

教育用ロボットアームのパソコンによる制御

松井 稜治*・落合 積

On Control of an Educational Robot Arm using a Personal Computer

Ryoji Matsui, Tumoru Ochiai

Abstract

In this report, an educational robot arm with some sensors is controlled by a personal computer. The robot grasps and transfers any cylindrical or rectangular object using sensor informations effectively.

Those sensors are consisted of an ultrasonic sensor, some optical sensors (reflected type, penetrated type) and a pair of micro switches.

Each of optical sensors is composed of a LED and a photo-transister. Reflected type optical sensors are used to detect interval of hand and object respectively. The sensor informations are used to estimate the optimal position for grasping cylindrical object.

The ultrasonic sensor is used to detect distance and direction to object. The bisection method is available to reduce the time required for searching the direction.

1. まえがき

本研究室では従来より教育用ロボットアームに簡易センサをとりつけることにより、任意の位置(距離と方向)にある直方体の対象を把握することを試みてきた。簡易センサとしては

- ①対象までの距離と方向を検出するための超音波センサ
 - ②対象とハンドとの間隙を検出するための反射形の光センサ
 - ③ハンドの中に対象が入っているかどうかを検出するための透過形の光センサ
 - ④対象の把握を確認するためのマイクロスイッチ
- などが用いられた。

ここでは、超音波センサによる方向検出に2分法を適

用することにより、方向探索時間の短縮が実現でき、②の反射形光センサの配置を若干変え、A/D変換を12ビット分解能のタイプに変更し、アルゴリズムを修正することによって、円筒缶の把握が実現できたので以下に報告する。

2. システム構成

2.1 ロボットアームの構造

ここで用いられるロボットアームは教育用のムーブマスタRM-101で5自由度多関節形である。基本的には各関節を駆動するステッピングモータの回転ステップ数をパソコンより与えることによりアームは動く。ただし手首部は差動歯車になっているので2つのモータの回転角の和が手首のひねりに比例し、差が手首の曲げに比例することになる。

その他ハンドグリップの開閉もステッピングモータの駆

*宇部工業高等専門学校制御情報工学科

動により行われる。

パソコンのプリンタインタフェースを介して適当なコマンドを送ることによって、各モータは駆動される。¹⁾

2.2 センサの取り付け

超音波センサは発信器(MA40L1S)、受信器(MA40L1R)ともロボットアームの腰部に取り付けられ腰部の回転と共にセンサも回転する。したがって腰部を回転させ、超音波を発信し反射があれば、その方向に対象があるものとみなす。

反射形光センサ、透過形光センサ、マイクロスイッチは図1のようにハンドに取り付けられている。

ハンド先端に取り付けられた透過形光センサはグリップの一方はLED(TLN101)、他方はフォトトランジスタ(TPS601)で、LEDから発光された赤外光がフォトトランジスタに受光されればハンドグリップの間には対象はなく、遮光されれば対象があるものとする。したがってここではこのセンサを存在確認センサと呼ぶことにする。このセンサは指向性があるため取り付けに注意すればmm単位の精度で存在確認することができる。なおフォトトランジスタの出力は比較器を介してパソコンに入力される。

ハンド根元、両グリップに取り付けられた反射形光センサは反射光の強度を検出することによりそれぞれの取り付け位置と対象との間隙を測定するのに利用する。したがってハンド根元にとりつけられたものを近接センサと呼び、グリップに取り付けられたものはグリップ間隔から間隔を減ずることにより対象の幅を推定することができるので幅検出センサと呼ぶことにする。なおこのセンサでは受光範囲を広くとるため、フォトトランジスタはTPS603を使用している。フォトトランジスタの出力はOPアンプを介して分解能12ビットのA/D変換器に入力される。またこのセンサは周囲の明るさに影響され、外光は上方からの場合が多いので、上方からの光を遮るよう取り付けに注意を払っている。

マイクロスイッチは両グリップに取り付けられ、最終的な把握を確認するために使用される。なおチャタリングに対処するためRSフリップフロップ回路を介してパソコンに入力される。

以上のセンサはすべてパソコンにより駆動され、検出値はパソコンに取り込まれる。そのシステム構成は図2. のようになる。

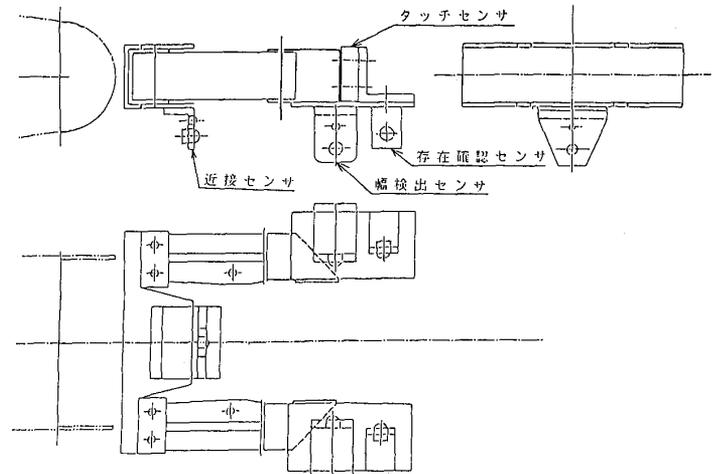


図1. センサ取付図

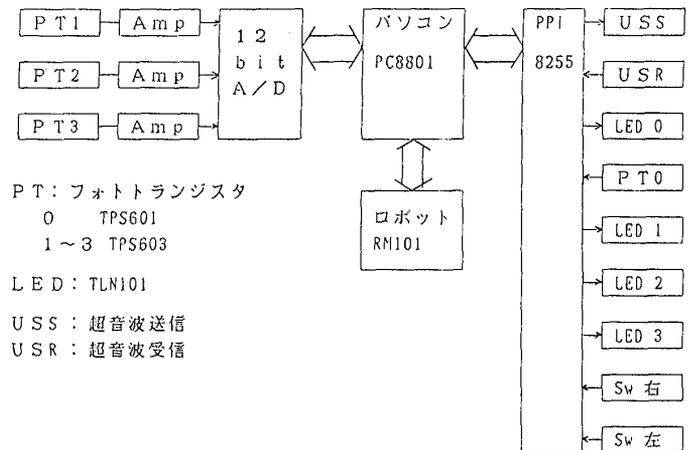


図2. システム構成図

3. センサ特性

存在確認センサおよびマイクロスイッチは単純なON-OFF信号であるのでここでは説明を省略する。

3.1 超音波センサ

超音波センサは発信部より発信された超音波が対象にあたって反射されたものを受信するまでの時間により対象との距離を測定する。ここでは発信部の影響を軽減するため発信後適当な時間をおいて(1mmS弱)、機械語プログラムの繰り返し部の繰り返し回数(ここではカウント数という)により距離を推定する。1カウントがほぼ11 μ Sになる。対象を円筒缶としたときの実験結果を図3.に示す。しかしこの結果は直方体の対象の結果と異なっている。すなわち1例をしめすと距離200mmの場合、円筒缶ではカウント数48.5(10回の平均)であるの

にたいし、直方体では43.0のように直方体の方がカウント数が小さくなる。これは円筒の場合発信側からみると凸面になっているので、平面の場合より反射波は広がり、受信波は小さくなるものと考えられる。一方受信回路では直流波形に変換された受信波を増幅し比較回路を通してパラレル I/Oポートに入力されるので反射波が小さければ比較回路のしきい値を越える時間も遅れるものと考えられる。したがってこのような場合対象の表面形状の影響を考慮しなければならないことがわかる。ここでは直方体と円筒のそれぞれの場合について特性式を求めた。

また音速の温度による影響も考慮している。¹⁾

3.2 反射形光センサ

本センサはLEDより発光された赤外光の対象による反射光の強度から対象との間隙を求めようとするものである。このセンサは構造的には非常に簡単で取り扱いも容易である。ただし周囲の明るさなど環境条件に影響されやすいという欠点ももっている。ここではこれらの欠点をソフトで軽減することを試みた。またこの場合の使用目的はハンドグリップの間にある対象との間隙を検出することであるので測定する距離は限られており、距離の相対的変化がわかればよい場合もあり、このセンサでも使用目的に対処できるものと考え、本センサを採用した。

このセンサではフォトトランジスタの受光量に応じて変化する電流が電圧に変換され、OPアンプを用いた増幅回路を介して、A/D変換される。A/D変換は機械語サブルーチンによるが、データはLED点灯時と消灯時の両方にたいして採取される。このとき増幅回路の出力波形は1次おくれ要素のステップ応答状になるので、時間遅れを考慮して、点灯、消灯後ここでは5mmSたつて、約0.1mmSごとに4回づつデータを取り平均した。消灯時の値は周囲の明るさを表す数値とみなされるので、距離を示す値としては、点灯時の値から消灯時の値を減じた値をとった。さらに短周期の環境変化に対して、5回ないし10回の平均値をとった。

この場合も超音波センサと同様に反射光は対象の表面形状に影響されるので直方体と円筒の場合の特性式を分けなければならない。

距離とA/D変換値との関係の実験結果例を図4.に示す。図中△印が実験データを示し、曲線は最適化法を用いて近似した特性式を示す。特性式の形は光の発散と距

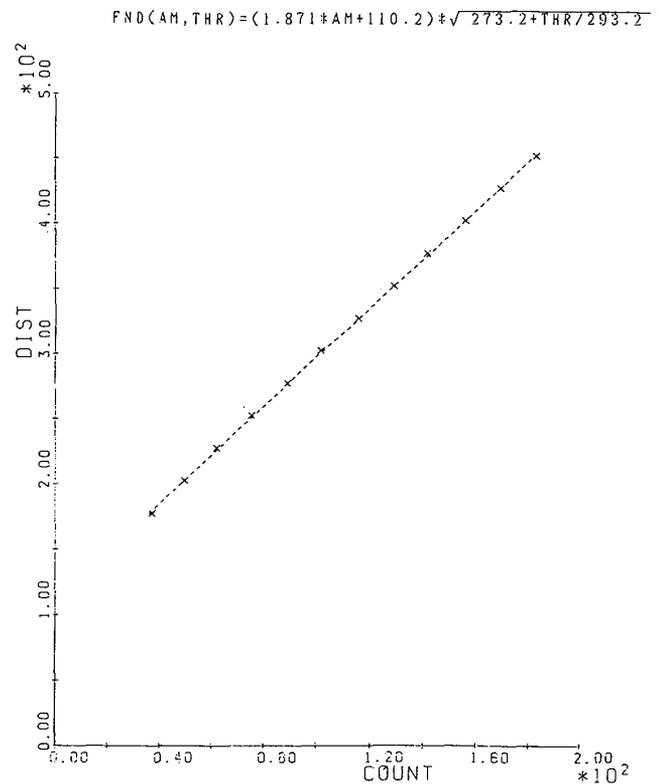


図3. 超音波センサ特性

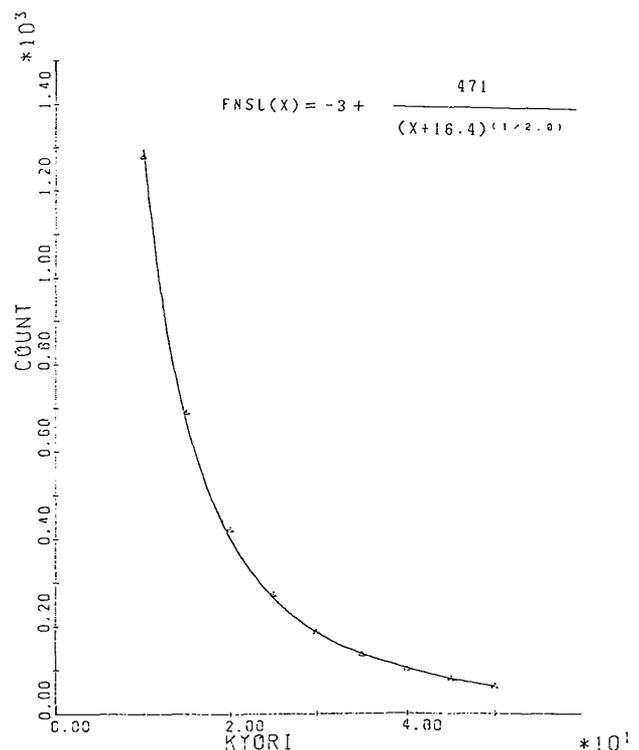


図4. 反射形光センサ特性例

離の関係を考慮してつぎのようなものとした。²⁾

$$Y = C_y + \left(\frac{C_z}{X - C_x} \right)^{1/n} \quad (3.1)$$

ここでY：A/D変換値、X：グリップと対象との距離、n：2の近傍の値で、 C_x はセンサの取り付け位置に関係する値である。なお周囲の明るさの変化による影響はLED発光時と消灯時の値の差をとることによって軽減されるが、明るさの大きい変化には対応できないため、ここでは周囲の明るさを3段階（ $\sim 10L_x \sim 50L_x$ ）にわけて特性式をつくった。

(3.1)式は実験式であるが、実際にはA/D変換値から距離を推定するためにこの結果は用いられるので、次の式を使うことになる。

$$X = C_x + \frac{C_z}{(Y - C_y)^{1/n}} \quad (3.2)$$

4. 制御手法

任意の方向、距離にある円筒形対象を把握するための概略の流れ図を図5.に示す。すなわち次のような順序で制御する。

- ①アームの回転と超音波センサを利用して対象までの距離と方向を探索する。このとき回転のキザミ幅を等しくした場合については文献1)に述べた。これを等分法と呼ぶことにする。等分法はキザミ幅をある程度小さくすれば良い精度で対象の位置を検出することができるが所要時間の長くなることが欠点であった。そこでここでは所要時間の短縮の期待できる2分法を使用してみた。
- ②対象までの方向と距離に合わせてアームの方向と長さを調整する。アームの長さの調整ではアームを水平方向に伸長する。このときアームの水平方向での直線的な動作が必要である。この手法についてはすでに文献¹⁾で述べている。
- ③アームを垂直方向に動かし、存在確認センサの情報を利用してすることによって、対象の高さを検出する²⁾。このときアームの垂直方向での直線的な動作が必要であるが、これについても文献¹⁾で述べている。高さが検出できたら把握するのに適当な高さまで、垂直移動する。
- ④近接センサを利用してハンドと対象との水平距離を調整する。
- ⑤アームの水平方向の伸長と幅検出センサの情報を利用して最適な把握位置を探索する。同時に幅検出センサを

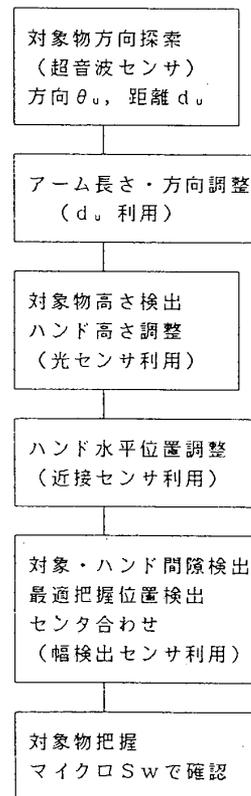


図5. 円筒把握の流れ図概略

利用してスムーズな把握が行われるよう中心合わせをする。中心がずれている場合はアームの回転により中心を合わせる。これらはハンドの間隔を徐々に狭めながら(3段階)行う。アームの伸長運動においては常に近接センサで監視する。このときハンドの間隔からハンドグリップと対象との間隔(幅検出センサによる)を減らすことにより対象の幅を推定できる。

⑥グリップを徐々に狭めて対象を把握する。把握はマイクロスイッチで確認する。このときグリップ間隔が⑤で推定された幅よりある程度以上小さくなったら把握に失敗したものとみなす。把握位置が不適當であるような場合にこのようなことが生ずる。このようなことを生じさせないために把握位置の最適化が必要とされる。

ここでは①と⑤についてさらに説明を加える。

4.1 超音波センサを利用した方向探索

ここでは2分法を用いた方向探索法について説明する。対象の方向はその両端を見つけ、両端部への角度を平均することによって求められるものとする。

端部では、たとえば図6.のような場合にあるキザミ角

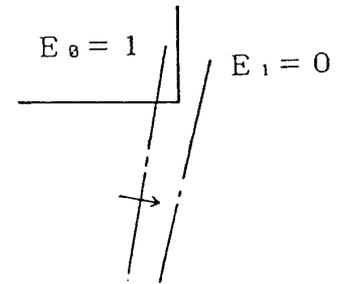


図6. 端部における関係

でアームを回転させると、超音波の反射波があったもの (= 1) から反射波のないほう (= 0) に変化する。逆方向に回転させると 0 から 1 になる。すなわちアーム回転にたいして相続く 2 状態の一方が 1、他方が 0、いいかえれば 2 状態の反射の有無をしめす指数 E0, E1 の排他的論理和をとったときその値が 1 になれば端部であることになる。

一方初期状態においては、対象がアームの正面にある場合、アームより右側にある場合、左側にある場合の 3 通りがある。初期状態における反射波の有無をしめす指数を EOR とし、回転角キザミ幅の初期値を Δ_0 、端部において内側に向かう回転角を Δ_{in} とするとき、表 1、のような関係がある。なお表中、1. 左端とあるのは 1 番目の端部として左端が見つかるということを示している。

Δ_0 のキザミ角で端部が発見されると、キザミ角の大きさを $1/2$ にして端部を検出し、所要の精度になるまで続ける。このようにして所要の精度で第 1 端が見つければ次にもう一方の端を探索する。このとき EOR が 1 のときは $\Delta_0 \leftarrow -\Delta_0$ とキザミ幅の初期値の符号を反転しなければならない。以上のように所要の精度で両端が見つければ両端の角度を平均して対象の方向を決定する。流れ図を図 7. に示す。

EOR	E0	E1	Δ_0	Δ_{in}
0	0	1	> 0	1. 左端 > 0 Δ_0
0	0	1	< 0	1. 右端 < 0 Δ_0
1	1	0	> 0	1. 右端 < 0 $-\Delta_0$
0	1	0	> 0	2. 右端 < 0 $-\Delta_0$
0	1	0	< 0	2. 左端 > 0 $-\Delta_0$
1	1	0	< 0	2. 左端 > 0 $-\Delta_0$

表 1. 2 分法における関係

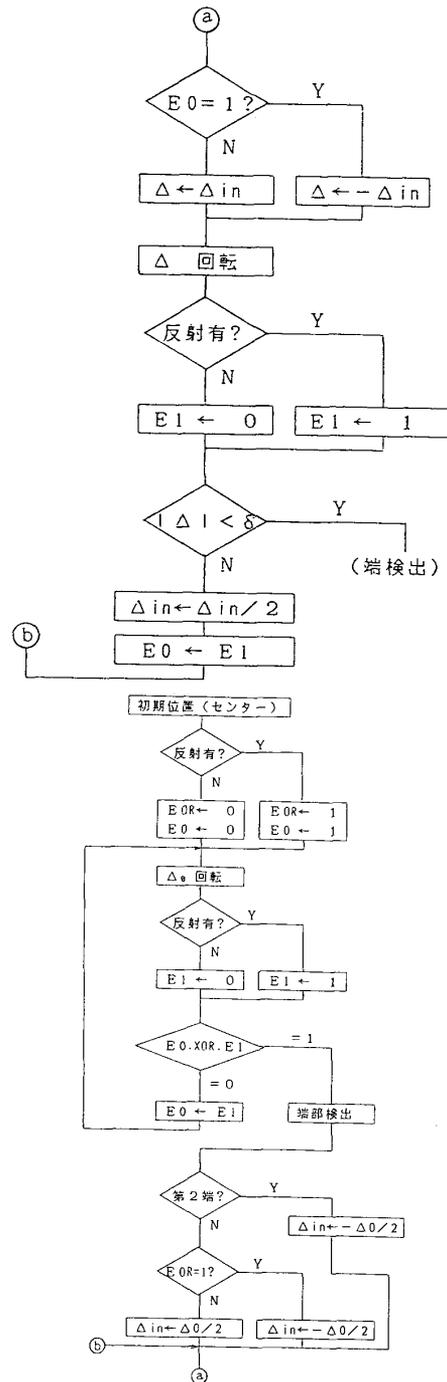


図 7. 2 分法流れ図概略 (2, 1)

4. 2 最適把握位置の決定法

直方体の場合は把握の深さは多少ずれても把握可能であるが、円筒対象の場合把握位置は直径部近傍でないとなったり、把握が不十分となったり、把握に失敗することもある。したがって円筒対象の場合その直径部を検出することは不可欠のことといえる。ここでは幅検出センサとアームの伸長運動とを併用することによって、最適把握位置を見つけるための方法を示そう。

まず反射形光センサの LED とフォトトランジスタの配置について考えてみよう。図 8. のように LED とフォトトランジスタの水平位置がずれているようなとき、LED の光軸にたいして対象表面が 1) 垂直である場合と 2) フォトトランジスタ側に傾いている場合を比べてみると 1) の場合は反射光の中心は LED に向い、2) のある場合にむしろ反射光の中心はフォトトランジスタの方に向かう。すなわちむしろ 2) のような場合の方が 1) の場合より近距離にあるとして検出されることがある。したがって円筒では直径部に対して LED、フォトトランジスタとも垂直になる方が把握位置検出を容易にするの

で、LEDとフォトトランジスタは同一垂直線上に配置することにした。このときセンサ光軸と対象表面が垂直になる場合（直径部）に対象とセンサとの間隙は最小になる。いいかえれば幅検出センサと対象との間隙が最小となるような位置にハンドを動かせばそのときセンサ正面に円筒の直径部があることになる。

センサの光軸と円筒直径部とを合わせるには、上記のようにセンサ位置においてハンドと対象との間隙が最小となることを利用する。図9.において x_0, x_1, x_2 それぞれの位置にセンサを動かしたとすれば x_1 の位置にあるときセンサと円筒対象との間隙がこの3位置の中では最小となる。いま Dx なるキザミ幅でアームの伸長運動をおこない図9.のような位置関係に ($R_1 \leq R_0, R_1 \leq R_2$) になったとする。これらの関係では相対的な位置関係がわかればよいことから、周囲の明るさが変化しとしても、計測中に大きく変わらなければセンサ検出値の相対的な関係は変わらないことが予想されるのでこのような位置関係を見つけ出すことができる。円筒の直径部とセンサ位置とを合わせるには R の値が極小となることを求めればよい。すなわち R は近似的に x の2次式で表せると仮定すると、 x_1 より

$$-\frac{(R_2 - R_0)}{2(R_2 + R_0 - 2 \cdot R_1)} Dx \quad (4.1)$$

だけ移動することにより円筒直径部が近似的にセンサ正面にくる。この位置を基準にして最適な把握位置（マイクロスイッチ装着部）にハンドを移動する。流れ図を図10.に示す。ただしこの場合もアームを前方に伸ばすときハンド根元が対象に当たらないよう近接センサでの監視が必要である。

5. 実験結果および考察

4. で述べた手法をBASICでプログラミングして（超音波センサおよびA/D変換部は機械語）、円筒缶と3種の大きさの角柱、天井灯を点灯した場合と消灯した場合、超音波センサ等分法と2分法のそれぞれについて実験を行った。実験結果の例を円筒の場合について表2.、表3.に示す。距離、方向にUのついているものは超音波センサによる検出値であり、Oのついているものは把握動作時における近接センサ、幅検出センサによる検出値とアームの長さ、回転方向から算出したものである。幅1, 2, 20はグリップを徐々に狭める各段階で幅検出センサとグリップ開度から算出したものであり、幅3は

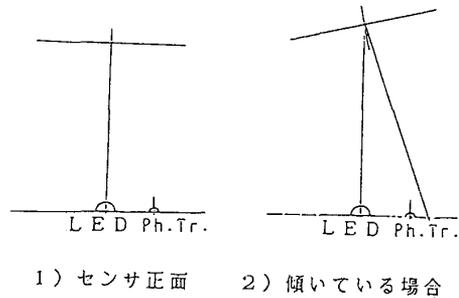


図8. センサ取付における問題

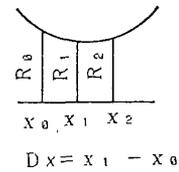


図9.

円筒缶最適把握位置

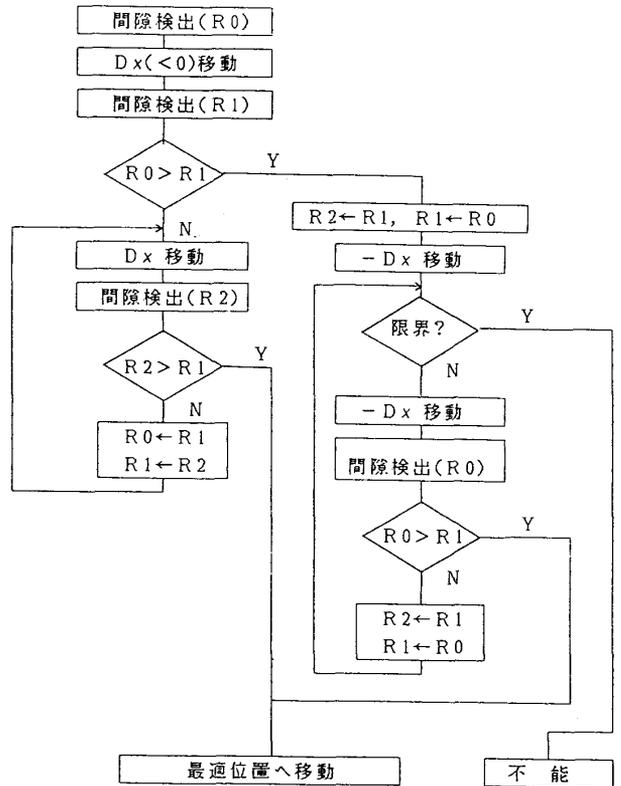


図10. 最適把握位置探索法

把握完了時におけるグリップ開度より算出したものである。

まず超音波センサによる対象の位置探索について検討してみよう。

方向探索については

円筒、角柱それぞれの場合誤差の絶対値の平均をとると

等分法・超音波センサでは 0.72° 0.76°

光センサでは 0.36° 0.12°

2分法・超音波センサでは 0.85° 0.4°

光センサでは 0.22° 0.12°

となった。最小回転角キザミ幅は等分法では0.4°、2分法では0.32°であった。超音波センサによる方向探索において円筒の場合は等分法による方がやや誤差が小さいが、逆に角柱ではむしろ2分法による方がよい結果を得ている。いずれの場合も最終的には光センサによるセンタ補正により方向の値は顕著に修正されるので、超音波センサによる方向探索値は対象がグリップの間に接触せずに入る程度の精度であればよいことがわかる。

距離検出精度を調べてみると、誤差の絶対値の平均は

等分法・超音波センサでは 2.01 2.12

光センサでは 3.16 1.06

2分法・超音波センサでは 1.77 1.71

光センサでは 0.78 1.42

となった(単位はmm)。この場合光(近接)センサによる値は方向検出のときほど顕著な修正は行われていない。悪化している場合もある。方向検出の場合は左右の幅検出センサを利用するため環境条件などの変化によりセンサ特性がたとえ変化したとしても、それぞれのセンサが同程度に変化すると考えられ、その場合センタ補正に関してはそれらの変化は相殺しあうことになることと、センタ補正に関わるロボットの動作も腰部の回転という1軸のみの運動であるのでロボットの運動による誤差も小さいものと考えられる。一方、距離検出に関してはセンサは近接センサのみであるのでセンサの誤差はそのまま検出誤差に表れ、この場合のロボットの運動も肩部、肘部、手首の2軸の併せて4軸の誤差が合併されることから方向検出の場合程の光センサによる修正は期待できないようである。

超音波センサによる方向探索に要する時間は、方向により大小はあるが、等分法の場合1分14秒から1分37秒にたいして、2分法では42秒から1分3秒で約30秒の時間短縮となった。2分法を採用することによって、精度では

表2. 等分法による結果

円筒 φ53, 高さ 133mm, 温度24℃

条件	方向	距離U	方向U	距離O	方向O	高さO	幅20	明るさ	幅3
等分法 点灯 (60 lux)	10	348.1	9.2	345.6	10.3	132.4	57.7	48.4 30.0	54.3
	5	347.9	4.0	349.5	5.3	132.4	57.7	54.2 27.8	54.2
	0	348.1	-0.8	351.2	0.5	132.4	57.3	46.0 24.7	54.2
350mm	-5	347.6	-5.6	350.3	-4.7	132.6	58.0	55.1 34.5	54.3
	-10	347.7	-10.4	351.1	-9.7	132.4	57.9	53.8 33.1	53.6

表3. 2分法による結果

円筒 φ53, 高さ 133mm, 温度23℃

条件	方向	距離U	方向U	距離O	方向O	高さO	幅20	明るさ	幅3
2分法 点灯 (60 lux)	10	347.7	9.1	350.6	9.8	131.0	56.8	47.4 51.3	55.9
	5	348.5	4.2	349.4	4.8	131.8	57.0	56.7 53.1	55.9
	0	347.9	-0.8	349.3	-0.1	131.9	57.0	59.3 54.1	55.9
350mm	-5	348.3	-5.8	351.8	-5.2	131.8	56.7	48.4 44.8	55.9
	-10	348.5	-10.9	349.9	-10.3	131.8	55.7	45.5 40.6	56.1

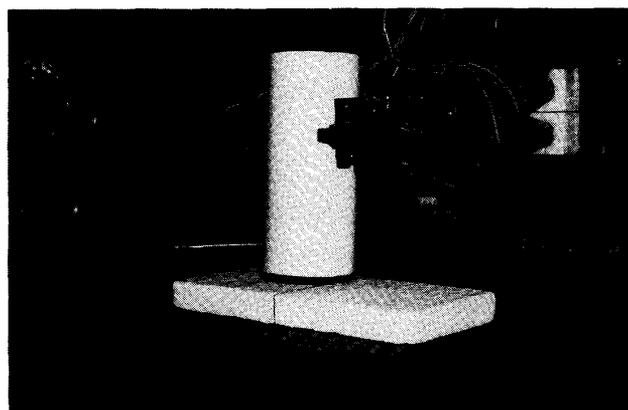


写真1

等分法と大差なく方向探索時間の短縮が得られたわけである。

円筒の把握にかんしては写真1. のようにいずれの場合にも成功した。ただしこれは前述の光センサによるセンタ補正の効果にもよる。把握位置の探索において探索キザミ幅(Dx)は5mmとしたが、図9.においてx₁が円筒の直径部になったとすると、直径53mmの円筒の場合R₁とR₂またはR₀との差は約0.5mm(左右合わせると1mm程度)となるが、探索の最終段では左右それぞれRの値は3mm程度であり、センサ特性では感度の高い近距離部であるので、Rの値の絶対値はともかく大小関係は容易に検出できるので誤差はキザミ幅の範囲内におさまるものと思われる。この程度の誤差内であれば把握部と直径部の大きさの違いも1mm程度以内におさまるので把握に支障がないともいえる。

幅検出センサの精度を示す幅の検出値についてみてみるとこのセンサによる最終的な検出値は幅20であるが、

これはグリップ開度の誤差も含んでいるため、把握時のグリップ開度から求めた幅3との違いを幅検出センサの誤差とみるべきである。そのように考えると表2.、表3.において誤差は $-0.4 \sim 4.3\text{mm}$ となっておりかなり大きいといえる。ただし表2.、表3.のそれぞれにおける幅検出値をみても表2.では $57.3 \sim 58.0$ 、表3.では $55.7 \sim 57.0$ とばらつきはそれぞれ0.7、1.3と小さく同条件下ではほぼ同程度の値をとることがわかる。すなわち最適把握位置の探索において仮定した同条件下での相対的關係は不変としたことの妥当性をしめすものと考えられる。

以上、2分法の適用により方向探索の所要時間の短縮および最適把握位置の探索法適用により当初の目的である円筒対象の把握を実現できた。しかしながら幅検出センサによる幅検出精度の向上は今後の問題として残されている。また今後加えるべきセンサとして形状認識のための視覚センサ、把握圧力調整のための圧覚センサなどが挙げられる。

おわりに、本研究において昭和62年度の卒業研究の学生諸君より多大の協力をいただいたことに謝意を表します。本報告における図の作製にあたってCANDY 2を、機械語プログラム作成にあたってはCP/M, MACRO-80を利用した。光センサ特性の決定及び特性図作製には電子計算機室DS600/80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 (第2報)、宇部高専研究報告、第32号、昭61
- 2) 松井：教育用ロボットアームのパソコンによる制御 (第3報)、宇部高専研究報告、第33号、昭62
- 3) 若松ほか：ロボットの制御、計測自動制御学会 昭60
- 4) 中野：ロボット工学入門、オーム社、昭58
- 5) 実用産業用ロボット技術便覧編集委員会：省力化自動化のための実用産業用ロボット技術便覧、産業技術調査会 昭60
- 6) 横田：Z-80の使い方、オーム社 昭56
- 7) ジャコビ、コワリク、ピゾ／関根訳：非線形最適化問題の反復解法、培風館、昭51
- 8) 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
- 9) Zangwill, W.I.: Minimizing a function without calculating derivatives, *Compt.J.*, Vol.10, 1967
- 10) システムソフト：PC-Techknow 8800 Vol.1, アスキー出版 昭58
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 計測自動制御学会：ロボット用センサの現状と動向、計測と制御、Vol.26, No.2 昭62

(昭和63年9月20日受理)