

# 教育用ロボットの制御の一例

松井 稜 治\*

## An Example of the Control for an Educational Robot Arm

Ryoji Matsui

### Abstract

This report discusses the system of a robot-arm with some simple sensors. These are optical sensors, touch sensors and ultrasonic sensors. The ultrasonic sensors are used for searching the direction and the distance to the object. The optical sensors are consisted of an LED and a photo transistor, and used for distinguishing whether the object is between the fingers. The touch sensors are consisted of two microswitches equipped to the both fingers and used for distinguishing whether the both fingers are touching the object.

### まえがき

近年、マイクロエレクトロニクスの発展により、産業用ロボットが工場の自動化に大きい役割をはたしている。しかしながら従来の産業用ロボットは高精度、高速ではあるが、予め決められた動作を決められた順序で行わせるものが中心であった。そこで、最近ではセンサをロボットに装着してフィードバック制御することにより、より高度な動作を可能にするロボットについての研究、開発がなされつつある。そこで本実験室でも第一段階として、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、ロボット自身が対象物の位置を探索し持ち上げることを目標として研究を進めてきた結果、ある程度の結果を得たので報告する。

### 1. ロボットアーム

使用したロボットアームは市販のRM-101で、その構造は図1.のようになっている。ここで、

M 1 : 腰部ステップモータ (回転)

$$s_1 = 0.04^\circ/\text{ステップ}$$

M 2 : 肩部ステップモータ (曲げ)

$$s_2 = 0.04^\circ/\text{ステップ}$$

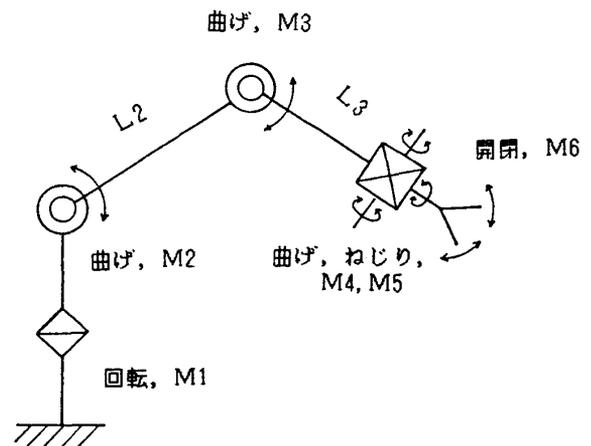


図1 ロボットアーム構造概略図

M 3 : 肘部ステップモータ (曲げ)

$$s_3 = 0.08^\circ/\text{ステップ}$$

M 4, M 5 : 手首部の差動歯車用ステップモータ (曲げ, ねじり)

$$s_4, s_5 = 0.05^\circ/\text{ステップ}$$

M 6 : 手先開閉用ステップモータ

$$\text{最大 } 80 \text{ mm} / -2000 \text{ ステップ}$$

$$L_2 = 200 \text{ mm}, L_3 = 150 \text{ mm}$$

ロボットアームはパーソナルコンピュータ PC 8801 のプリンタインタフェースを介して接続されているので、アームを動かすには、主として BASIC の LPRINT

\* 宇部工業高等専門学校機械工学科

文を用いて

LPRINT "I a1, a2, a3, a4, a5, a6" のようにする。ここで、a1, a2, ..., a6 は各ステップモータのステップ数である。

手先部はM6により開閉するが、開閉により把握部の手首部からの距離が変化する。その値は最大10mmであるので対象物を把握する時配慮しなければならない。

手先部の概略図を図2.に示す。

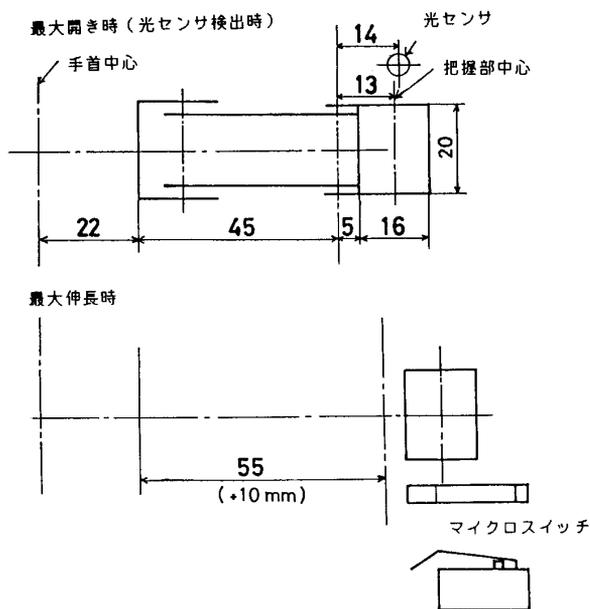


図2 手先部概略

## 2. センサー

センサーとしては、光センサー、接触センサー、超音波センサーを用い、光センサーと接触センサーは手先部に図2.のように取り付けられている。これらのセンサー情報はパラレルインタフェース用IC 8255を経由してパソコンに送られる。各センサーと8255のポートの対応関係は図3.のようになっている。

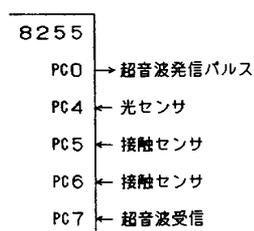


図3 各センサーとの結合

### 2.1 光センサー

図2.に示されるように、赤外LED、赤外フォトトランジスタを向かい合わせて取り付けられている。フォトトランジスタの受光の状況は、ICコンパレータを用いてあるレベル以上であれば“H”となるようなデジタル出力となっている。即ち、対象物が手先間に入っていれば“0”，入っていなければ“1”となるわけである。

### 2.2 接触センサー

2個のマイクロスイッチをそれぞれ両手先に取り付けている。スイッチON(接触)で“L”となるように回路は構成されている。

### 2.3 超音波センサー

腰部前方150mmに(回転中心より)送波器、受波器(MA40L1S, MA40L1R)が縦方向に取り付けられている。それぞれ長さ50mmの円錐形のホーンを付けている。受信回路の構成の概略を図4.に示す。調整の便宜のため5箇所抵抗を可変抵抗にしている。

8255のポートCの第0ビットよりパルスを出力すると40KHzの超音波が発信され、対象物からの反射波が



図4 超音波受信回路

受信回路により整形されて矩形波となってCポート第7ビットに入力される。この値が“H”レベルになった時反射波が受信されたものとし、この間の時間を測定して対象物との距離を知ることができる。

### 2.4 センサーテスト

センサー部プログラムは特に超音波センサーにおいて高速動作が要求されるので、機械語で作成されている。これを図5.に示す。光センサー、接触センサーでは特に問題はないので、ここでは超音波センサーのみについて触れる。できるだけ高速で動作させるため、本プログラムは超音波センサー部において、ディスプレイ表示のためのDMAを停止させている。

対象物との距離を求めるために、発信の瞬間から受信の瞬間までの時間を測定するのに、本プログラムでは、start:の部分で約0.8mSの発信用パルスをだし、その後約0.2mSを経過した後(発信波の干渉を避けた

```

type sensora.mac
; *** sensor all(sensora) ***
; *** U-sonic part ***
    org    0b900h
;
cwr      equ    0a3h
portc    equ    0a2h
;
port1:   ld     a,98h ;Initialize
         out    (cwr),a
         ld     a,0
         out    (68h),a ;DMA stop
         push   af
         push   bc
         di
start:   ld     c,0
         ld     b,0ffh
         call  delay
         ld     a,1
         out    (portc),a ;Pulse out
         ld     b,0c5h
         call  delay
         ld     a,0
         out    (portc),a
         inc   de
         ld     b,31h
         call  delay
search:  inc   c ;Count up
         jr    z,fine
         nop
         nop
         ld     b,08h
         call  delay
         in    a,(portc)
         and   80h ;Receive?
         jr    z,search
         ld     b,31h
         call  delay
         in    a,(portc)
         and   80h ;Recieve again?
         jr    z,start
fine:    ei
         ld     (hl),c ;to BASIC
         inc   hl
         ld     (hl),0
         dec   hl
         pop   bc
         pop   af
         push  hl ;DMA
         ld   hl,705bh
         ld   a,(0ef88h)
         cp   15h
         jr   c,fin1
         ld   hl,7066h
         ld   a,(0ef89h)
fin1:    cp   50h
         di
         call 6fd1h
         ei
         pop   hl
         ret
delay:   dec   b
         jr   nz,delay
         ret
; *** sensor (touch,photo-tpsens) ***
;
port2:   ld     a,98h
         out    (cwr),a
         call  delay2
         in    a,(portc)
         and   10h
         ld     (hl),a
         call  delay2
         in    a,(portc)
         and   60h
         ld     (de),a
         ret
delay2:  push   bc
         ld     b,0ffh
dlp:     dec   b
         jr   nz,dlp
         pop   bc
         ret
end
    
```

図5 センサー部プログラム

め), search:より jr z,search までの間を繰り返し, 一回通過する毎にカウントに1を加える. 但し反射波を受信したとしても, 0.2 mS 後の値も調べてなお“H”レベルにあれば反射波とみなし, “L”レベルにあれば雑音とみなして start:に戻す. 更にこのセンサー用機械語プログラムを call するメインプログラムでも, カウント数が2度続けて等しい値をとった時のみ正しい値とみなし, そうでない時は雑音とみなして距離測定をやり直す. 以上のようにここでは超音波センサーを使用するにあたっては, 2重の雑音処理をソフトウェアにより行わせている. このカウント数と対象物までの距離との関係を実験により調べたものを, 図6.に示す. 図中○印はDMA 停止の場合で, ×印はDMA 動作の場合である. なお本実験は室温 24.5°Cで行ったので, この時の音速は 346 m/s である. 実験点を直線近似した時の傾斜はそれぞれ (分解能にも相当)

10.12 mm/カウント (DMA 停止)

12.93 mm/カウント (DMA)

となり, これらの値と音速より対応する時間は

0.0585 mS/カウント

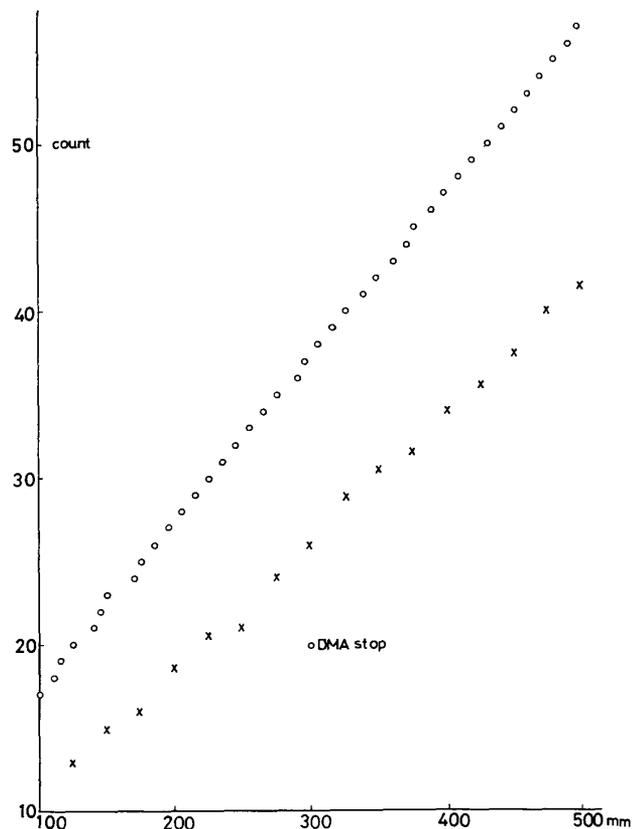


図6 超音波センサーによる距離測定実験結果

となり、DMA 動作の場合はDMA 停止の場合に比べて約25%速度が落ちていることがわかる。一方、対応するプログラム中の繰り返し部のクロックサイクル数は206であり、本パソコンのクロック周波数が4 MHzであることから、本来は

$$0.0515 \text{ ms/カウント}$$

であるはずであるが、本実験の結果のようにクロックサイクル数とクロック周波数のみから単純には求められないことに注意しなければならない。従って以上のようなソフトウェアタイマを用いる場合は実験により検定を行う必要があり、精度良い結果を得るにはハードウェアタイマなどを用いる方が得策と思われる。

### 3. 手先部直進の手法

後述のように、対象物の探索にあたっては、手先部は平面上を直進しなければならない。しかも等距離づつ前進させたい。ここではこの要求を満たすような手法について検討してみよう。ここで、

$x$  : 手首部と肩部との距離 (最大 350 mm)

$z$  : 手首部の肩部を基準にした高さ (mm)

$\theta_2$  : 上腕の水平面となす角度 (上向き)

$\theta_3$  : 下腕の上腕延長線となす角度 (下向き)

とし、 $L_2$  : 上腕の長さ (mm),  $L_3$  : 下腕の長さ (mm) とすると

$$z = L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin (\theta_2 - \theta_3) \quad (1)$$

$$x = L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos (\theta_2 - \theta_3) \quad (2)$$

となり、水平面上を動く条件は、 $z = 0$ であるから

$$\theta_2 = \tan^{-1} L_3 \sin \theta_3 / (L_2 + L_3 \cos \theta_3) \quad (3)$$

又、等距離づつ(微小)動かすには、 $x$ の増分 $dx$ を一定になるように $\theta_2, \theta_3$ を変化させる。

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

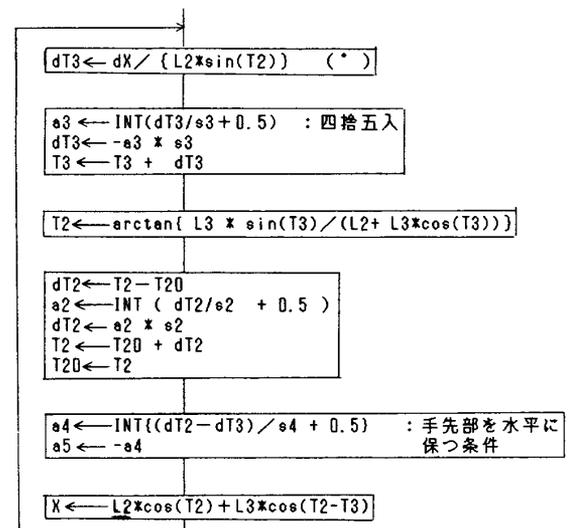
即ち、 $\theta_3$ の値を(4)式に従って $d\theta_3$ だけ変化させ、(3)式により $\theta_2$ の値を決めてやればよいことになる。但し、 $\theta_2$ や $\theta_3$ はモータ回転ステップ数に対応しているため、離散的な値をとる。そのため丸め誤差が生ずるので、その累積をできるだけ小さくするための工夫が必要である。ここでは出力値に基いて角度を再計算することにより、丸め誤差の累積を防いでいる。直進プログラムの流れ図を図7.に示す。この手法に基いたプログラムのシミュレーションの結果を図8.に示す。ここで、 $t_2, t_3$ は $\theta_2, \theta_3$ に相当し、 $t_4, t_5$ の値は手先部を水平に保つための値をとっている。 $x, z$ の単位はmmであり $z$ の値は

$\pm 0.1 \text{ mm}$ 内になっていて、ほぼ水平面上を動くことがわかる。又、この計算では $dx = 5 \text{ mm}$ としているが、 $\theta_2, \theta_3$ のほぼ全域にわたってこの条件はほぼ満たされていて、 $x = 191.3 \text{ mm}$ より $x = 346.3 \text{ mm}$ を32ステップで動いている。但し、 $\theta_2, \theta_3$ の小さくなった最終段では、 $\sin \theta_2$ の値の変化が大きいため約4.4 mmと0.6 mm程度の誤差が生じている。

### 4. 制御手法及び実験結果

前述のように、対象物までの距離と方向を超音波センサーで、手先間に対象物が入ったか否かを光センサーで、手先に対象物が触れたか否かを接触センサーで調べ、センサー情報に応じてロボットの動作を決定する。その手法は次のように記述される。

- 1) 対象物の有無がわかる程度のキザミ幅の角度で腰部を回転させる。超音波センサーにより対象物の存在方向が確認されるまで、制限角度内、制限距離(アームの届く範囲)内で、1)を繰り返す。対象物の存在が確認できれば、2)へ進む。(広域探索)
- 2) 1)のキザミ幅に比し微小角度で腰部を回転させ、超音波センサーにより対象物の両端の角度をみつける。それらの値を平均することによって、対象物の中心軸方向を決定する。
- 3) 対象物中心軸方向へアームを向ける。
- 4) 前節の直進の手法を用いて、手先部を開いた状態で



$T_2$  : 肩部回転角 ( $dT_2$  : 増分)       $T_3$  : 肘部回転角  
 $a_2, a_3, a_4, a_5$  : 各部のステップ数     $s_2, s_3, s_4$  : ステップ当たり回転角  
 4, 5 : 手先部を示す

図7 手先部直進流れ図 (肩部の高さ)

```

I0, 0, -882, -1411, 1411, 0
t2,t3,t4,t5** 45 115.56 -70.55 70.55

x0= 191.345
dx= 5 xmax,lmax= 343 151.655

I0,-13, 25, 30, -30, 0
t2,t3,t4,t5** 44.48 113.56 -69.05 69.05
x= 196.259 z= .0200348

I0,-15, 26, 30, -30, 0
t2,t3,t4,t5** 43.88 111.48 -67.55 67.55
x= 201.319 z=-.0518951

I0,-15, 26, 30, -30, 0
t2,t3,t4,t5** 43.28 109.4 -66.05 66.05
x= 206.326 z=-.046463

I0,-15, 26, 30, -30, 0
t2,t3,t4,t5** 42.68 107.32 -64.55 64.55
x= 211.276 z= .0354157

I0,-16, 26, 29, -29, 0
t2,t3,t4,t5** 42.04 105.24 -63.1 63.1
x= 216.167 z= .0419617

I0,-46, 55, 51, -51, 0
t2,t3,t4,t5** 17.12 40.2 -23 23
x= 329.132 z= .0724258

I0,-52, 61, 56, -56, 0
t2,t3,t4,t5** 15.04 35.32 -20.2 20.2
x= 333.851 z=-.0925331

I0,-58, 69, 64, -64, 0
t2,t3,t4,t5** 12.72 29.8 -17 17
x= 338.476 z=-.0186195

I0,-69, 81, 74, -74, 0
t2,t3,t4,t5** 9.96001 23.32 -13.3 13.3
x= 342.926 z=-.0681458

I0,-69, 81, 74, -74, 0
t2,t3,t4,t5** 7.20001 16.84 -9.6 9.6
x= 346.305 z=-.0518684
    
```

図8 手先部直進シミュレーション結果

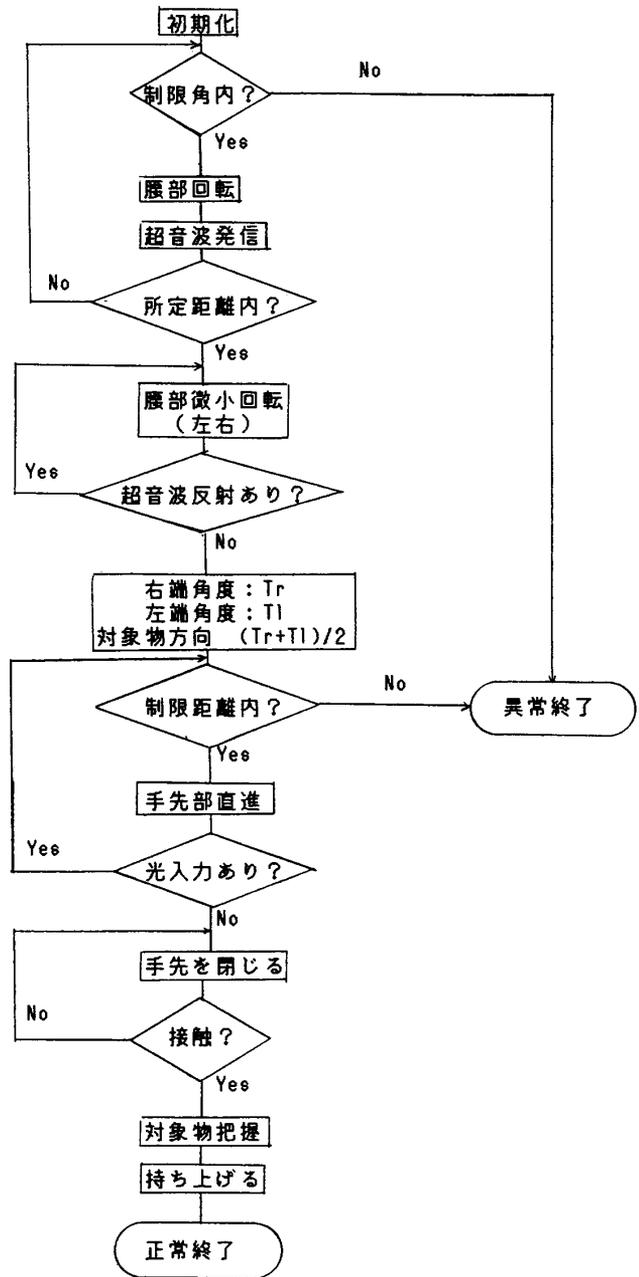


図9 制御流れ図

一定キザミで前進させる。この時手先部の光センサーにより、手先間に対象物が入ったか否かを判定する。手先間に対象物が入るまで、制限距離内で4)を繰り返す。  
 5) 4)で手先間に対象物が入ったことが確認されたので腕、手首の動きを止める。両手先が対象物に接触したことが確認されるまで、手先を微小距離ずつ閉じる。  
 6) 対象物を把握し、持ち上げる。

以上の手法の流れ図を図9.に示す。これを BASIC によりプログラミングして(センサー部は機械語)、実験を行ったところ、対象物を持ち上げることに成功した。図10.~13.にその様子を示す。その時の実験データを次に示す。

対象物：幅 50 mm，高さ 190 mm，奥行き 85 mm の発泡スチロール製の直方体  
 対象物の位置：肩中心よりの距離 350 mm(前面)，正面，右前方15°，左前方15°  
 高さ 50 mm の台上(肩の高さは 164 mm)  
 1) の広域探索のキザミ角度：4°  
 2) のキザミ角度：0.8°  
 この時対象物前面の角度差は約8°であり、広域探索のキザミ角度は十分であることがわかる。又、0.8°のキザミ角度は、対象物の位置では約 5 mm 幅に相当している。

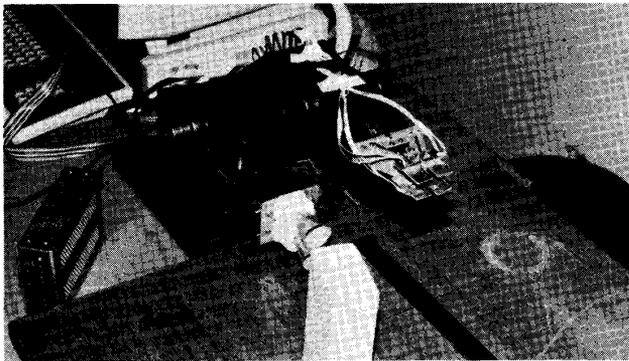


図10 初期状態

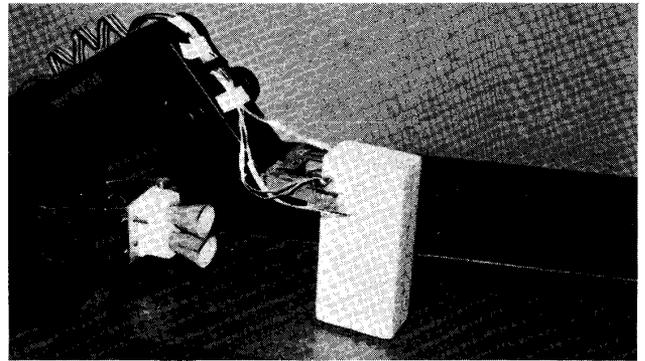


図12 把握しつつある時

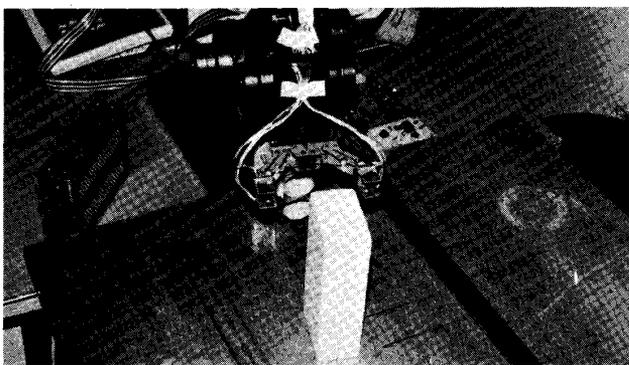


図11 方向を定めた時

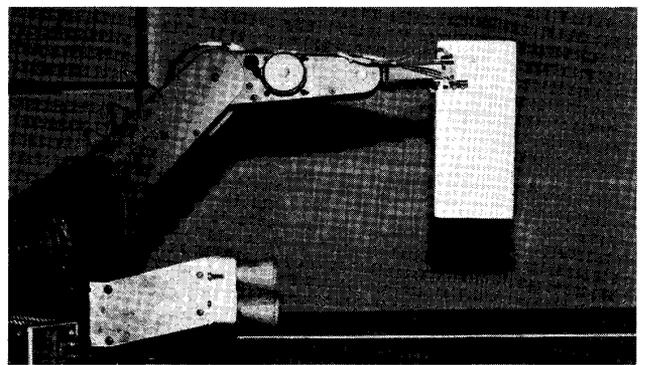


図13 持ち上げた状態

この大きさは超音波センサー取付軸方向とアーム中心軸方向とのずれがほぼこの値の1/2に相当することから、妥当な大きさとおもわれる。このずれの大きさは、アームを正面方向に固定して対象物を左右に動かしたとき、右端部で20mm(肩前方350mmの位置)、左端部で15mm広く検出することから推定した。

更に、手先部も左右で開きが異なり、右部が左部より5mm開きが大きいことから、前述のことと合わせて、手先部と対象物との間隔が右部の方が10mm程度大きい場合もある。このような場合、対象物との接触が左右で時間的にずれるため、対象物を回転させた状態で把むことがある。このような弊害を避けるため、アームを対象物の方向へ向けた後、故意に左方へずれの大きさだけ戻してやることによって、満足すべき把握を実現できた。

以上のように、対象物の位置探索後の把握を一応実現することができたが、次のような多くの問題点を含んでいる。

- 1) ソフトウェアによる軸方向の修正はあくまでも次善の策であり、超音波センサーの取り付け精度を更に上げることが必要である。
- 2) 超音波センサーによる距離測定の分解能は、本例で

は約10mm/カウントであり、最大限この1/2程度にしか精度を上げることは期待できない。従って、更に精度を上げるにはハードウェアタイマが必要となろう。

- 3) 本例では対象物の高さは検出されていないので、対象物の高さは肩の高さよりも高いことが必要である。従って、対象物が把握時の高さ以上であるかどうかを検出するために、もう一对の超音波センサーを取り付ければ、さらに有意であろう。
- 4) 接触センサーについても、一对のセンサーだけでなく、更に多数の点の接触状況を検出するような高度なセンサーも必要と思われる。
- 5) 本例では、対象物が複雑な形状の場合の把握は不可能である。複雑な形状を識別するには、より高度なセンサー、データ処理が必要となる。

おわりに、本実験の装置製作及びプログラム作成に当たって、卒業研究生諸君より多大なる協力を得たことに謝意を表します。

本実験における機械語プログラムの作成にあたってはCPM(デジタルリサーチ)、MACRO-80(マイクロソフト)を使用した。

参 考 文 献

- 1) 中野栄二：ロボット工学入門，オーム社，昭58
- 2) 榊 ほか：周辺装置の製作，アスキー出版，昭57
- 3) 木下源一郎：ロボットの触覚センサ技術，計測と制御，vol. 21, no. 12 (1982)
- 4) 毛利 ほか：マニピュレータの適応分散制御，計測自動制御学会論文集，vol. 20, no. 3 (1984)
- 5) 広瀬武士：両眼視による立体障害物認識手法，計測自動制御学会論文集，vol. 19, no. 8 (1983)
- 6) 栗山 ほか：PC-Techknow 8800 vol. 1.1, アスキー出版，昭58

(昭和59年 9月17日受理)