

パソコングラフィックスを用いた教育用ロボットアーム の動作教示の一例

松 井 稜 治*

An Example of Teaching a Robot Arm working trajectories using Personal Computer Graphics

Ryoji MATSUI

Abstract

In this report, how to teach a robot arm working trajectories using personal computer graphics is discussed. Here, the angular displacements of its joint axes are calculated from the position of its hand indicated by the mouse as a input device. Using their values, the figures of the robot arm are drawn on the display screen. If adopted, their data are stored, or if not adopted, present data are discarded and the previous figures are drawn again. In this way, the input data to the robot arm are generated through trial and error.

1. まえがき

近年産業界における産業用ロボットの利用は自動化、省力化の動きとともに急増している。現在、センサロボットや知能ロボットの開発も急ピッチで進められているが、産業界においてはプレイバックロボットの利用がまだ多くを占めている。

プレイバックロボットの利用においては、ロボットへの動作の教示は最も手数のかかる作業の一つである。この作業を如何に容易なものとするかは、現在でも重要な課題のひとつであるといえよう。これまではこのような作業はティーチングボックスを用いて記号や数値をキーインするものや人が手で教えるものを中心となっていた。しかしながら近年パソコンなどのグラフィックスの進歩は目ざましく、このパソコングラフィックスを利用して、視覚的にロボットへの動作の教示を試みるのもひとつの

方法であろうと思われる。

本研究室では上のような理由により教育用ロボットアームのハンド先端位置をグラフィック画面上でマウスにより指示し、その位置からパソコンにより各軸の変位角を計算し、グラフィック表示するためのソフトウェアの開発を試みた。

2. ロボットアーム

ここで用いたロボットアームは教育用ロボットアーム RM101 (5 自由度多関節形) で構造は図 1 のようになっている。

本ロボットアームの経路制御は基本的には PTP 制御である。しかもロボットへの動作指令は各関節部パルスモータに変位角に比例するステップ数を入力することによる。したがって入力データからハンド先端の位置を推定することは容易でない。そこでパソコングラフィックスを用いて予め入力データを生成しておくことは動作教示を容易にするものとおもわれる。

*宇部工業高等専門学校機械工学科

3. 問題の設定

ここでは、水平面上におかれた対象物（ワーク）を把握し、移送することを目的とする。

ここで使用するパソコン(PC-9801)の画面は640*400であり、ロボットアームの長さがハンドを含めて約350mmであることを考慮すると1ドットが1mm程度という事になるので高精度のデータは得られないことと、実際に得られたデータをロボットに入力しても機械的な誤差などがあることを考え合わせて、後で修正が行われるものとする。すなわち、図2のような流れになるものとする。

ここでは第1ステップのグラフィックによる基礎データ生成について議論を進めることにする。

グラフィック部は大きく分けて3つのモードに分けられる。これを図3に示す。

マウス誘導モードはマウスにより指定された位置にハンド先端を動かす、ワーク（対象物）の把握位置まで誘導する。把握モードはハンドがワークを把握する様子をグラフィック表示する。このモードではハンド部を拡大して表示する。移動モードでは把握したワークを指定場所まで移送し、アームを戻す。

4. 準備

4.1 マウスにより指定されるハンド位置と各関節変位角との関係

マウス誘導モードおよび移動モードではマウスにより指定される位置にハンド先端を移動させる。このときのハンド先端位置と各関節軸の角度との関係が必要である。ここではまず各関節の角度からハンド先端の位置を求めてみよう。

図4において、点(0, 0)は第2関節部すなわち肩

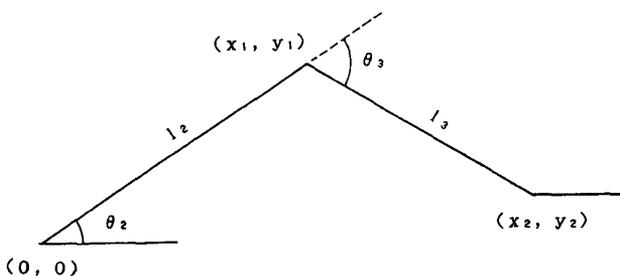


図4

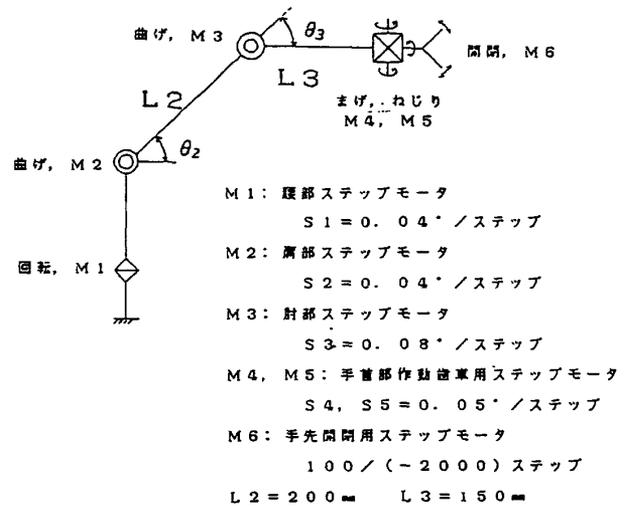


図1 ロボットアーム構造

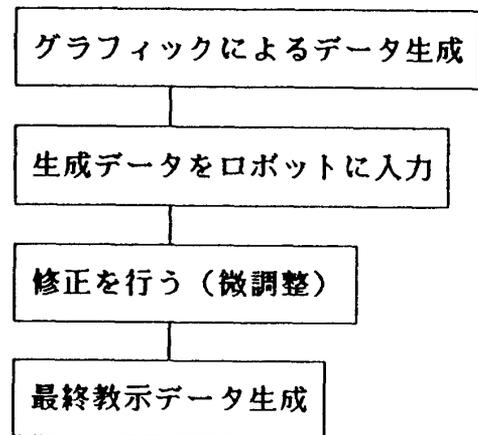


図2 動作教示流れ図

グラフィック部概略

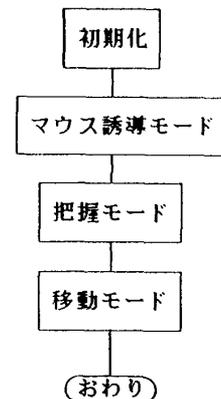


図3

部, 点 (x_1, y_1) は第3関節部すなわち肘部, 点 (x_2, y_2) は手首部の座標とする。このとき x_1, y_1 は

$$x_1 = l_2 \cos \theta_2 \quad (4.1)$$

$$y_1 = l_2 \sin \theta_2 \quad (4.2)$$

となり, 手首部は (x_1, y_1) を原点とする座標系で水平方向 (x 座標) l_3 の距離にあった点が $\theta_2 - \theta_3$ だけ回転したものと考え, Denavit-Hartenberg の記法を用いると, x_2, y_2 は

$$r_0 = Ar_1 \quad (4.3)$$

ここで

$$r_0 = (x_2, y_2, z_2, 1)^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 - \theta_3) & -\sin(\theta_2 - \theta_3) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_2 - \theta_3) & \cos(\theta_2 - \theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$r_1 = (l_3, 0, 0, 1)^T$$

したがって

$$x_2 = l_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) + x_1 \quad (4.4)$$

$$y_2 = l_3 \sin(\theta_2 - \theta_3) + y_1 \quad (4.5)$$

となる。

つぎにハンド先端位置 (x_h, y_h) が指定され, ハンドの姿勢は水平方向に保たれるものとする,

$$x_2 = x_h - l_h \quad (l_h: \text{ハンドの長さ}) \quad (4.6)$$

$$y_2 = y_h \quad (4.7)$$

となる。ここでは, (4.6), (4.7) より求められる x_2, y_2 を (4.4), (4.5) に代入して, 逆に肩部, 肘部の角度 θ_2, θ_3 を求めなければならない。一般にこのような逆問題を解くことは容易でないが, この場合は幾何学的関係を用いて容易に解くことができる。

図4より (x_1, y_1) は原点を中心とする半径 l_2 の円と点 (x_2, y_2) を中心とする半径 l_3 の円との交点であるから,

$$x_1^2 + y_1^2 = l_2^2 \quad (4.8)$$

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = l_3^2 \quad (4.9)$$

を解くことにより, x_1, y_1 は求められる。ただし, 解は2組求められるがロボットアームの構造より決まる制限条件を満たすものを選ぶ。この場合は

$$\theta_3 > 0 \quad (4.10)$$

が制限条件となる。解はつぎのようになる。

$$M = \frac{(x_2^2 + y_2^2) + (l_2^2 + l_3^2)}{2} \quad (4.11)$$

$$Q = x_2^2 M^2 - (x_2^2 + y_2^2)(M^2 - y_2^2) \quad (4.12)$$

$$x_1 = \frac{x_2 M \pm \sqrt{Q}}{x_2^2 + y_2^2} \quad (4.13)$$

$$y_1 = \frac{M - x_2 x_1}{y_2} \quad (4.14)$$

(4.14) により y_1 は2個求められるが, 制限 (4.10) よりそれらのうち大きい方の値を採用すればよい。これらを用いると

$$\theta = \tan^{-1} \{ (y_1 - y_2) / (x_2 - x_1) \} \quad (4.15)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} (y_1 / x_1) \quad (4.16)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + \theta \quad (4.17)$$

となる。

また手首部は差動歯車であることから, この駆動部の回転角をそれぞれ θ_4, θ_5 とすると, ハンドの捻り角 θ_w , 曲げ角 θ_b はつぎのようになる。

$$\theta_w = (\theta_4 + \theta_5) / 2 \quad (4.18)$$

$$\theta_b = (\theta_5 - \theta_4) / 2 + \theta_2 - \theta_3 \quad (4.19)$$

ハンドを水平に保つ条件は $\theta_w = 0, \theta_b = 0$ とすることにより求められる。

4.2 ハンドの捻り, 曲げのある場合の作図

本問題ではハンドは水平状態を保つ。しかしながら, アームの動作に汎用性, 拡張性をもたせるため, ここではハンドの捻りや曲げを考慮して作図することにする。捻り角および曲げ角は (4.18), (4.19) により求められる。いまアームの前後方向を x 軸, 上下方向を y 軸, 左右方向を z 軸とすると, ハンドの初期姿勢は水平面内すなわち xz 平面内にある。図5に示される xz 平面内の線分がグリップ部を原点として, θ_w だけ捻られ, さらにその面が θ_b だけ曲げられるものとする, $(l_0, 0, w_0)$ の点は

x 座標: $l_0 \cos \theta_b$
 y 座標: $l_0 \sin \theta_b \cos \theta_w - w_0 \sin \theta_w$
 z 座標: $l_0 \sin \theta_b \sin \theta_w + w_0 \cos \theta_w$

となる。ハンドを形成する各線分の端点を上の関係を用いて座標変換することにより, ハンドの側面図や平面図が得られる。

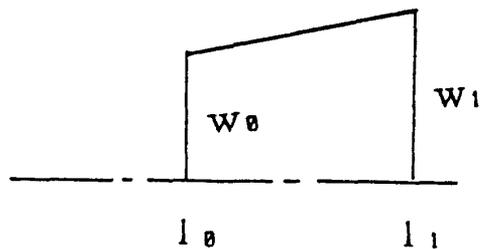


図5

5. マウス誘導モード

このモードでは初期位置にあるアームをワークを把握する位置まで、マウスを利用して試行錯誤的に誘導する。このモードではアームの側面図を主体として表示し、アームの方向とワークとの相対的な位置関係を示すために平面図略図を右上隅に表示する。なおハンド部は側面図においても略図で表示する。

このモードの流れ図を表6に示す。マウスにより位置が指定されると、(4.11)~(4.17)を用いて第2軸および第3軸の所要ステップ数を計算し、ハンド水平の条件より第4、第5軸のステップ数を決める。第1軸の回転ステップ数およびハンド開閉のステップ数はキーボードより入力する。以上のデータを用いて側面図、平面図を表示する。その結果を採用する場合はデータを保存し、不採用の場合は現画面を消去して旧データによる画面に戻す。このような試行錯誤を繰り返して把握位置までアームを誘導する。作図例を図7、図8に示す。図7は初期画面で10°の方向に直方体をおいている。図8は把握位置

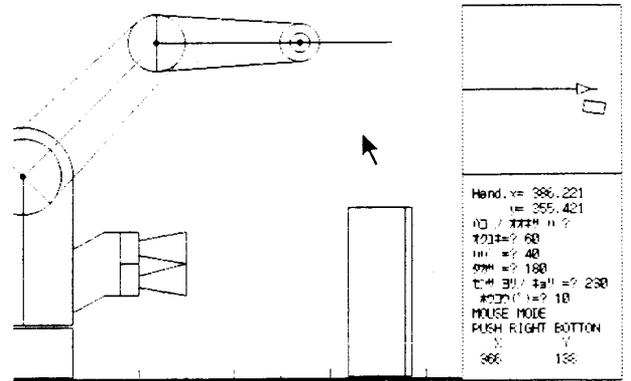


図7

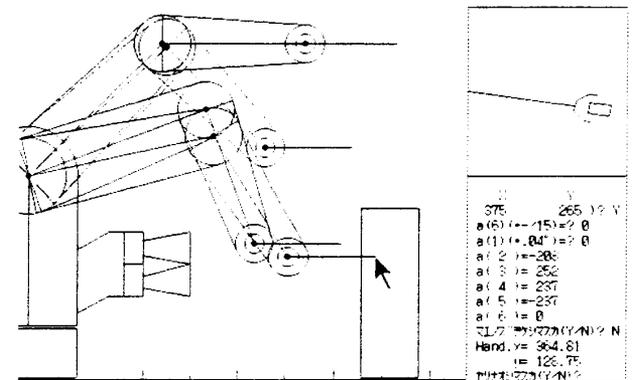


図8

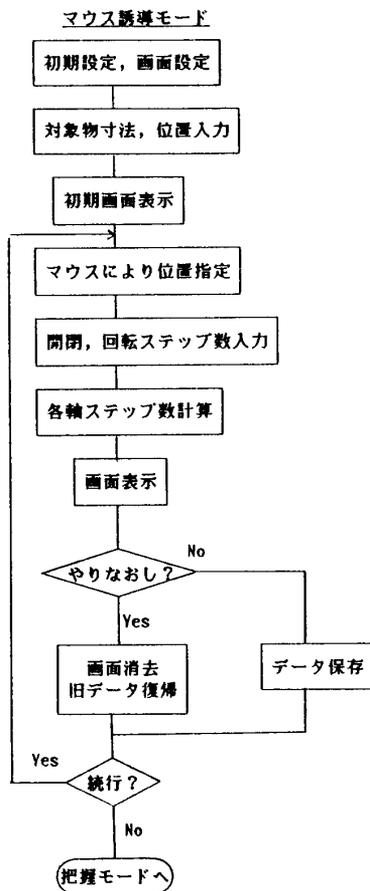


図6

まで到達したところであるが、このモードの側面図は途中の画面を残すことができる。またアームの回転とともに側面図も方向を変えている。図中の矢印がマウスの指定する位置をしめしている。

6. 把握モード

このモードでは把握状況を確認するためハンド部とワークのみを平面図で表示する。このモードでのアームの動作はハンドの開閉と把握の深さを調節するためのアームの前後(水平)運動である。

ハンドを水平面上で直線的に前後運動させるには(4.5)式において y_2 を一定に保ちながら動かせばよい。そのためには、いま一定値を y_c とし、移動距離は微小でその値を dx とすると

$$d\theta_2 = -\frac{\cos(\theta_2 - \theta_3)}{l_2 \sin \theta_3} dx \tag{6.1}$$

より θ_2 の変化分 $d\theta_2$ を求めて、 $\theta_2 \leftarrow \theta_2 + d\theta_2$ として、水平移動の条件より

$$s = (y_c - l_2 \sin \theta_2) / l_3 \tag{6.2}$$

とすると、

$$\theta_3 = \theta_2 - \tan^{-1}(s/\sqrt{1-s^2}) \quad (6.3)$$

により、 θ_3 が求められる。

このモードの流れ図を図9に示す。前述のようにハンド開閉動作と前後運動があるので、データとしてそれぞれ開閉ステップ数あるいは移動量(mm単位)を入力する。このモードでも試行錯誤により移動データを作成するので、やりなおすばあいは現画面を消去して旧データに復帰する。例を図10、図11に示す。図10は把握モードの初期状態であり、図11は把握が終了した例で、把握力を増すためハンドがワークにくいこんだ状態になっている。

7. 移動モード

このモードでは前ステップで把握されたワークを所定の位置に移送し、アームを初期状態に戻す。移動状況は側面図と平面図上に略図(スティック図)で表示する。ワークが移送中(把握)かそうでないかはキー入力により指示する。移送中の場合はワークはアームとともに動かさばよい。移動先の位置はマウス誘導モードと同様にマウスにより指定し、試行錯誤によりデータは作成される。流れ図を図12に示す。

作図例を図13—図17に示す。図13は前の把握モードの終了状態である。図14でワークを持ち上げ、図15で所定の位置に移動し、図16でワークを放し、図17でアームを引いた状態を表示している。ワークの移動中はハンドは水平を保たれている。

8. 結言および今後の課題

ここでは水平面上にある直方体のワークを所定の位置に移送するために必要なロボットアームの各軸の動作ステップ数データを作成するために、パソコングラフィックスを利用してアームおよびワークの状態を表示し、マウスにより指定される位置に移動するために必要な計算および作図を行うプログラムを作成し結果を示した。

しかしながら次のような多くの問題点が残されている。

- 1) この例ではワークは直方体に限られている。さらに一般的な形状のワークに対応するにはワークの立体的なデータの表現法を考えなければならない。
- 2) ハンドは本例では水平に保たれている。マウス誘導モードではこれで十分と思われるが、他のモードではハンドの捻りや曲げも加えたほうが汎用性が増す。そのた

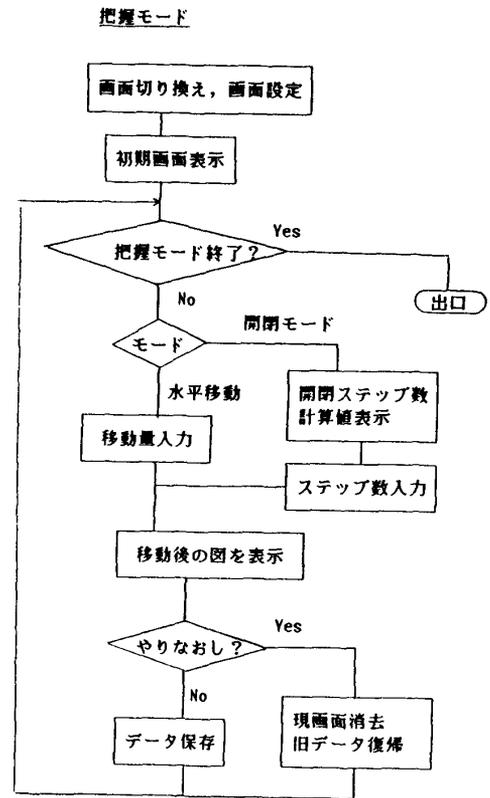


図9

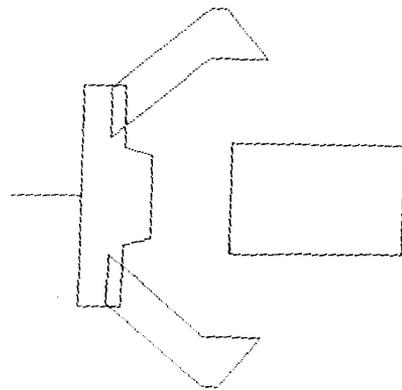


図10

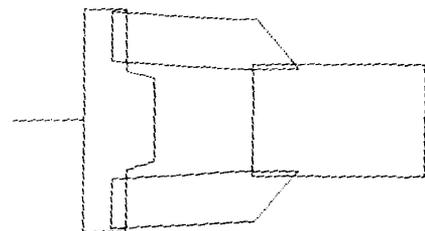


図11

移動モード流れ図

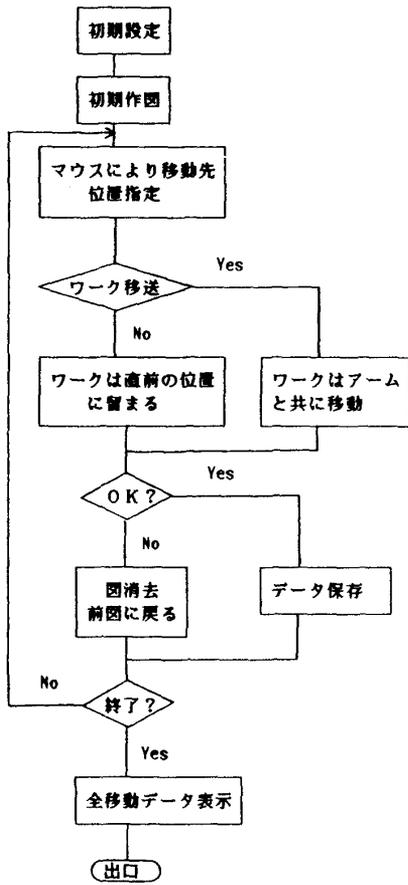


図12

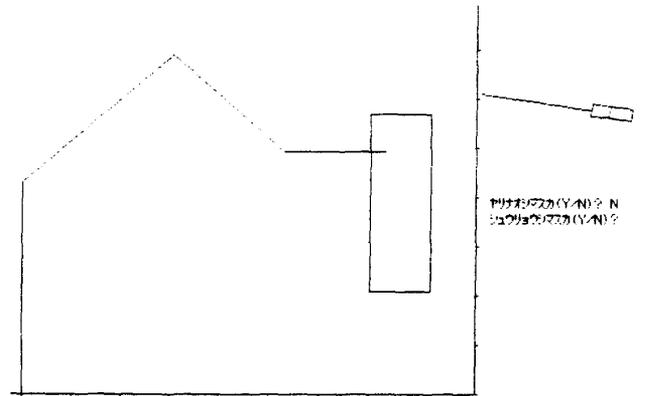


図14

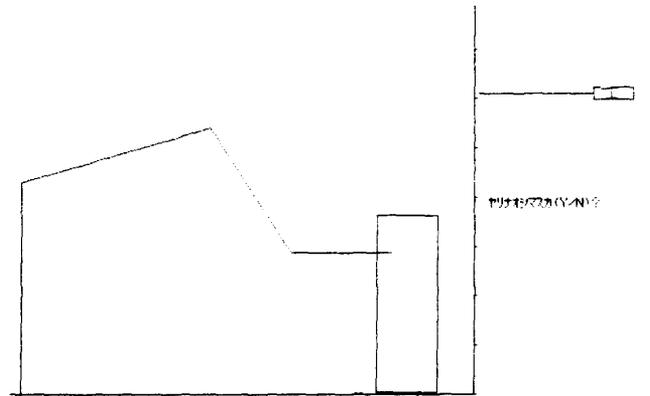


図15

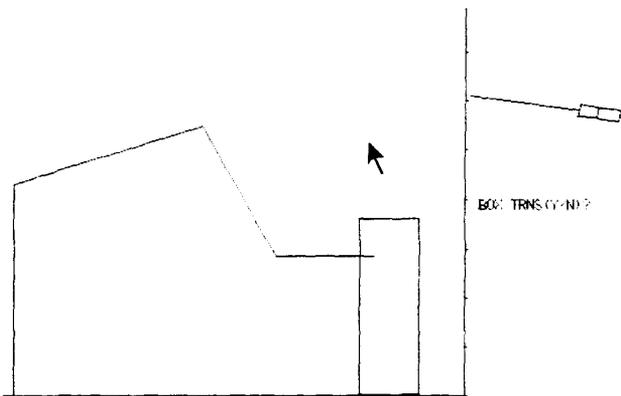


図13

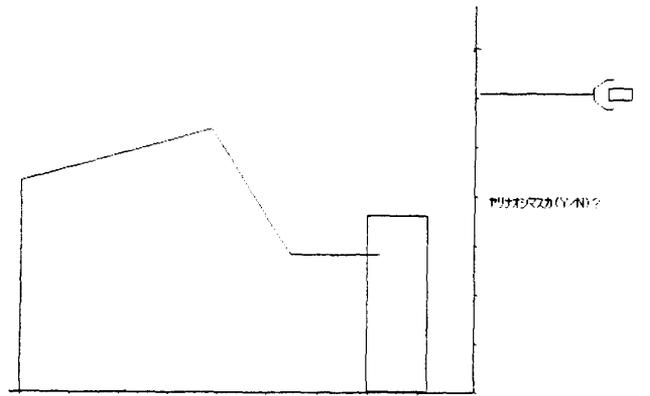


図16

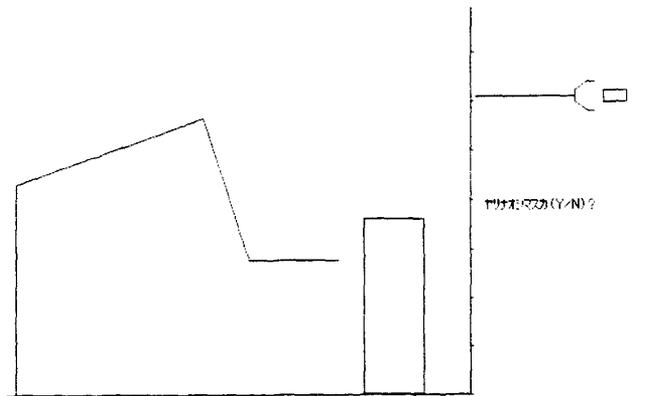


図17

めにこのプログラムではハンドの捻りや曲げの動作も可能にしている。したがってワークの把握後の捻りや曲げによるワークの姿勢の変化に対応する作図法を加える必要がある。

3) ここでは図2の第1ステップのグラフィック部についてプログラミングし実行した。この場合の生成データは保存されているので第2ステップも容易に実行することができる。したがって第3ステップの実際にロボットアームを動かしたときの修正法を開発することにより、本プログラムもより有用性を増すものと思われる。

4) ここでは平面図、側面図の組み合わせで3次元表現しているが、3次元グラフィックスを加えればさらに理解し易いものとなるであろう。

5) 本プログラムはBASICで記述されている。今後さらに拡張性、汎用性を増すにはプログラムを構造化する方がよいものと思われる。そのためにはC言語などの構造化言語を用いるべきであろう。

おわりに、本プログラムを作成するにあたって、昭和61年度、昭和62年度の卒業研究学生諸君より多大なる協力をいただいたことに謝意を表します。

なお利用したパーソナルコンピュータはPC9801である。

参考文献

- 1) 中野栄二：ロボット工学入門，オーム社
- 2) 日本機械学会編：産業用ロボットとその応用，技報堂
- 3) 若松ほか：ロボットの制御，計測自動制御学会
- 4) 花房編：ロボットの機構と制御，コンピュータロール，No9，昭60.1.
- 5) 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.
- 6) 河西朝雄：98グラフィックス入門，技術評論社
(昭和62年9月20日受理)