ロボット学会学術講演論文集, pp.607-608, 1989.
- [大隅 1989(e)] 大隅久, 新井民夫, 佐藤宏行
剛体アームと弾性体アームの協調制御
1989年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, pp.283-284, 1989.
- [大隅 1990(a)] 大隅久, 山口博明, 新井民夫, 淺間一, 浦井輝夫
複数のワイヤによる懸垂機構の制御 (第3報)
1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.505-506, 1990.
- [大隅 1990(b)] 大隅久, 新井民夫
クレーンとロボットの協調制御による懸垂物の位置決め
1990年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, pp.555-556, 1990.
- [太田 1987] 太田順, 大隅久, 新井民夫
小型ロボットによる重量物組立システムの開発 (第2報)
第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.489-490, 1987.
- [太田 1988] 太田順, 大隅久, 新井民夫
振り子付きフレキシブルアームの制御 (第1報)
精密工学会秋季大会学術講演論文集, pp.875-876, 1988.
- [太田 1989] 太田順, 大隅久, 新井民夫

- 分布定数系モデルを利用した旋回型クレーンの振動制御
第7回日本ロボット学会学術講演論文集, pp.405-406, 1989.
- [大谷 1985] 大谷哲也、嘉納秀明、増淵正美
非線形性を考慮したマニピュレータの動的モデル
第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 81-82, 1985.
- [岡田 1978] 岡田徳次
柔軟性のある人工の手
バイオメカニズム4 (東大出版会), pp.241-251, 1978.
- [岡田 1980] 岡田徳次
操作性に富む指構造を有するマニピュレータとその計算機制御
計測自動制御学会論文集Vol.16-1, pp.98-104, 1980.
- [北垣 1990] 北垣高成、内山勝
外部環境に対するマニピュレータの最適接近速度
日本ロボット学会誌8巻4号, pp.413-420, 1990.
- [邱 1989] 邱士軒, 大隅久, 新井民夫
負荷対応可能な非干渉一定慣性ロボットの開発
1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.111-112, 1989.
- [久良 1984] 久良修郭, 二見茂, 原修二郎
Rigid Arm:産業用ロボットの防振制御
安川電機, Vol. 48, No.2, pp.105-109, 1984.
- [黒野 1975] 黒野 繁
一对の人工の手の協調制御
J. of the J.S.M.E., Vol.78, No 682, pp.804-810, Sept., 1975.
- [小菅 1988] 小菅一弘、古田勝久、横山竜昭
ロボットの仮想内部モデル追従制御系
計測自動制御学会論文集, 第24巻, 第1号, pp.55-62, 1988.
- [小松 1990] 小松督、植之原道宏、飯倉省一、三浦宏文、下山勲
トルクフィードバックを用いた宇宙用多リンク柔軟マニピュレータの振動制御
日本ロボット学会誌8巻2号, pp.171-178, 1990.
- [坂和 1986] 坂和爱幸
フレキシブル・アームのモデリングと制御
計測と制御 Vol.25, No.1, pp.64-70, 1986.
- [佐藤 1989] 低剛性アームの協調制御
東京大学卒業論文, 1989.
- [菅野 1986] 菅野重樹, 田中良治, 大岡俊夫, 加藤一郎
指と腕の協調制御手法
日本ロボット学会誌, Vol.4 No.4, pp.5-14, 1986.

- [杉本 1982] 杉本 浩一
 ロボットハンドの経路補間
 日本機械学会論文集(C編), Vol.48, No.431, pp.990-997, 1982.
- [高瀬 1975] 高瀬国克, 井上博充
 マニピュレータの力制御 - 2本の腕の協調動作への応用
 第14回SICE学術講演会予稿集, pp.157-158, 1975.
- [中田 1978] 中田 孝
 3次系フィードバック制御の効用
 計測と制御, Vol.17, No.12, 883-890, 1978.
- [中村 1985] 中村仁彦, 花房秀郎
 関節形ロボットアームの最適冗長性制御
 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.5, 1985.
- [中村 1986] 中村仁彦, 永井清, 吉川恒夫
 複数のロボット機構による協調的あやつりの力学
 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.5, pp.489-498, 1986.
- [中村 1990] 中村仁彦
 把持とあやつり
 計測と制御 Vol.29, No.3, pp.206-212, 1990.
- [花房 1976] 花房秀郎, 浅田春比古
 人工指による物体把握の力学
 計測自動制御学会論文集, Vol.12, No.5, pp.46-52, 1976.
- [花房 1983] 花房秀郎, 吉川恒夫, 中村仁彦
 関節型ロボットアームの冗長性の解析とその優先順位を有する作業への応用
 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.5, pp.501-507, 1983.
- [平林 1985] 平林久明, 杉本浩一, 荒井信一, 坂上志之
 多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御
 計測自動制御学会論文集, 第22巻, 第3号, pp.343-250, 1986.
- [福田 1983] 福田敏男
 フレキシブルアームの制御
 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.173-174, 1983.
- [福田 1985] 福田敏男, 下中賢
 人工の指の協調制御に関する基礎的研究
 (第2法, 人間の手の動作と機能及び把握の評価)
 第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.245-246, 1985.
- [福田 1986(a)] 福田敏男
 ゴンドラ・ロープ系の位置・振動制御
 日本機械学会論文集(C編), 52巻 474号, pp.515-521, 1986.

- [福田 1986(b)] 福田敏男
フレキシブルロボットアームの曲げ・ねじり振動抑制制御
第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.417-418, 1986.
- [古田 1987] 古田勝久, 小菅一弘, 古屋亮
ロボットアームの協調制御
第30回自動制御連合講演会予稿集, pp.377-378, 1987.
- [松井 1982] 松井雄、網谷茂、小橋章二、菊池健治、所佑文、新家達弥
組立ラインへのロボットの適用
日立評論, Vol.64 No.12, pp.33-38, 1984.
- [山口 1990(a)] 山口博明
ワイヤ懸垂型ロボットの制御
東京大学卒業論文, 1990.
- [山口 1990(b)] 山口博明、大隅久、新井民夫
複数のワイヤによる懸垂機構の制御(第2報)
1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.503-504, 1990.
- [吉川 1986(a)] 吉川恒夫
ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御
日本ロボット学会誌, 3巻6号, pp.531-536, 1986.
- [吉川 1986(b)] 吉川恒夫、中村仁彦、北川秀司
フレキシブルアームのための4次サーボ系の設計
第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.411-412, 1986.
- [吉川 1987] 吉川恒夫
ロボット機構の運動特性評価
日本ロボット学会誌, Vol.5, No.4, pp.312-316, 1987.
- [吉田 1990(a)] 吉田英一
複数の低剛性アームの協調制御
東京大学卒業論文, 1990.
- [吉田 1990(b)] 吉田英一、大隅久、新井民夫
複数の弾性アームの協調制御
1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.363-364, 1990.
- [吉本 1971] 吉本堅一
鉦石アンローダの自動化
機械の研究, 23巻, 1号, pp.40-44, 1971.

【参考図書】

- R. P. Paul 著、吉川恒夫訳：
ロボットマニピュレータ，コロナ社，1984.
- 広瀬茂夫 著：
ロボット工学，裳華房，1987.
- 吉川恒夫 著：
ロボット制御基礎論，コロナ社，1988.
- 大須賀公一、美多勉 著：
ロボット制御工学入門，コロナ社，1989.
- 浅田春比古 著：
DDロボット入門，工業調査会，1987.
- 柳井晴夫、竹内啓 著：
射影行列、一般逆行列、特異値分解，東京大学出版会，1983.

研究業績書

【投稿論文】

T. Arai and H. Osumi :

Assembly of Suspended Heavy Works
Circp vol.39/1/1990, 37-40, 1990.

新井民夫、大隅久 :

クレーンとロボットの協調制御による重量物組立
精密工学会投稿中

新井民夫、大隅久、太田順 :

分布定数モデルを用いた旋回型クレーンの制御
精密工学会投稿中

【講演論文】

大隅久、新井民夫 :

小型ロボットによる重量物組立
第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.69-70, 1985.

大隅久、新井民夫、太田順 :

低剛性アームを用いた重量物組み立てに関する研究
昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 711-712,
1987.

T. Arai, T. Endoh, R. Yamaguchi and H. Osumi :

Development of a Position and Orientation Measuring System
Using CCD Photo Arrays
Proc. China-Japan Int. Sym. Precision Machinery and
Instrument Eng., pp.173-176, 1987

大隅久、太田順、新井民夫 :

小型ロボットによる重量物組立システムの開発 (第1報)
第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.487-488, 1987.

太田順、大隅久、新井民夫 :

小型ロボットによる重量物組立システムの開発 (第2報)
第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.489-490, 1987.

T. Arai, H. Osumi and J. Ohta :

Crane Control System with an Industrial Robot
Proc. 5th Int. Symp. Robotics in Contrs., pp.747-754, 1988.

- 太田順、大隅久、新井民夫：
振り付きフレキシブルアームの制御（第1報）
昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，pp.875-876，1988.
- 邱士軒，大隅久，新井民夫：
負荷対応可能な非干渉一定慣性ロボットの開発
1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.111-112，1989.
- 大隅久、太田順、新井民夫：
振り子付きフレキシブルアームの制御（第2報）
1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.645-646，1989.
- 大隅久、新井民夫、淺間一：
複数のワイヤによる懸垂機構の制御（第1報）
1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.647-648，1989.
- 大隅久、新井民夫、吉田英一、佐藤宏行：
2つの弾性アームにより保持された物体の搬送制御
第7回日本ロボット学会学術講演論文集，pp.403-404，1989.
- 大隅久、新井民夫、淺間一、遠藤勲：
3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発（第1報）
第7回日本ロボット学会学術講演論文集，pp.607-608，1989.
- 太田順、大隅久、新井民夫：
分布定数系モデルを利用した旋回型クレーンの振動制御
第7回日本ロボット学会学術講演論文集，pp.405-406，1989.
- 邱士軒，新井民夫，大隅久：
関節間干渉特性を利用したロボットの制御
第7回日本ロボット学会学術講演論文集，pp.637-638，1989.
- 大隅久，新井民夫，佐藤宏行：
剛体アームと弾性体アームの協調制御
1989年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，pp.283-284，1989.
- 邱士軒，新井民夫，大隅久：
関節間相互干渉特性を利用したロボットの高速度化
1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.359-360，1990.

吉田英一、大隅久、新井民夫：

複数の弾性アームの協調制御

1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.363-364，1990.

山口博明、大隅久、新井民夫：

複数のワイヤによる懸垂機構の制御（第2報）

1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.503-504，1990.

大隅久、山口博明、新井民夫、淺間一、浦井輝夫：

複数のワイヤによる懸垂機構の制御（第3報）

1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.505-506，1990.

新井民夫、大隅久、加藤学、坂口明彦：

幾何的拘束関係に関する研究

1990年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，pp.451-452，1990.

大隅久、新井民夫：

クレーンとロボットの協調制御による懸垂物の位置決め

1990年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，pp.555-556，1990.

新井民夫、大隅久、榎本裕治、淺間一、嘉悦早人：

複数のワイヤによる懸垂機構の制御（第4報）

1990年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，pp.943-944，1990.

大隅久、新井民夫、山口博明、榎本裕治、淺間一、嘉悦早人、浦井輝夫：

3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発（第2報）

第8回日本ロボット学会学術講演論文集，pp.689-690，1990.

大隅久、新井民夫、榎本裕治：

3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発（第3報）

第8回日本ロボット学会学術講演論文集，pp.691-692，1990.

T.Arai, H.Osumi and H.Yamaguchi：

Assembly Robot Suspended by 3 Wires with 7 Degrees of Freedom

Proc. 11th Int. Conf. Assembly Automation, 1990.

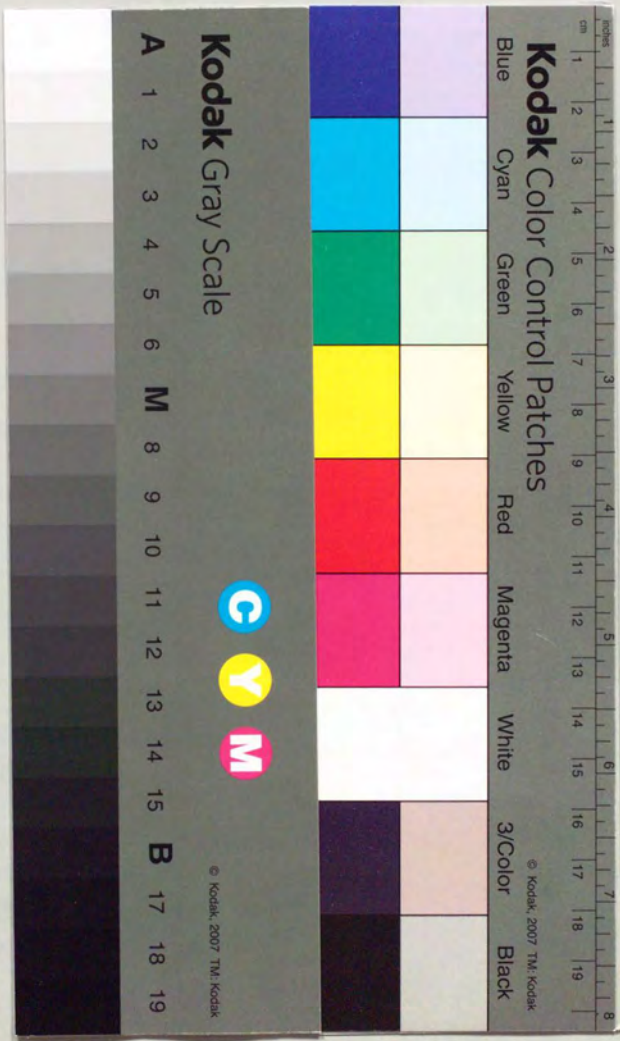
【その他】

新井民夫、大隅久：

小型ロボットによる懸垂重量物の組み立て

東京大学工学部紀要A No.24, pp.18-19, 1986.





Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM, Kodak