

# 教育用ロボットアームのパソコンによる制御 (第2報)

松井 稜 治\*

The Control of an Educational Robot Arm by a Personal Computer

Ryoji Matsui

## abstract

This report discusses that a robot arm with some sensors searches the position and the height of an object. In order to search the height, the algorithms for linearly horizontal motion and linearly vertical motion are developed and an optical sensor is used. In order to search the position, the distance information by an ultra-sonic sensor is used.

## 1. まえがき

最近、ロボットにセンサを取り付けて汎用性、融通性を持たせる為の研究が行われ、産業用ロボットにも各種のセンサが取り付けられつつある。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ることにより、汎用性を持たせる為の研究を進めている。前報では、対象物の上面がロボットの肩の高さより上にある場合に対して、その位置の探索と把握を行わせた。今回は、センサの取り付けの改良と距離測定プログラムの修正により位置探索精度の向上が得られ、水平移動、垂直移動のアルゴリズムの開発により肩より低い高さの対象物の把握が確かめられたので報告する。

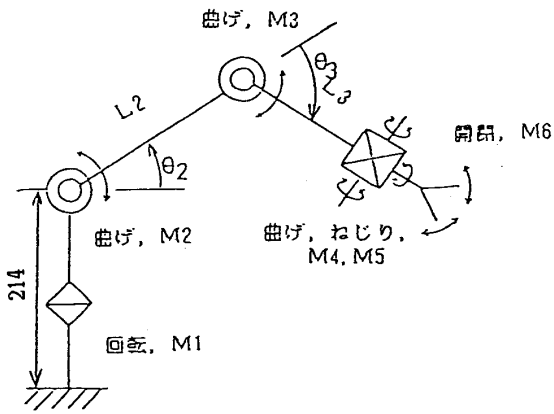
## 2. ロボットアームの構造及びセンサ

ロボットアームとしては前報と同様に市販のムーブマスタ RM-101 を用いた。その構造の概略及び各部モータの仕様は図1.のようになっている。但し、ハンド先端のグリップ部はセンサ取り付けの便宜上、図2.のように改造している。図に示されるようにグリップ部に

LED(TLN 101) とフォトトランジスタ (TPS 601) を向かい合わせて光センサとし、グリップそれぞれにマイクロスイッチ (オムロン SS-5) を取付けて接触センサとしている。グリップは把握時に全開時に比べて最大 10 mm 前方へずれるので、光センサ、接触センサの位置も同様にずれる。図3.に示されるように腰部に超音波センサ (MA40L1S, MA40L1R) が取り付けられ、指向性を上げるために紙製のホーンが取り付けられている。

ロボットアーム及び各センサは図4.に示されるようにパーソナルコンピュータ PC 8801 に接続されている。ロボットアームはプリンターインタフェースを介して接続されているので、BASIC の LPRINT 文により各ステップモータに必要なステップ数を出力することにより駆動する。各センサもパラレルインタフェース用 IC 8255 を通して PC 8801 に接続され、機械語プログラムにより入、出力が行われる。特に超音波センサでは、発信部により発信された超音波が対象物で反射されて受信部で受信されるまでの時間をカウントして距離を求めるので、0.01 ms のオーダの短時間での処理が必要であるため機械語で処理することが不可欠である。前報の機械語プログラムを修正することにより、カウント数と距離との関係は図5.のようになった。このデータを最小2乗法により1次式で近似すると

\*宇部工業高等専門学校機械工学科



- M1: 腕部ステップモータ  
S1 = 0.04° / ステップ
  - M2: 肩部ステップモータ  
S2 = 0.04° / ステップ
  - M3: 肘部ステップモータ  
S3 = 0.08° / ステップ
  - M4, M5: 手首部差動歯車用ステップモータ  
S4, S5 = 0.05° / ステップ
  - M6: 手先開閉用ステップモータ  
80mm / (-2000) ステップ
- L2 = 200 mm      L3 = 150 mm

図1 ロボットアーム構造概略図

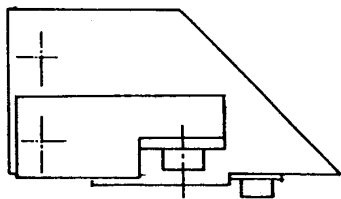


図2 改造グリッパ

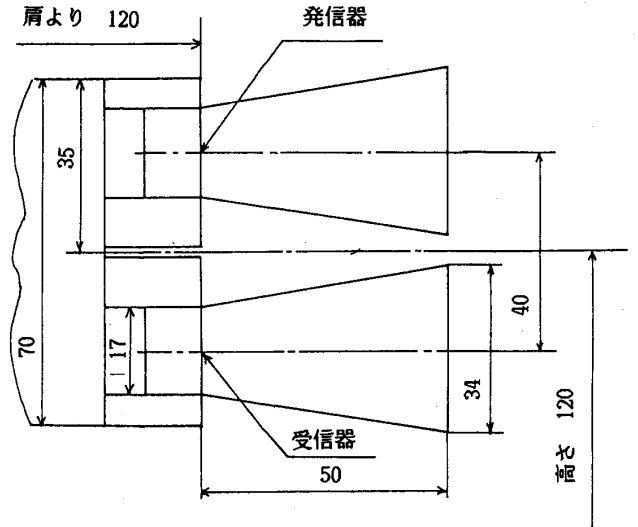


図3 超音波センサ取付図

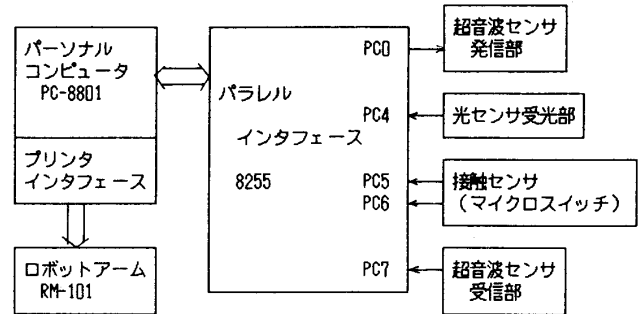


図4 システム構成

センサより対象物までの距離 =

$$1.985 * \text{カウント数} + 94.5(\text{mm}) \text{ at } 31^\circ\text{C}$$

となった。従って、1カウント当りの距離即ち分解能は約2mmとなっている。但し、この結果は距離15mm—600mmの範囲のデータであるが、両端部では残差が2mm以上あるので、この部分を除いて175—500mm間のデータのみをとると残差は最大1.5mm程度となる。両端部における残差は近距離ではホーンの影響により、遠距離では反射波が弱くなるために生ずるものと思われる。

又、音速は温度により変化するので $\theta^\circ$ の場合、 $\sqrt{(273.2 + \theta) / 304.2}$ を乗じて補正しなければならない。

### 3. 水平移動, 垂直移動の手法

後述の動作を行わせるにはアーム手首部の水平移動,

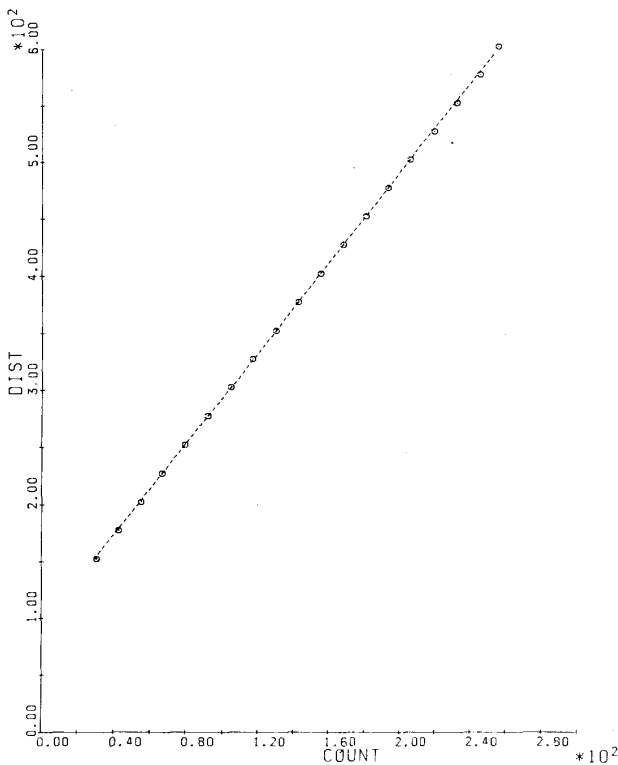


図5 超音波センサによる距離測定

垂直移動のような直線運動を行わせることが必要となる。ところが本ロボットは多関節型であり、動作指令も point-to-point のタイプであるので経路制御はパソコン側で担当しなければならない。

肩部よりロボット手首までの水平距離を  $X$ 、高さを  $Z$  とすると、

$$X = L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos (\theta_2 - \theta_3) \quad (3.1)$$

$$Z = L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin (\theta_2 - \theta_3) \quad (3.2)$$

となる。ここで、 $L_2$ : 上腕部長さ (200 mm),  $L_3$ : 下腕部長さ (150 mm),  $\theta_2$ : 上腕の水平となす角度,  $\theta_3$ : 下腕の上腕延長線となす角度 (下向きを正)

### 3.1 水平移動の手法

#### a) 肩の高さでの移動

前報で示したように

$$\theta_2 = \tan^{-1}(L_2 \sin \theta_3 / (L_3 \cos \theta_3)) \quad (3.3)$$

の関係を保ちながら

$$d\theta_3 = -dX / L_2 \sin \theta_2 \quad (3.4)$$

の量だけ  $\theta_3$  の値を変化させれば、肩の高さでの水平移動が行われる。

#### b) 一般の高さの場合

$Z_c$  の高さで水平移動させるものとする、(3.2) 式において

$$Z = Z_c (\text{const}) \quad (3.5)$$

とにおいて

$$\text{St} = \sin (\theta_2 - \theta_3) = (Z_c - L_2 \sin \theta_2) / L_3 \quad (3.6)$$

とすると、水平移動の場合の  $\theta_2$  と  $\theta_3$  との間には次のような関係が保たなければならない。

$$\theta_3 = \theta_2 - \tan^{-1}(\text{St} / \sqrt{1 - \text{St}^2}) \quad (3.7)$$

一方、(3.1), (3.5) を微分することにより

$$d\theta_2 = -\cos (\theta_2 - \theta_3) * dX / L_2 \sin \theta_3 \quad (3.8)$$

が得られるので、現在位置より近似的に  $dX$  だけ水平方向に移動するには、 $\theta_2$  を (3.8) により  $d\theta_2$  だけ変化させ、新しく得られた  $\theta_2$  を (3.6), (3.7) に代入することにより  $\theta_3$  を求める。なお、 $Z_c = 0$  として式の変形をおこなえば (3.7), (3.8) は (3.3), (3.4) と等価であることがわかる。

ここで注意すべきは、 $\theta_2$  や  $\theta_3$  の変化量はそれぞれ 1 ステップあたり  $0.04^\circ$ ,  $0.08^\circ$  となっているので、これらの整数倍に限られるということである。従って、(3.8) で得られた  $d\theta_2$  は

$$d\theta_2 \leftarrow \text{INT}(d\theta_2 / 0.004 + 0.5) * 0.04 \quad (3.9)$$

のように離散化しなければならない。 $\theta_3$  も同様にしなければならない。以上のことを考慮にいった水平移動の流れ図を図6.に示す。

$Z = -10(\text{mm})$ ,  $dX = 5(\text{mm})$  とした場合のシミュレーション結果を図7.に示す。この場合  $Z$  の値は  $-10.05 \sim -9.94 \text{ mm}$  の間に入っており、誤差は最大  $0.06 \text{ mm}$  である。本ロボットの位置精度が  $0.3 \text{ mm}$  であることを考慮すれば、水平移動に関しては本計算法は十分の精度を持っているといえる。一方、 $dX$  の値は  $4.70 \sim 5.06 \text{ mm}$  となっており、 $Z$  の値に比較して誤差はやや大きいといえる。このことは、(3.8) 式が微分により求められているため、有限の大きさの  $dX$  にたいしてはあくまでも近似表現にすぎないということと  $\theta_2$  や  $\theta_3$  の変化量が離散化されることから生じているものと思われる。従って、 $\theta_3$  の小さい場合は (3.8) 式の形から大きい誤差が生ずることが予測されるので、本計算法ではこのような場合を除いている。しかしながら本手法はあくまでも水平移動のための計算法であるので、本来の目的は  $Z = \text{const}$  にあり、その目的は十分に果たされているといえる。

又、 $\theta_2 - \theta_3$  の絶対値が小さい場合は下腕部が水平になっていて、水平方向にはそれ以上進めないことを示すの

各部のステップ数	$\theta_2$	$\theta_3$	X	Z	dx	Z-Zc
10,-100,-829,-1406,1406,0	41.00	111.32	201.46	-10.03		
10,-13,26,31,-31,0	40.48	109.24	206.47	-9.97	5.01	0.03
10,-14,26,30,-30,0	39.92	107.16	211.42	-9.98	4.95	0.02
10,-14,25,29,-29,0	39.36	105.16	216.12	-9.98	4.70	0.02
10,-15,26,30,-30,0	38.76	103.08	220.96	-9.97	4.83	0.03
10,-16,26,29,-29,0	38.12	101.00	225.72	-10.05	4.77	-0.05
10,-17,28,31,-31,0	37.44	98.76	230.79	-10.01	5.06	-0.01
10,-17,27,30,-30,0	36.76	96.60	235.59	-10.00	4.81	-0.00
10,-18,28,30,-30,0	36.04	94.36	240.50	-9.98	4.91	0.02
10,-19,29,31,-31,0	35.28	92.04	245.49	-9.94	4.99	0.06
10,-20,29,30,-30,0	34.48	89.72	250.39	-10.01	4.90	-0.01

図7 水平移動シミュレーション

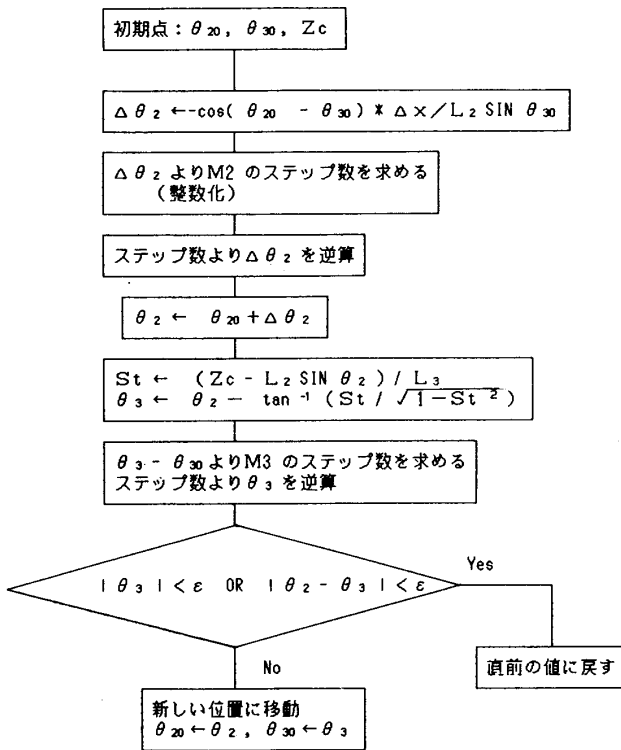


図6 手首の水平移動フローチャート

ので停止させる。

### 3.2 垂直移動の手法

(3.1) 式において

$$X = X_c(\text{const}) \quad (3.10)$$

とすると、垂直移動するための条件は

$$Ct = (X_c - L_2 \cos \theta_2) / L_3 \quad (3.11)$$

とおくと、 $\theta_2$  と  $\theta_3$  との間に次のような関係が保たなければならない。

$$\theta_3 = \theta_2 + \tan^{-1}(\sqrt{1 - Ct^2} / Ct) \quad (3.12)$$

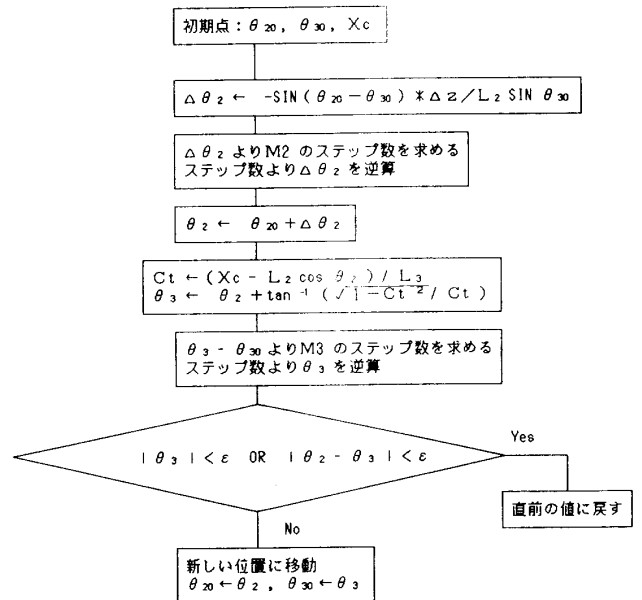


図8 垂直移動のフローチャート

(3.2), (3.10) を微分することにより

$$d\theta_2 = -\sin(\theta_2 - \theta_3) * dZ / L_2 \sin \theta_3 \quad (3.13)$$

となるので、近似的に  $dZ$  ずつ垂直移動させるには (3.13) 式より  $d\theta_2$  をもとめ、直前の  $\theta_2$  に加えた新しい  $\theta_2$  に対して、(3.12) 式より  $\theta_3$  を求める。この場合 3.1 b) と同様にこれらの角度変化は離散化しなければならない。又、 $\theta_3$  や  $\theta_2 - \theta_3$  の値の大きさも 3.1 b) と同様に制限を設ける。流れ図を図8.に示す。

$X = 250 \text{ mm}$ ,  $dZ = 10 \text{ mm}$  の場合のシミュレーションの結果を図9.に示す。この時、 $X$  の誤差は高々  $0.08 \text{ mm}$  程度であり、ロボットの位置精度からみれば無視できる大きさといえる。一方  $dZ$  の誤差は最大  $0.23 \text{ mm}$  ありやや大きいといえるが、垂直移動という目的に関しては

各部のステップ数	$\theta 2$	$\theta 3$	Z	X	dz	X-Xc
10,-77,-556,-951,951,0	41.92	89.48	22.92	250.04		
10,-53,-4,-1000,1000,0	39.80	89.80	13.12	250.08	-9.81	0.07
10,-55,-2,-1047,1047,0	37.60	89.96	3.25	250.06	-9.87	0.06
10,-57,0,-1093,1093,0	35.32	89.96	-6.70	249.99	-9.95	-0.01
10,-58,3,-1134,1134,0	33.00	89.72	-16.47	250.04	-9.77	0.04
10,-60,5,-1174,1174,0	30.60	89.32	-26.39	250.03	-9.92	0.03
10,-62,10,-1246,1246,0	28.16	88.76	-36.30	249.96	-9.91	-0.04
10,-63,12,-1277,1277,0	25.68	87.96	-46.12	250.02	-9.82	0.02
10,-64,14,-1306,1306,0	23.16	87.00	-55.97	250.01	-9.86	0.01
10,-65,17,-1330,1330,0	20.60	85.88	-65.89	249.94	-9.91	-0.06
10,-66,19,-1353,1353,0	18.00	84.52	-75.78	249.98	-9.89	-0.02
	15.36	83.00	-85.75	249.92	-9.97	-0.08

図9 垂直移動シミュレーション

3.1 b) と同様このことは第2義的である。従って、垂直移動に関しては本計算法は十分の精度をもっている。

#### 4. 制御アルゴリズム及び実験結果

対象物はロボットアームの届く範囲内にロボット回転軸に直面しているものとする。この範囲内であれば対象物は任意の位置にあり、その高さも任意であるものとする。

このような条件の下で、ロボットアームが対象物の位置を探索し、対象物の中心部付近を把握するアルゴリズムを考えることにする。

##### 制御アルゴリズム

- 1) 大きいキザミ角での対象物までの方向、距離の探索 (広域方向探索)
- 2) 1) で対象物のある方向が検出されたら、その近傍で微小キザミ角で対象物の両端部の方向検出 (局所方向探索)
- 3) 両端部方向の平均をとることにより中心軸方向決定、距離測定。  
1) -- 3) における方向探索精度は超音波センサによる距離測定精度に大きく影響される。
- 4) 肩の高さで対象物の近傍までハンドを移動 (距離情報利用)。但し、距離測定の誤差を見込んで余裕を持たせる。
- 5) 肩の高さで水平キザミ幅 dX づつ前進して光センサにより対象物の有無を調べる。

対象物の存在が確認されたら 6) へ

許容範囲内で対象物の存在が確認されない場合は 7) へ

ここで、光センサが遮光されれば対象物の存在が確認されたことになる。また光センサは指向性の良いことが要求されるが、センサ位置の調整により検出範囲は 1mm 程度にすることができた。

6) 対象物の上面が肩の高さ+センサの高さより高い場合

垂直方向に dZ づつ上昇しては光センサで対象物の有無を確認し、対象物の無いのを確認した時、その高さが対象物の上面の高さとなる。

8) へ進む。

7) 対象物の上面が肩の高さ+センサの高さより低い場合

元の位置に後退し、dZ だけ垂直方向に下降し、dX づつ水平方向に前進しながら光センサで対象物の有無を調べる。対象物の存在が確認された時その高さが対象物の上面の高さとなる。対象物の確認が行われるまで 7) を繰り返す。

8) 対象物の高さが判明したので指定された高さまでハンドを移動。

9) 対象物に接触するまでグリッップを閉じる。(マイクロスイッチ利用)

10) 対象物を把握。

以上の流れ図を図10.に示す。この制御部を BASIC で、センサ部を機械語でプログラミングして実験を行った結果次のようになった。この時光センサは上部センサを使

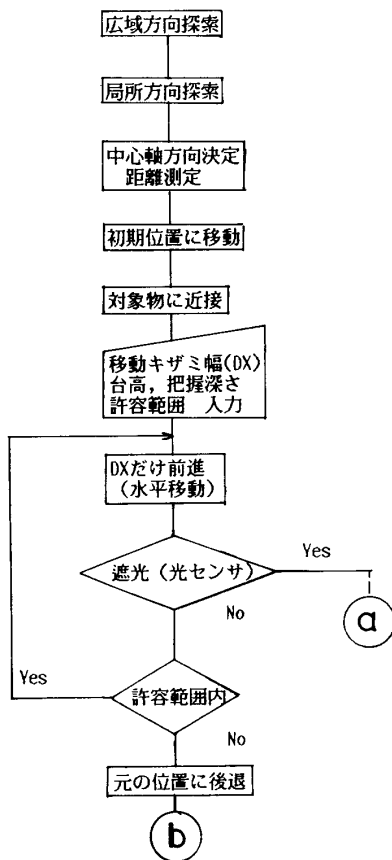


図10-1 制御流れ図

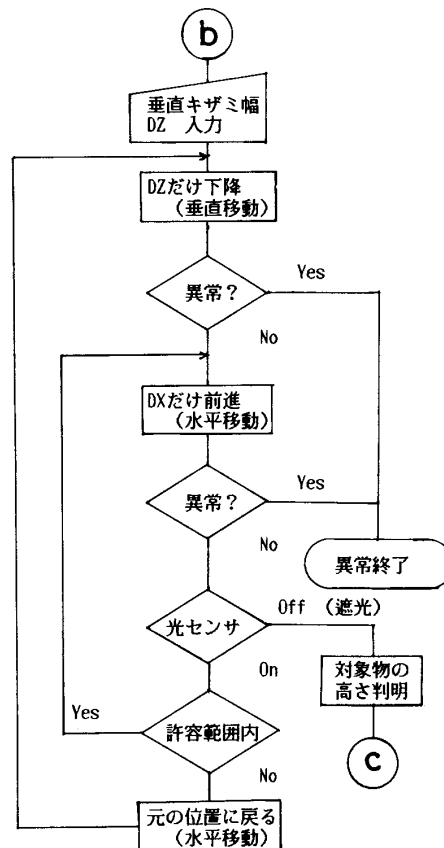


図10-2 制御流れ図

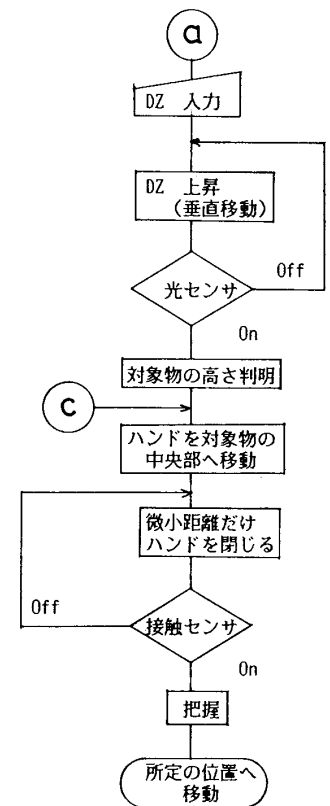


図10-3 制御流れ図

用した。

a) 47.5 mmH の台上に137 mmH の発泡スチロールの対象物を向かって右10°, ロボット中心軸より320 mm の位置に置いた場合 (センサより200 mm)

距離測定 319.0 mm 方向 10.8°

対象物高さ 137.0 mm

と判定。但し、 $dZ = 10$  mm,  $dX = 5$  mm とし、高さ判定時には  $dZ = 2$  mm に切り替えている。

b) 29 mmH の台上, 189 mmH の対象物  
右10°, 320 mm の位置

距離測定 321.0 mm 方向 10.0°

対象物高さ 189.8 mm

と判定。

c) 29 mmH の台上, 151 mmH の対象物  
右10°, 320 mm の位置

距離測定 321.4 mm

対象物高さ 152.0 mm

と判定。

以上の実験結果より次のことがいえる。

- 1) 距離測定誤差は分解能 (約 2 mm) の範囲内にある。
- 2) 方向の検出誤差は高々0.8°でこの値は局所方向探索時のキザミ角に等しい。
- 3) 対象物高さの検出誤差は移動のキザミ幅 (2 mm) の範囲内に入る。

1), 3) の結果はほぼ満足できるといえる。2) についてもほぼ満足できる結果ということもできるが、この誤差の中にはセンサ取り付け誤差が含まれていることも考えられる。それにしても実験b) では方向検出が正しくおこなわれており、取り付け誤差は0.8°よりも小さいことが推測される。

以上の実験においていずれも満足すべき把握が行われ、写真1)~3) にその一部を示す。写真1) は対象物の上面の探索中、2) は対象物の上面を検出したところ、3) は対象物の把握が行われたところである。

以上、対象物が発泡スチロールの直方体でロボット回転軸に直面している場合についてその位置 (方向と距離) 及び対象物の高さをほぼ満足できる精度で検出し把握することができた。ただし、この方法では対象物前面は方向軸に対して平面であることが要求される。試みに、

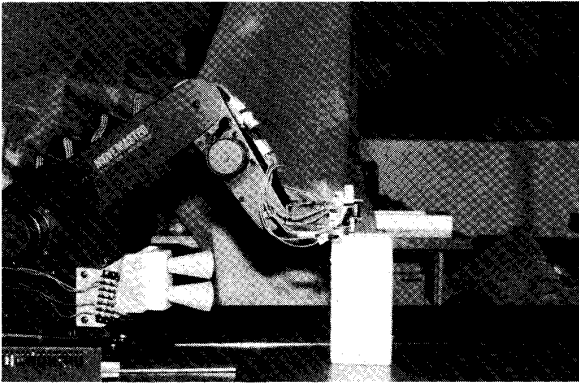


写真1.

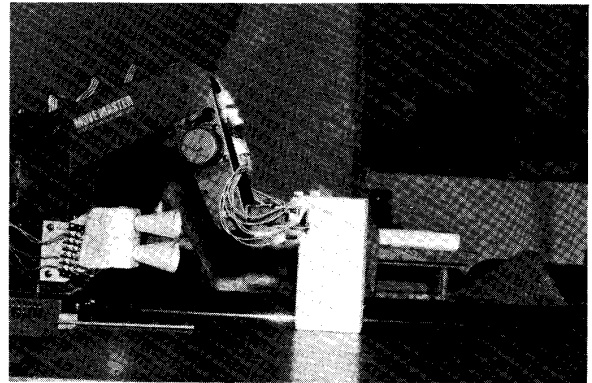


写真2.

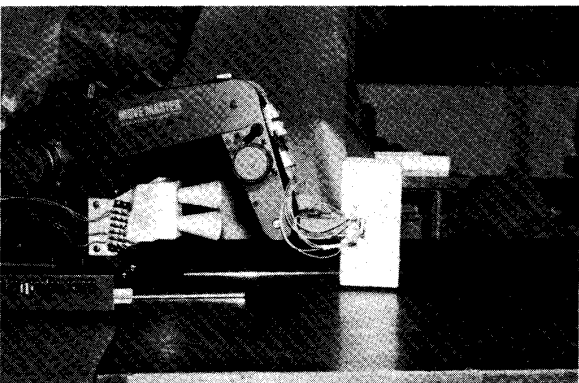


写真3.

謝意を表します。

なお、計算及び作図の一部に本校電子計算機室 DS-600 を用いた。

#### 参考文献

- 1) 中野：ロボット工学入門，オーム社，昭58
- 2) 花房編：特集ロボットの機構と制御，コンピュータロール，No.9，昭60
- 3) 横田：Z-80 の使い方，オーム社，昭57
- 4) 平松ほか：マイコンのインターフェース，オーム社，昭56
- 5) 栗山ほか：PC-Techknow 8800 Vol.1.1，アスキー，昭58
- 6) 石井ほか：3次元位置，姿勢センサとロボットへの応用，計測自動制御学会論文集，Vol.21，No.5，昭60
- 7) 木下ほか：一次元配列形触覚センサによる対象物形状の特徴抽出，計測自動制御学会論文集，Vol.21，No.5，昭60
- 8) 松井：教育用ロボットの制御の一例，宇部高専研究報告，第31号，昭60
- 9) 榊ほか：周辺装置の製作，アスキー，昭57
- 10) メカトロシステム事典編集委員会編：メカトロシステム事典，産業調査会，昭57

(昭和60年9月13日受理)

a) と同様の条件で直径53 mm，高さ133 mm の円筒缶と直径74 mm，高さ130 mm の円筒缶について実験してみた。その結果，高さについては1 mm 以内の精度で検出したが，中心軸の方向検出は $0.8^\circ$ 程度の誤差であったものの距離測定誤差が8～9 mm 程度あった。円筒の場合ロボット側からみた両端部の稜線が明確でないため，この方法では中心軸の検出には誤差が避けられず，中心軸検出がずれていれば超音波の反射面の方向のずれが増幅されることになり距離測定に大きい影響を与えることが推定される。従って，中心軸検出の方法に工夫を重ねる必要があるものと思われる。又，接触センサの取付け位置も距離測定誤差との関係で把握の深さの選び方を困難にしている。そのため実験においても把握に失敗することもあった。従って，円筒のような表面が曲面であるようなものについては，センサ取付け方法を含め制御方法に工夫を重ねる必要があろう。更には立体的な図形情報も必要となろう。

おわりに，本研究を進めるにあたって昭和59年度，60年度の卒業研究学生諸君より多大の協力を頂いたことに