

教育用ロボットアームのパソコンによる制御

(第3報)

松井 稜治*

A Control Method of an Educational Robot Arm by a Personal Computer

Ryoji Matsui

Abstract

In this report, a robot arm with some simple sensors controlled by a personal computer is discussed. It holds an object smoothly by using some informations from sensors. Especially, three reflected type optical-sensors attached to the hand are useful to hold the object. One is used as a proximity sensor and the others are used to detect the interval between the object and the fingers.

Here, the system configuration, sensor characteristics, a control algorithm and the result of experiments are shown.

1. まえがき

従来、産業用ロボットは予め教示された動作を繰り返すプレイバックロボットが主体となっていた。最近では各種のセンサを取り付けることにより、より高度な動作を実現するべく研究開発が進められつつある。本実験室でも教育用ロボットに簡単なセンサを取り付けて、融通性、汎用性を増すための実験研究を行ってきた。

前報では、超音波センサによる対象物の位置の推定、透過形の光センサによる対象物の高さの推定、マイクロスイッチによる把握の確認などについて報告した。この場合、超音波センサによる対象物の方向検出に誤差を含むため、対象物をハンドのセンタから偏った状態のまま把握しようとする、円滑な把握が行われないことがあった。即ち、ハンドと対象物の相対的な位置関係を適正にする必要が生じた。この目的のため、ハンドに距離測定可能な反射形の光センサを3個取り付け、より円滑な把握を試みた。

2. ロボットアームの構造及びシステム構成

ロボットアームは市販の教育用ロボットアーム・ムーブマスタ RM-101を用いた。構造の概略図を図1. に示す。これは多関節形のロボットアームで、各関節はステップモータにより駆動されている。これらはパソコンのプリンタインタフェースを介して接続されていて、BASICのLPRINT文により制御される。但し、モータの回転に関しては各関節角の値はフィードバックされていない。即ち関節角の動きはフィードバック制御されていない。

各センサ情報、センサ駆動信号はパラレルインタフェースIC 8255を介して、入力又は出力される。そのシステム構成は図2. に示される。

3. センサ及びその特性

前節のシステム構成図のうち、超音波センサ、LED0, Ph.Tr.0 (フォトトランジスタ) から成る透過形センサ (その目的によりここでは存在確認センサと呼ぶ) 及びマイクロスイッチについての詳細は前報を参照されたい。

*宇部工業高等学校機械工業科

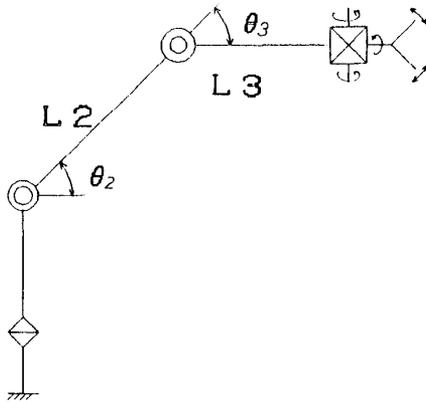


図1 ロボットアーム構造概略

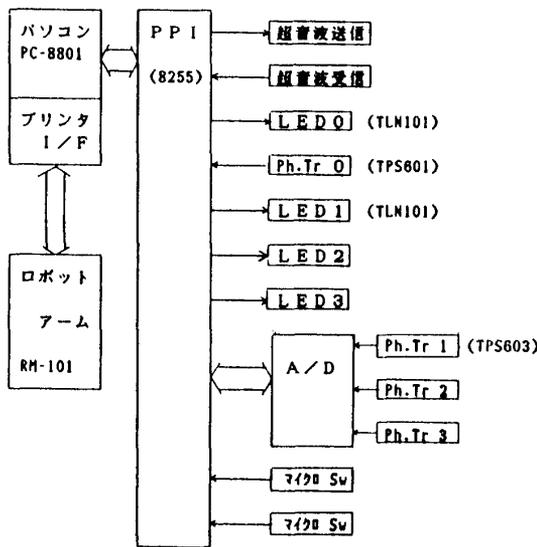


図2 システム構成図

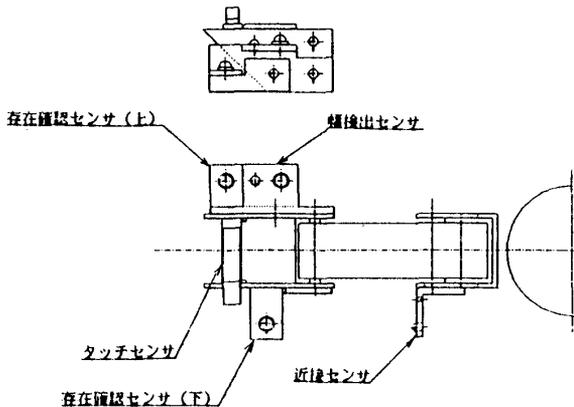


図3 センサ取付図(手先部)

概略に述べると、超音波センサは対象物とロボット本体との間の距離を検出するために用い、分解能は約2mm測定範囲は175~500mm程度である。なお、反射時間に比例するカウント数を機械語のプログラムでは8ビットのデータとしているが、16ビットにすることにより、上限を上げることができる。

存在確認センサにはLED, Ph. Tr. 共指向性の強いTLN101, TPS601を用いて、対象物の高さを検出する。

反射形の光センサは、LEDは存在確認センサと同じTLN101を用い、フォトランジスタは広域検出形のTPS603を用いて構成した。LEDからの光を対象物が反射し、その反射光をフォトランジスタが受光し、これを電圧に変換してA/D変換(8ビット)する。なおLEDの点灯にはSN75461を用いた。このような光センサを図3のようにハンドに3個取り付け付けた。LEDとフォトランジスタの間隔はいずれも8mmである。このうちハンドグリップの上部に取り付けたものは、対象物とグリップとの間隔を検出し、対象物の幅を推定するのに用いるので幅検出センサと呼ぶ。一方、ハンド根元に取り付けたものは、対象物とアームが適正な距離を保つために、即ち近接し過ぎたり遠ざかり過ぎたりしないようにするために用いるので近接センサと呼ぶ。

これらのセンサと白い発泡スチロールの対象との間隔とA/D変換後のカウント数(0~255)との関係を実験により確かめた。結果を図4~6に示す。但し、周囲の明るさの影響を軽減するため、カウント数はLED点灯時のカウント数からLED消灯時のカウント数を差し引いたものである。図の実験データの場合、周囲の照度を数lx程度にして消灯時のカウント数がほぼ0となるような状態(基準状態)で実験を行った。幅検出センサはグリップ把握面より6mm後方に取り付けられていることを配慮して15mm以上の範囲のデータを、近接センサは10mm~65mmの範囲のデータを曲線で近似した。この場合光の強さが距離の2乗に反比例することを考慮して、近似式は次の形をしているものと仮定した。

$$y = C_y + \{C_z / (x - C_x)\}^{Np} \tag{1}$$

ここでNpは2の近傍の値とした。また、実験点の個数が少ないことと誤差のあることを考慮すると、4個のパラメータは多過ぎるので、このうちの2個のパラメータNpとCxは固定して、Cy, Czを変化させて最適点を見つけることにした。この時評価関数は次式を用いた

$$\{y_i - y(x_i)\}^2 + q \{x_i - x(y_i)\}^2 \tag{2}$$

ここで $\{x_i, y_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) は実験データで、

$$x(y) = C_x + C_z / (y + C_y)^{1/NP} \quad (3)$$

である。ここで(2)式を評価関数としたのは次の理由による。

本来、実験データの近似のみの精度を重視するのであれば第1項のみを評価関数とすればよいとおもわれる。確かに本実験データの場合そのような関数を用いると y の大きい部分即ち x の小さい領域では良い近似が得られるものと思われる。一方、この近似結果は(3)式の形に変形して y の値から x の値を推定するのに利用される。その場合、 y の小さい部分即ち x の大きい領域で、 x の推定誤差が大きくなることが考えられる。従って近似範囲の全領域にわたっての様な精度の近似を得るには上記のような2項から成る評価関数を用いる方がより良いとおもわれる。

パラメータ最適化にあたっては評価関数が2項からなることと、近似式が(1)式や(3)式のような逆数形をしているため通常の最小2乗法は使えない。そのためここではZangwillの共役方向法にもとづく手法(文献(2), (3)参照)を用いてパラメータ最適化を行った。

$q = 1$ として、幅検出センサについては $C_x = 0$, $NP = 2$, 近接センサについては $C_x = -2$, $NP = 1.95$ として得られた近似曲線が図4~6に示されている。前述のように幅検出センサについては $X = 10\text{mm}$ のデータは評価に入れていないので、この点だけが近似曲線から離れている。この点を除くと x については 1mm 以内の近似精度となっている。なお、これらの近似曲線におけるパラメータの値はそれぞれ次のようになった。

幅検出センサ (右) $C_z = 114$, $C_y = -1.2$

(左) $C_z = 112$, $C_y = -0.1$

近接センサ $C_z = 130$, $C_y = 1.7$

これらのデータはもちろん周囲の明るさや温度などの環境条件により変化する。周囲の明るさについては前述のようにLED消灯時のA/D変換値を差し引くことにより、その影響は緩和される。また突発的な外乱に対しては連続的に10回データを取って平均化することによりその影響を軽減している。なおA/D変換は機械語により行っていて、ソフトの所要時間を含めて、変換に必要な時間は1データあたり約0.2mm Sである。

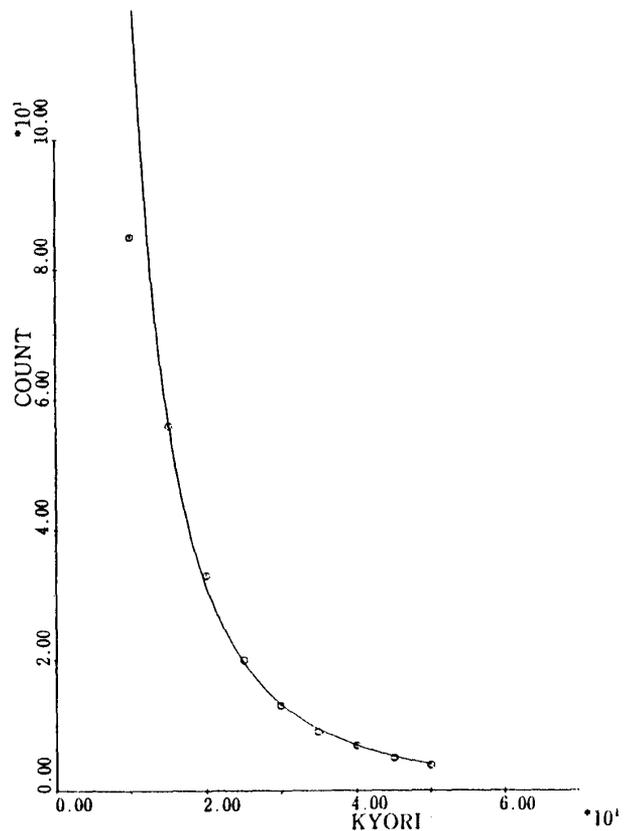


図4 幅検出センサ (右) 特性

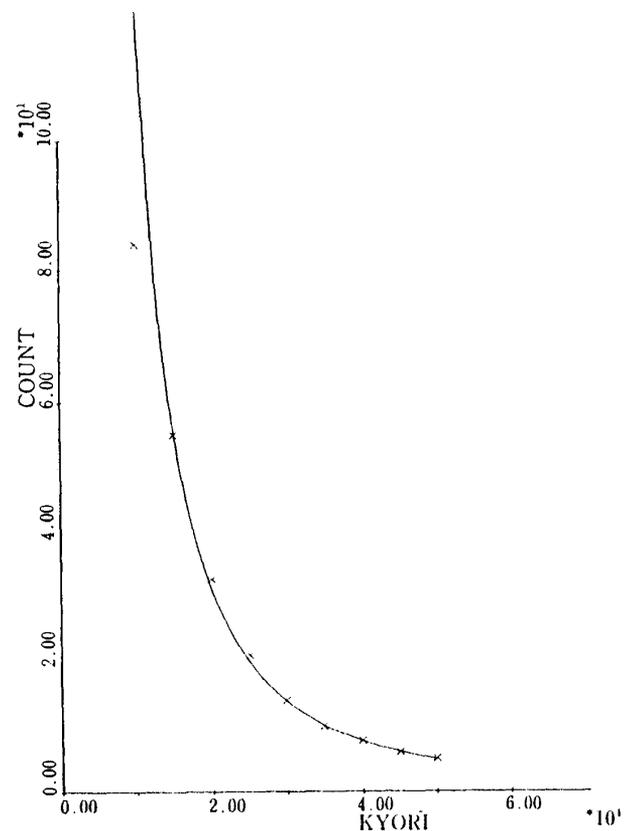


図5 幅検出センサ (左) 特性

4. 制御手法および実験結果

ここでは、ロボットアームの前方の把握可能な領域に白い発泡スチロールの直方体が置かれており、それを把握することを問題として設定した。

概略の制御の手順は次のようになる。

- 1) 超音波センサを利用して対象物のある方向とロボットアームからの距離を推定する。
- 2) 1)の結果を用いてアームを対象物の方向に向け、ハンドを対象物近傍へ近づける。
- 3) 存在確認センサを利用し、垂直移動と水平移動とをくみ合わせて、対象物の高さを推定し、対象物中央部にハンドを移動する。
- 4) 近接センサを用いてハンドと対象物との相対的距離を適正にする。
- 5) 幅検出センサを利用して、対象物がグリップ中心に位置するように、アームの回転によりセンタ合わせをする。ここで対象物とハンドとの相対的距離が適正範囲をはみ出したら4)に戻る。
- 6) マイクロSWが動作するまでハンドを閉じて把握する。

以上の手順の流れ図を図7に示す。

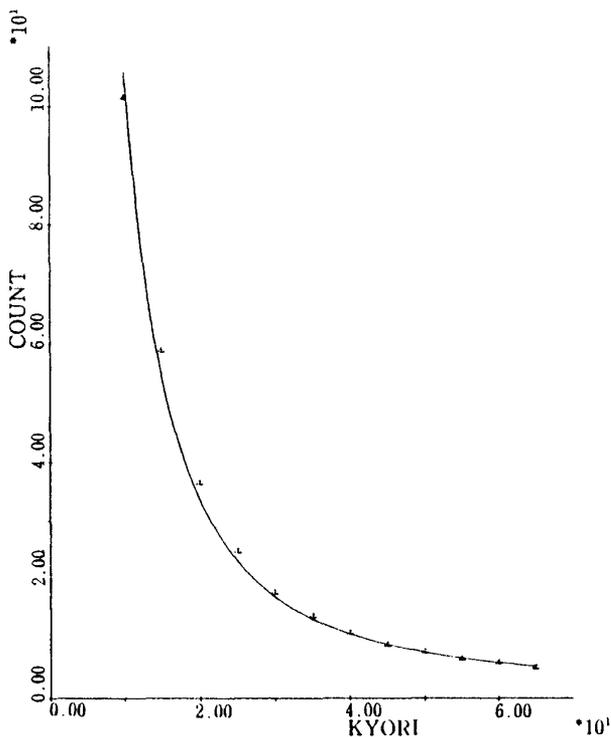


図6 近接センサ特性

4.1) 超音波センサによる方向探索の手法

1) の方向探索は広域、局所方向探索の2段階に分かれている。広域方向探索によりひとまず対象物のある方向が分かれば、アームの回転キザミ角度を小さくして(0.8°)、反射の限界方向を検出し、その両端の中心を仮のセンタとする。アーム回転中心と対象の中心との距離をXとすると中心から θ の角度における距離は $X / \cos \theta$ になるはずである。ところが超音波センサを用いた実験においては両端に近づくほどこの値より大きくなった。とくに両端部では異常に大きくなることがあるので、そのような値を除くため、比例定数を乗じてその値を超えたものは無効とみなすことにした。このようにして得られた有効なデータの両端角を求めて、その中心を真のセンタとしてこの方向を対象物の方向と定めた。

これらの両端角と対象物の幅とは幅30mm~60mmではほぼ比例関係をしていて、幅の推定に利用できるが、誤差が大きくこの値のみで推定を行うことはできない。従って、ここでは利用しないことにする。

4.2) 高さ検出の手法

存在確認センサは指向性が高いのでハンドの内側に対象物があるか否かを約1mmの幅の中で検出することができる。これを利用してハンドを垂直方向に動かして存在確認センサの受光と遮光との境界を見いだすことにより高さの推定を行う。

この時の垂直移動や水平移動は次のような方法による。ハンドの動きは基本的にはPoint-to-Pointであるが、ここではキザミ幅を小さくとることにより、近似的に直線的な動きを実現することにする。

今、肩・手首間の水平距離をX、肩を基準とする手首の高さをZとすると、図1の L_2 、 L_3 、 θ_2 、 θ_3 を用いて

$$d\theta_2 = -dZ \sin(\theta_2 - \theta_3) / L_2 \sin \theta_3 \quad (4)$$

より θ_2 の変化分を求め、(dZ:垂直移動キザミ幅)

$\theta_2 \leftarrow \theta_2 + d\theta_2$ とし、

$$Ct = (Xc - L_2 \cos \theta_2) / L_3 \quad (5)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + \tan^{-1}(\sqrt{1 - Ct^2} / Ct) \quad (6)$$

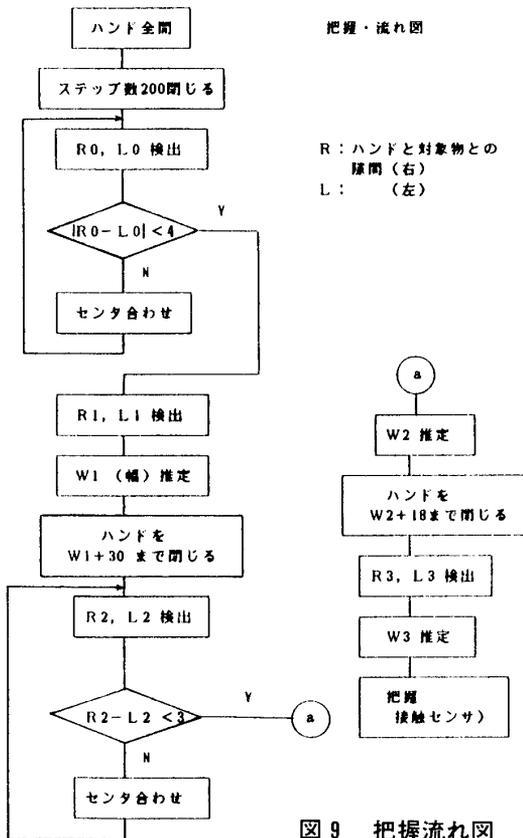
より次の点 θ_3 を求める。これらの変化に応じて各関節部のモータを必要なステップ数だけ駆動すればよいわけである。なお、ハンドと対象物の距離が適正でなく存在確認センサが垂直移動によって対象をとらえられなかった場合は、下限において水平移動して、対象の存在を確認

との距離は15mmとなる。この部分は周囲の明るさの変化による影響も小さいので、幅推定の精度も良好になることが期待される。

このアルゴリズムに関して把握の予備実験を行った。その実験例を表1に示す。この表でDは近接センサによる距離の推定値、W1, W2, W3はそれぞれ各段階の幅推定値である。近接センサについては周囲の暗い場合がより良い結果を与えているが、幅推定の方は周囲の明るさにそれほど影響されていない。

4.4) 実験結果および考察

以上のような各手法を総合して、前述の手順(図7)によりプログラムを作成し、対象物としては、幅29.7, 39.7, 50mmの発泡スチロールの直方体について実験を行ったところ、把握は円滑に行われた。この時の超音波センサ、光センサによる各推定値の例を表2に示す。



超音波センサによる距離の推定値の誤差は分解能の範囲内に納まっている。本処理方法ではソフトウェアタイマを使っていることや発振周波数の関係もあって、これ以上の分解能を得ることは困難である。更に高精度のデータを得るには他の方法、例えば、位相差を用いる方法などが必要となろう。

一方、近接センサを利用した距離の推定値は、超音波

センサによるものに比べて、誤差が大きいように見られる。しかしこの誤差は全て一方に偏っていることに注意しなければならない。ここにおける距離の値は、ロボット自身の回転中心軸から近接センサ取り付け位置までの距離と近接センサによる検出値とを加えたものである。ところが前者はロボット自身があたえられたステップ数だけ忠実に動いたものとして、計算により算出しているのに対し、実際の距離を測定したところ把握位置では約5mmの誤差のあることがわかった。従って近接センサを利用した距離測定の精度を向上させるにはロボット自身の位置制御が必要となる。

対象物の方向の推定値に関しては、超音波センサによるものより幅検出センサによる値の方が精度が良い。即ちいずれの場合も、幅検出センサにより方向の修正が行われたことがわかる。

存在確認センサによる高さ推定はこの例では全て1mm以内の誤差になっているが、場合によっては1mmを超えることもあった。しかしいずれも2mm以内には納まっていた。

幅検出センサによる幅推定は第1段階の推定はやや誤差が大きく、第2, 第3段階の推定は大体において2mm以内の誤差となっていた。ただし実験例2では誤差が5mm以上あったが、自作グリップの開きが広がっていたことによるものであることがわかった。実験例3以下は開きの算出式を修正した結果である。実験例2の場合も推定値に誤差があるものの、対象物と幅検出センサとの位置関係は大差なく、把握は円滑におこなわれている。しかし幅推定値の信頼性を増すにはグリップの位置制御が必要となる。

この例でも、4.3)と同様に周囲に明るさの違い(2~50lx)による幅推定はそれほどの影響を受けていないように思われる。この理由としては、前述のようにLED消灯時の値を差し引くという操作を行っていることもあるが、対象物自身の影によりセンサ近傍の照度が小さくなっていることも考えられる。

超音波センサによる幅推定は場合により10mm程度の誤差があり、把握にさいしては利用していない。

把握時の写真を写真1, 2に示す。写真1は把握初期位置で、向かって左側の隙間が右側に比べ大きいことがわかる。写真2は幅検出センサを利用してセンタ合わせを行い、左右の隙間の調整が行われている。

以上、距離や幅の推定値の一部に誤差があるものの、初期の目的である決められた対象物の簡単なセンサによ

る円滑な把握には一応成功したといえる。ただし、今後には次のような問題が残されている。

第1に、推定値の精度の向上のためには、ロボット自身の位置に関するフィードバック制御が不可欠である。

第2に、反射型の光センサの場合、対象物や環境条件により大きく特性が変化するため、適応性或は学習性を持たせる必要がある。その場合、変化に対応するため分解能を上げる必要が生じると思われるが、その時はA/D変換も12ビットのものが必要となろう。

	対象物幅 mm	距離 mm	照度 lx	推 定 値			
				D	W1	W2	W3
1	29.7	25.0	5	23.9	29.5	30.1	29.4
2	39.7	25.0	5	24.5	36.4	39.3	38.8
3	29.7	25.0	30	23.0	34.0	32.1	30.2
4	39.7	25.0	30	23.3	41.7	40.8	39.6

表2 実験結果例

対象物幅(W): 50mm, 高さ(H): 190mm, 距離(D): 350mm, 方向(θ): 10°

	照度	推 定 値									
		超音波		光			セ			ン	
		Du	θu	Do	θo	H	W1	W2	W3		
1	2	348.7	10.8	346.2	9.72	189.0	47.3	49.7	49.7		
2	2	348.4	10.8	346.3	9.88	189.0	40.7	43.8	44.1		
3	10	350.4	10.8	346.6	10.0	189.0	45.2	48.3	48.4		
4	50	350.0	10.4	344.6	10.0	189.0	46.3	49.0	48.7		

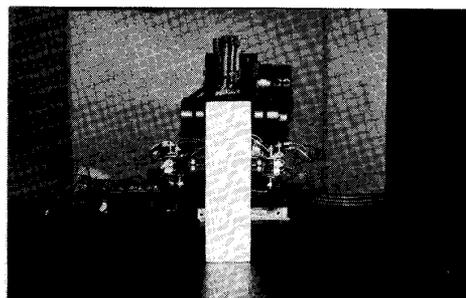
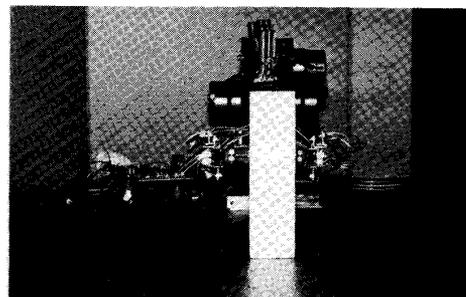
表1 把握部予備実験例

第3に、超音波センサの分解能を向上させるには、本処理方法では殆ど限界にあり、他の手法の導入が必要となる。

その他、対象物の形状の違いなどに対応するためには、高度な画像処理システムなども必要となる。又、本ロボットアームの場合、動作速度が小さく、ダイナミクスは考慮していないが、動作速度の速いような場合は速度制御も必要となる。

最後に、本研究を進めるに当たって、実験システムの製作や実験に多大な協力を頂いた、昭和60、61年度卒業研究の諸君に謝意を表します。

なお、計算、作図にあたって、本校電子計算機室DS-600を用いた。機械語プログラム作成にあたっては、CP/M(デジタルリサーチ)、MACRO80(マイクロソフト)を利用し、A/D変換部には、I/Oボード(マイテック)を利用した。又、作図の1部に、CANDY(アスキー)を利用した。



参考文献

- (1) 松井：教育用ロボットアームのパソコンによる制御 宇部高専研究報告，第32号，昭61
- (2) 松井：PID制御系のISE値，宇部高専研究報告第24号，昭53
- (3) Zangwill, W.I. : Minimizing a function without calculating derivatives, *Comput. J.*, Vol.10, 1967
- (4) 松井：教育用ロボットの制御の1例，宇部高専研究報告，第31号，昭60
- (5) 計測自動制御学会：特集，ロボットアームの制御，計測と制御，Vol.25, No.1, 昭61
- (6) 花房ほか編：ロボットの機構と制御，コンピュータール，No.9, 昭60
- (7) 中嶋：ロボットによる経路ならい作業のための超音波近接センサ，計測自動制御学会論文集，Vol.21, No.12, 昭60
- (8) 若松ほか編：ロボットの制御，計測自動制御学会，昭60
- (9) 榎ほか：周辺装置の製作，アスキー，昭57
- (10) 横田：Z80の使い方，オーム社，昭57
- (11) 栗山ほか：PC-Techknow 8800 Vol 1.1, アスキー，昭58
- (12) 光工業計測研究専門委員会編：光応用計測の基礎，計測自動制御学会，昭58
- (13) マイテック：I/Oボード解説書

(昭和61年10月8日受理)