

簡易産業用ロボットに関する研究(第4報)

新技術応用部 藤沼 良夫 石川 友彦

1. 緒言

産業用ロボットはその用途が多岐にわたるにつれ、動作速度、位置精度などに厳しい要求がされるようになってきた。また、組立て作業などではロボットの手先の器用さも要求され、速度、位置のみならず各種のセンサ利用とあわせて、力制御も必要不可欠のものとなりつつある。

当センター試作のマニピュレータは、簡易産業用ロボットに関する研究(第3報)1)で紹介しているように、その制御部の構成は、各関節ごとの位置および速度のフィードバックによるサーボ機構の部分をアナログ的(空気圧駆動マニピュレータ)に、あるいは、デジタル的(DC サーボモータ駆動マニピュレータ)にハードウェアで組み、それに目標指令値を与えるという形式のものである。従って、動作速度、位置精度、フレキシビリティ等の厳しい要求に対応することができない。これらの要求に対応するには、制御部をコンピュータにサーボイング機能を持たせたソフトウェアサーボ方式が有効であるとされている。2)

本報では、PI(比例+積分)制御方式によりソフトウェアサーボ系を構成し、マニピュレータの速度制御、位置制御、力制御の基礎実験を行ったので報告する。

2. 実験システムの構成

2.1 実験機の概要

実験機は DC サーボモータ駆動の 2 自由度の関節型マニピュレータである。各関節はギヤにより 1/100 に減速しており、速度、位置、軸トルク検出用としてそれぞれタコジェネ、ポテンショ、歪ゲージが取り付けられている。このマニピュレータの座標系は図 1 に示すように、x 軸方向に伸ばした状態を初期状態とし、反時計方向回転を正としている。

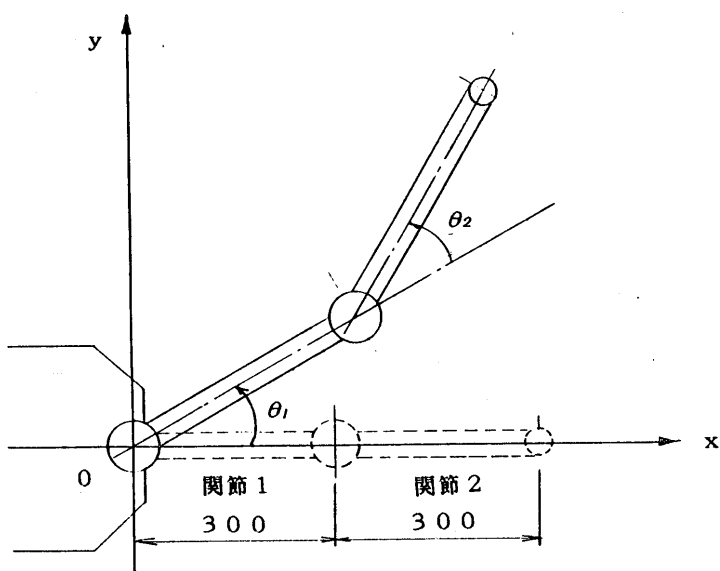


図 1 座標系

2.2 システムの構成

図2にシステム構成図を示す。制御用コンピュータとして、アイ電子測器(株)のAIDACS-4300Aを使用し、DCモータの駆動はD/Aボード、駆動用アンプを介して電圧を指令する。一方、DCモータの出力端の速度、位置、軸トルクは、バッファアンプを介してA/Dボードへ取り込み、コンピュータ内部で処理し、ソフトウェアサーボ系を構成している。

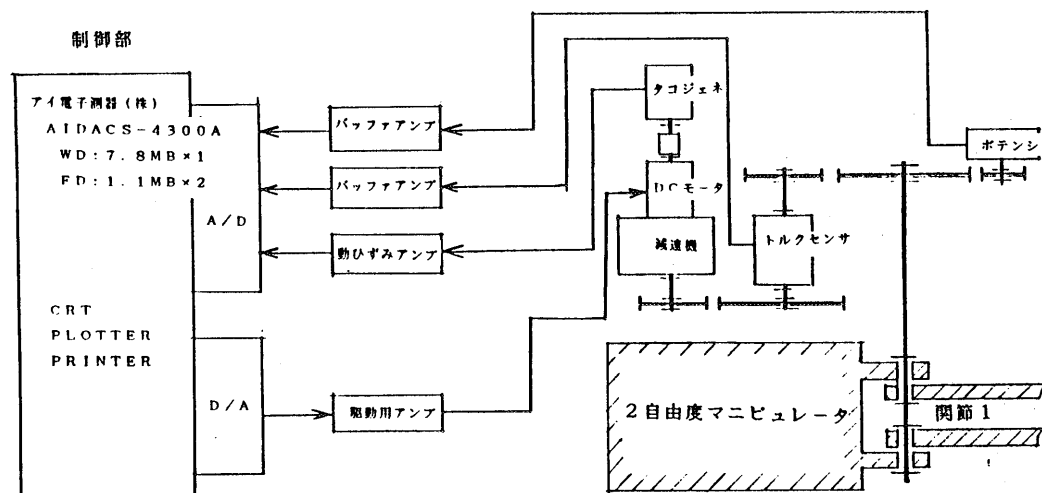


図2 システム構成図

3. 速度制御

PI速度制御を行うにあたり、ここでは、まずステップ応答によりこの制御系を数式近似し、その結果から、最適応答ゲインを求める式(アナログ系)を用いてPIゲインを求め、³⁾波数応答を行った。

3.1 ステップ応答

図3にステップ応答を求めるブロック図を示す。各関節ごとにD/Aボードからステップ電圧 V を出力し、そして、タコジェネからの速度データをA/Dボードに取り込むことによりステップ応答を求めた。

ステップ電圧を2 voltとしたときの関節2のステップ応答の結果を図4に示す。

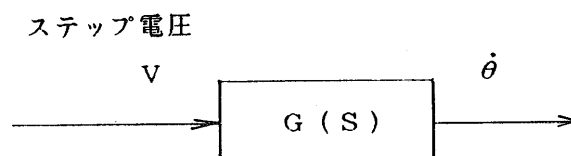


図3 ステップ応答を求めるブロック図

この制御系の伝達関数 $G(S)$ をむだ時間のある一次遅れ系として次式(1)で近似すると、図4より式(1)の各係数は表1のように求めることができる。

$$G(S) = \frac{K e^{-sL}}{1 + sT} \quad (1)$$

K : ゲイン
T : 時定数
L : むだ時間

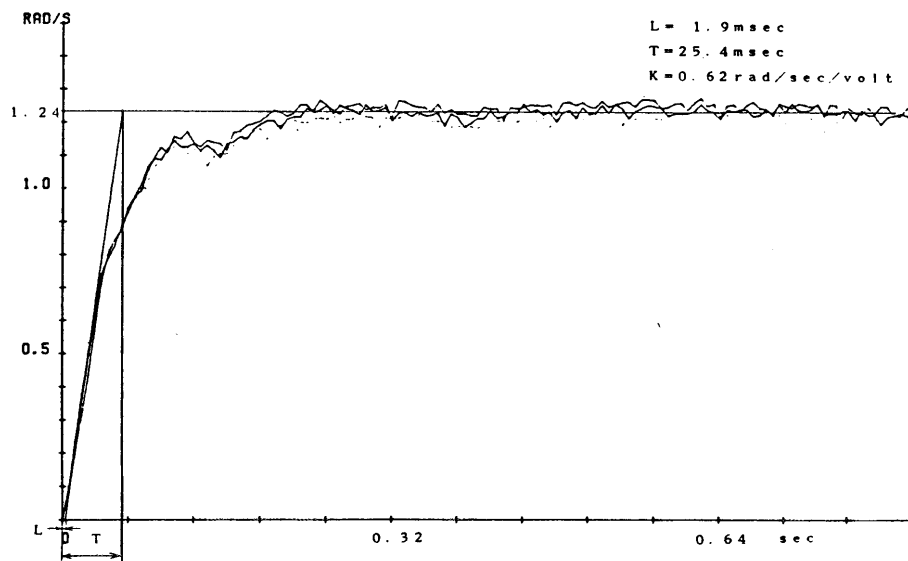


図4 関節2のステップ応答

表1 伝達関数の係数値

	関節 1	関節 2
K (rad/sec/volt)	0.51	0.62
T (msec)	21.4	25.4
L (msec)	1.5	1.9

3.2 PIゲイン

この制御系の比例ゲイン K_P , 積分ゲイン K_I は, ステップ応答から最適応答ゲインを求める次の式(2), (3)で計算した。その結果を表2に示す。

$$K_P = \frac{0.35 T}{KL} \quad (2)$$

$$K_I = \frac{K_P \Delta T}{1.2 T} \quad (3)$$

ΔT : サンプルングタイム

表2 速度制御用PIゲイン

	関節 1	関節 2
K_P (volt/rad/sec)	9.79	7.55
K_I (volt/rad/sec)	1.18	0.77
サンプルングタイム	3.1 msec	

3.3 PI 速度制御

数式近似で、PIゲインが決まったので、図5に示すようにAIDACS-4300Aにサーボイング機能を持たせたデジタルPI速度制御を行った。

図6に関節2の速度の周波数応答を示す。図6は目標値として0.25Hz, 0.5Hzの正弦波を入力したときの応答を示したものであり、各関節とも10Hzまで追従している。

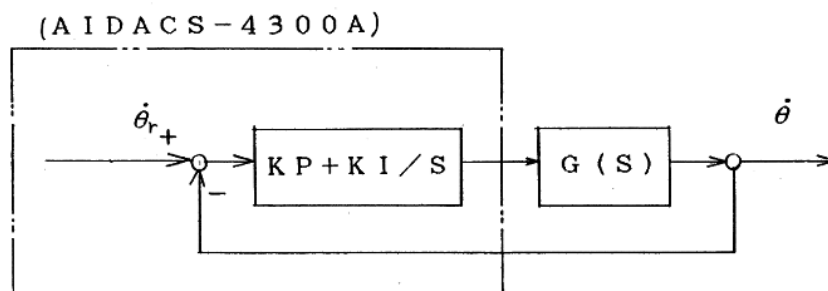


図5 PI速度制御のブロック図

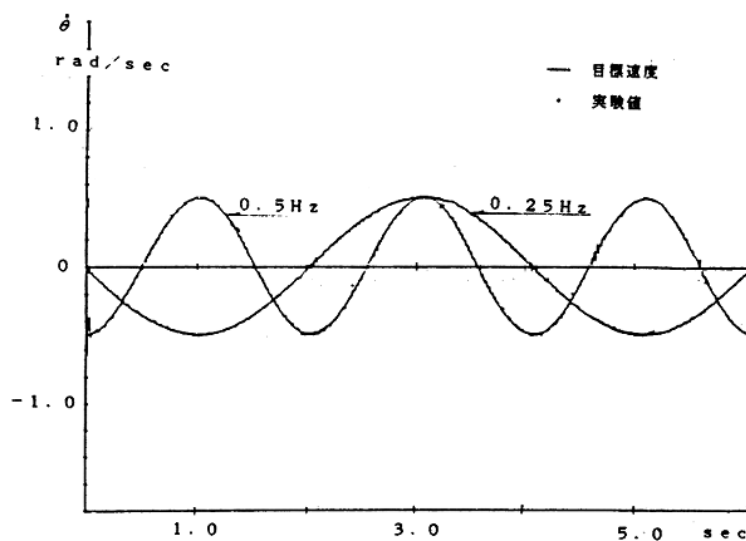


図6 関節2の周波数応答

4. 位置制御

ここでは限界感度法により⁴⁾、PIゲインを求めている。その上でここで求めたPIゲインを使って、まずステップ応答を行い、PIゲインが正しいか否かを確認し、位置制御を行った。

4.1 限界感度法

限界感度法は、比例(P)制御によるステップ応答を行い、その時のPゲインを徐々に上げていくと、あるゲインのときに系が一定周期で発振する。このときの比例ゲインを限界速度 K_{cu} といい、このときの周期を振動周期 P_u という。この K_{cu} と P_u により比例ゲイン及び積分時間は次式(4)、(5)により

求めることができる。

$$K_P = 0.45 \text{ Kcu} \quad (4)$$

$$T_i = 0.83 \text{ Pu} \quad (5)$$

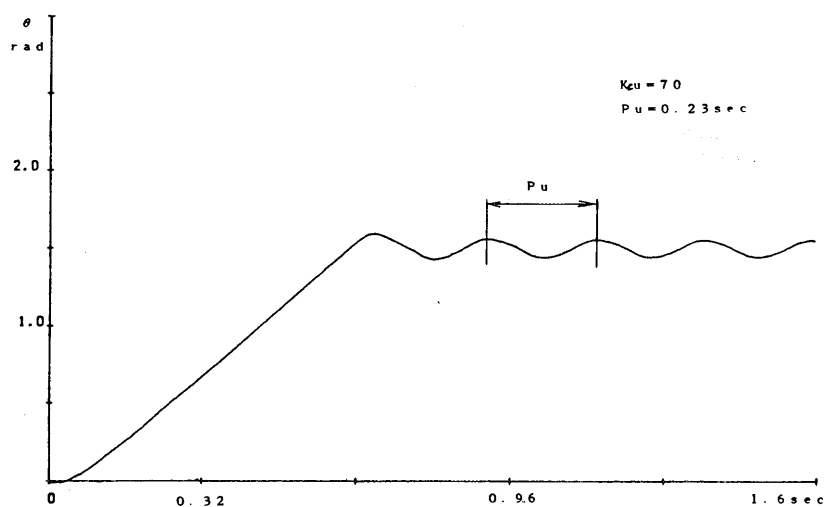


図7 関節2の限界振動

図7に限界感度 $K_{cu}=70$ のとき一定周期で発振している関節2の限界振動の状態を示す。この図から振動周期 $P_u=0.23$ を求めた。表3にこのとき式(4),(5)により求めた比例ゲイン及び積分時間を表に示す。

表3 位置制御用PIゲイン

	関節1	関節2
K_P (volt/rad)	22.5	31.5
T_i (sec)	0.223	0.191
サンプリングタイム	6.4 msec	

4.2 ステップ応答

限界感度法によりPI位置制御ゲインが決まったので、図8に示す位置制御ブロック図によりデジタルPI位置制御のステップ応答を行った。その結果を図9に示す。図9は関節2のステップ応答であるが、目標値1.5radに0.9秒で収束していることがわかる。

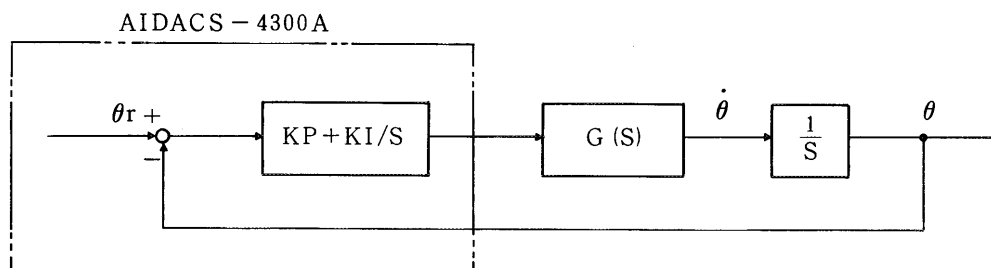


図8 PI位置制御のブロック図

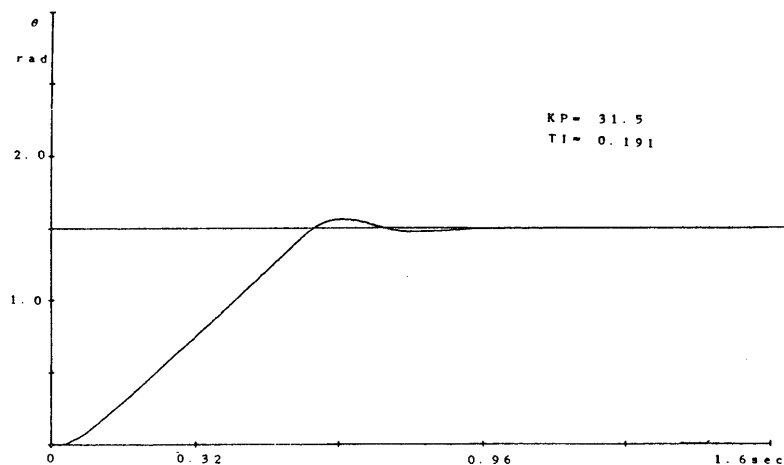


図9 位置のステップ応答(関節2)

4.3 PTP制御

動作経路の制御方式には、位置決め点のみを制御対象としその点に向かう動作の経路については特に制御しない PTP 制御(point to point)と、位置決め点のみならず連続した動作経路も制御対象とする CP 制御(continuous path)の2つに大別できる。ここでは、直線軌道として始点と終点を与え、その線分を N 等分してそれらの各点を目標値として通過するように制御する PTP 制御を行った。

制御プログラムのフローチャートを図10に示す。ここでは、まず始点と終点の位置座標(x, y)を入力する。次に分割点数 N を入力する。N 分割された手先の目標座標(x_i, y_i)は、座標変換によりそのときの目標関節角度を(θ_{1i}, θ_{2i})とすると、次式の(6), (7)で表わされる。

$$\begin{cases} x_i = l \{ \cos \theta_{1i} + \cos (\theta_{1i} + \theta_{2i}) \} \\ y_i = l \{ \sin \theta_{1i} + \sin (\theta_{1i} + \theta_{2i}) \} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \cos \theta_{2i} = \frac{x^2 + y^2 - l^2}{2l^2} \\ \sin \theta_{2i} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{2i}} \\ \theta_{2i} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_{2i}}{\cos \theta_{2i}} \right) \\ \theta_{1i} = \tan^{-1} \left(\frac{(1 + \cos \theta_{2i})y_i - \sin \theta_{2i}}{(1 + \cos \theta_{2i})x_i + y_i \sin \theta_{2i}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

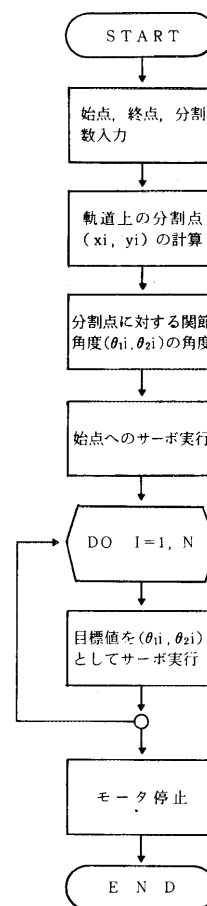


図10 PTP制御フローチャート

図11は表3の比例ゲインを修正して実行したPTP制御である。図11の(a)は始点(600,0),終点(0,400)として50等分したときの軌道を表わしており、実線が目標軌道、点が実際の通過点を示している。図11の(b)はそのときの目標角度と実際の関節角度を示している。この図から、50等分した目標値の各点を確実に通っていることがわかる。

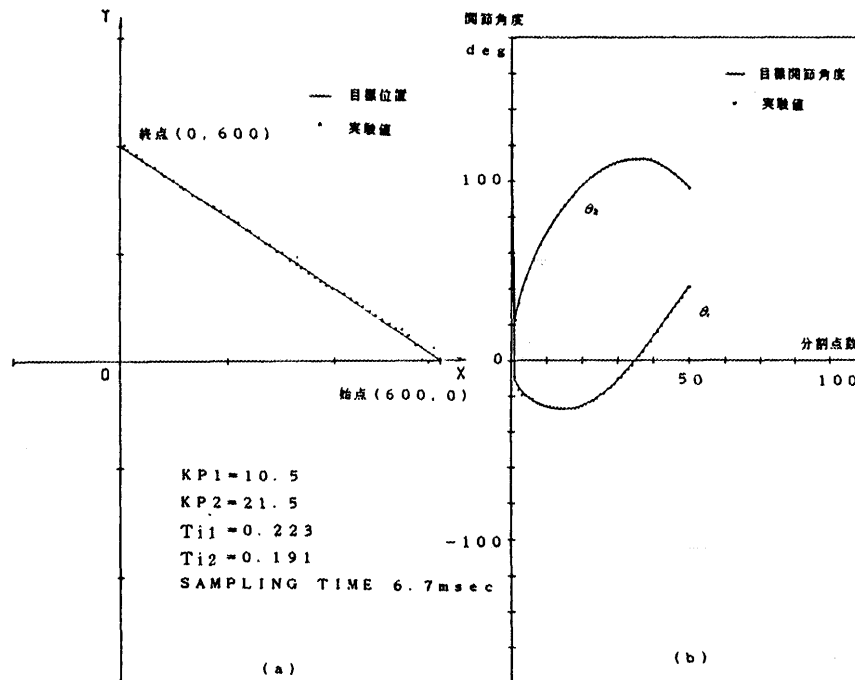


図11 PTP制御

5. 力制御

力制御は、まず動歪アンプを較正し、トライアンドエラーによりPIゲインを求めた。

5.1 動歪アンプの較正

各関節には歪ゲージが4枚取り付けられており、ブリッジ回路を組み動歪アンプを介することにより、アームの軸トルクをA/Dボードよりコンピュータに取り込むことができる。動歪アンプの校正は、アームの先端に滑車を介して500gの錘りをつり下げ、そのときのA/Dへの入力を

関節1 $0.1\ kg \cdot m/volt$

関節2 $0.05kg \cdot m/volt$

となるようにゲインを調節した。

5.2 ステップ応答

実験は両関節を固定した状態で、目標トルクを与え、ステップ応答を行った。力制御用PIゲインはトライアンドエラーにより求めた。即ち、まずPゲインを徐々に上げていき最も応答性が良いと思わ

れるPゲインを見付け出す。Pゲインだけではオフセットを生じるので、I動作を少しずつ加えていく。これを繰り返し行うことによりPIゲインを見付け出した。

図12はこのようにして見付けたPIゲインを使用してのステップ応答である。KP=20, KI=0.05のとき、目標トルク $0.1\text{kg}\cdot\text{m}$ に1.5秒で収束していることがわかる。

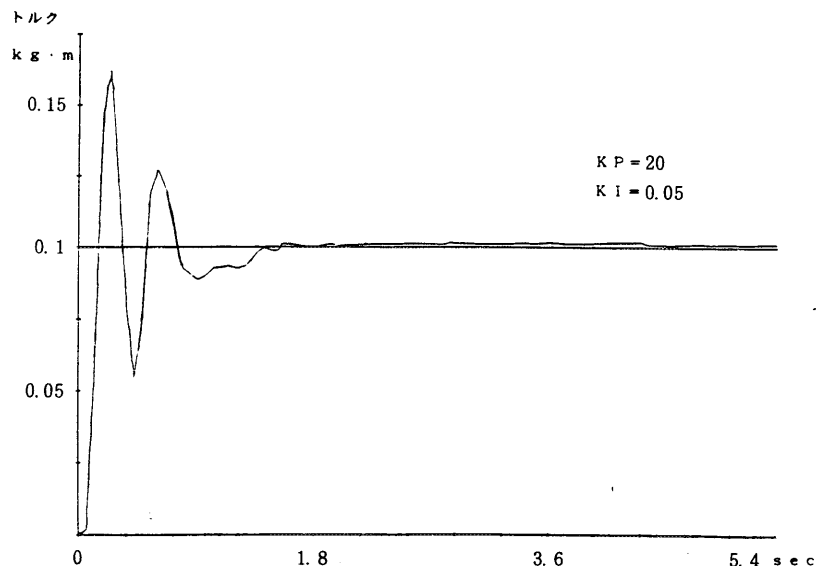


図12 力制御のステップ応答(関節2)

6. 結 言

PI制御方式によりソフトウェアサーボ系を構成し、マニピュレータの速度制御、位置制御および力制御の基礎実験を行ったところ、概ね良好な応答特性を得ることができた。

速度制御では、アナログ系の最適応答ゲインを決定する式よりPIゲインを導き出し、速度の周波数応答を行った。その結果10Hz位まで追従できる速度サーボ系を構成することができた。

位置制御では、限界感度法によりPIゲインを導き、PTP制御を試みた。マニピュレータの動きは直線軌道に対してややギクシャクした動きであったが、目標位置を確実に通過する制御を行うことができた。今回の位置制御は位置情報のフィードバックのみで安定した制御を行えたが、一般には位置フィードバックのみでは系が不安定になるといわれており、その補償要求として速度のフィードバックを行うと安定するといわれている。5) 今後はこの点も考慮に入れる必要がある。

ハンドリングや組立作業では、マニピュレータの手先が何らかの制約を受けつつある方向に力を加えたり、移動したりしなければならないことが多い。力制御は本来このような位置制御と力制御を同時に行わなければならないような作業要求を満たす制御方式(位置と力のハイブリット制御方法)²⁾として使われる場合が多い。しかし今回は、トライアンドエラーによりPIゲインを決定し、ステッ

ブ応答を行うに滞ってしまった。今後検討の余地がある。

以上の実験は AIDACS-4300A を制御用コンピュータとし、CP/M86 上で FORTRAN とアセンブリ言語を使用して行った。一方、本年度から始まった先端技術研修「産業用ロボット技術課程」では、市販のパーソナルコンピュータを使って BASIC でマニピュレータを動かす実習を行う必要があった。この実習は困難を極めたが、ORT 研修生の(株)伊藤鉄工所・伊藤佐市氏のご協力のもとに BASIC での位置制御を FORTRAN と同程度に制御できることを実証してくれた。このことを特に記して感謝の意を表します。

最後に本研究は、工業技術院機械技術研究所の新井健生氏のご教示を賜ったことを記し、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤沼ら: 簡易産業用ロボットに関する研究(第3報) 茨城県工業技術センター研究報告
第14号
- 2) 日本機械学会編: 産業用ロボットとその応用
- 3) 高橋安人: システム制御
- 4) 計測自動制御学会編: デジタル計装制御システム
- 5) 見城尚志: 小型モータの基礎とマイコン制御