

任意曲線自動追従装置

竹前 忠* 北澤鉄也** 菊地昭洋*** 松山 潔****

An Automatic Follower of Arbitrary Drawings

Tadashi TAKEMAE, Tetsuya KITAZAWA, Akihiro KIKUCHI,
and Kiyoshi MATSUYAMA

An experimental construction has been performed of the title follower which is capable of automatic input of drawing's coordinates to computer. This device is composed of a section for sensing drawings on a plane, its driving unit, and a section for outputting drawing's coordinates. The sensor section comprising optical fibers is kept out of contact with the drawing paper and is driven by the two-axe control method. The trajectory of the sensor section is converted into electrical signals by means of potentiometers. There will be produced a little difference between the trajectory of the sensor section and the drawing, so that the electrical signal is designed to be compensated for this difference in order for drawing's coordinates to be detected.

1 緒 言

紙面に描かれた曲線の座標情報を検出して、計算機などの情報処理装置へ入力するためには、図形入力装置が用いられている。現在、この種の装置としては、ライトペン、ディジタイザ、データタブレットなどが使用されている¹⁾。しかし、これらの装置の座標検出は主として人間の目視と手動によっているため、迅速な連続的検出はかなり困難であり、この点の自動化が望まれている。

一方、任意波形発生などに使われている曲線座標検出装置は座標検出を自動的に行なうが、通常センサ部をX軸方向は強制的に定速移動させ、Y軸方向は曲線に沿って制御して座標検出している。これでは閉曲線などの座標検出は困難である。

本研究はこれらの点にかんがみ、センサ部と駆動方式とに新たな提案を行ない、曲線座標検出始点の指定と実効的に検出点数の倍増を行なう論理系および2軸駆動制御方式による曲線自動追従装置の試作を行ない、その動作特性について検討したものである。また、図形入力装置として閉曲線で囲まれた面積や曲線の長さの測定を行ない本装置の有用性をも確認した。

* 精密工学教室 助手

** アルプス電気(株)

*** 大学院修士課程

**** 精密工学教室 教授

2 センサ部とその動作原理

センサ部のヘッドは半径 r の小円としてあるので被追従曲線との交点，すなわち検出点は一般に複数個生ずる（図1では P ， Q 2点である）．そこで後述の論理回路で検出始点 1 点を選択指定する．図1の場合は P 点から r 円周上で時計方向に連続的に検出していくものとする．曲線 $f(x, y) = 0$ を追従させる方式は色々考えられるが，我々は次のような運動方程式に従うようにした．

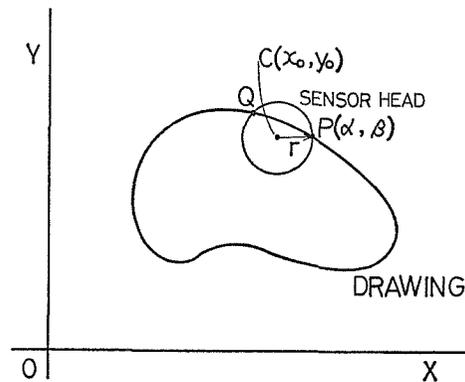


Fig.1 Fundamentals of Operation

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_0}{dt} &= V_x = K_x(\alpha - x_0) \\ \frac{dy_0}{dt} &= V_y = K_y(\beta - y_0) \\ (\alpha - x_0)^2 + (\beta - y_0)^2 &= r^2 \\ f(\alpha, \beta) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに， K_x ， K_y は速度比例定数である（各座標は図1参照）．このようにした理由は次のとおりである．センサヘッドの中心 C は被追従曲線と常に一定の大きさ r のベクトル偏差 \vec{CP} を有しているが，その X ， Y 成分は追従の進行につれ， $f(x, y) = 0$ に応じて大きく変動する．そこで偏差成分が大きい程それに比例して速い速度で追従させることによりセンサヘッドの追従性が向上するものと考えられるからである（例えば，直角折れ線追従の場合など）．(1) 式をラプラス変換して整理すると次式を得る．

$$\begin{pmatrix} L[x_0(t)] \\ L[y_0(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{K_x}{S + K_x} & 0 \\ 0 & \frac{K_y}{S + K_y} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L[\alpha(t)] \\ L[\beta(t)] \end{pmatrix} \quad (2)$$

(1)，(2) 式を併せて本装置の動作原理をブロック線図で示すと図2のようになる．

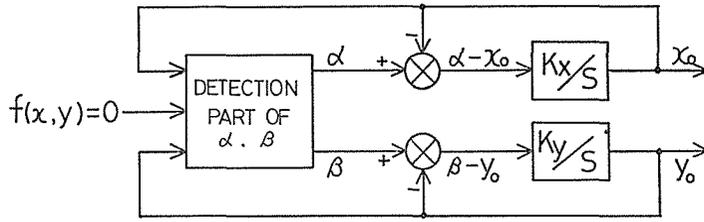


Fig.2 System Block Diagram

ここで、 $K_x=K_y=K$ とすると、センサヘッド中心点 C の速度の絶対値 V は (1) 式から、

$$V = \left\{ \left(\frac{dx_0}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy_0}{dt} \right)^2 \right\}^{1/2} = K \cdot r \tag{3}$$

となり一定になる。

次に、具体的な例として図3と図4に示すように被追従曲線が円と直角折れ線の場合について C 点の追従軌跡を計算して検討した。被追従曲線が半径 R の円では、定常状態において C 点の追従軌跡円の半径 R' は、

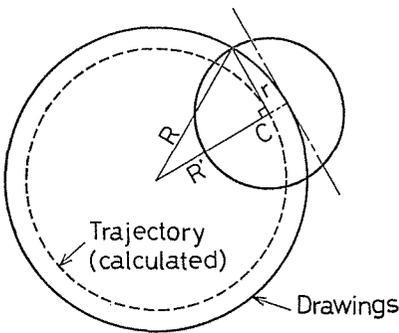


Fig.3 Example 1 (Circle)

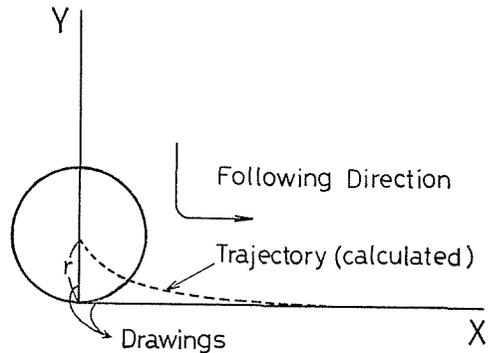


Fig.4 Example 2 (Normal Line)

$$R' = \sqrt{R^2 - r^2}$$

となり、

$$\Delta R = R - R' = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

で表わされる定常偏差 ΔR が生じる。また、直角の折れ線では、 C 点の追従軌跡は次式で表わされる。

$$x = -r \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2} + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2} - 1}{\sqrt{1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2} + 1} \right| \right\}.$$

このように、センサヘッド中心点 C の追従軌跡は必ずしも被追従曲線と一致していない。従って、本装置を図形入力装置として応用する場合は、交点 P の座標を出力として用いる必要がある。そのために我々は後述の補正回路²⁾を付加した。

3 試作装置

図5 (a)は試作した装置のブロック線図である。同図について以下各要素の構成とその動作を説明する。同図(b)は試作装置の全景である。

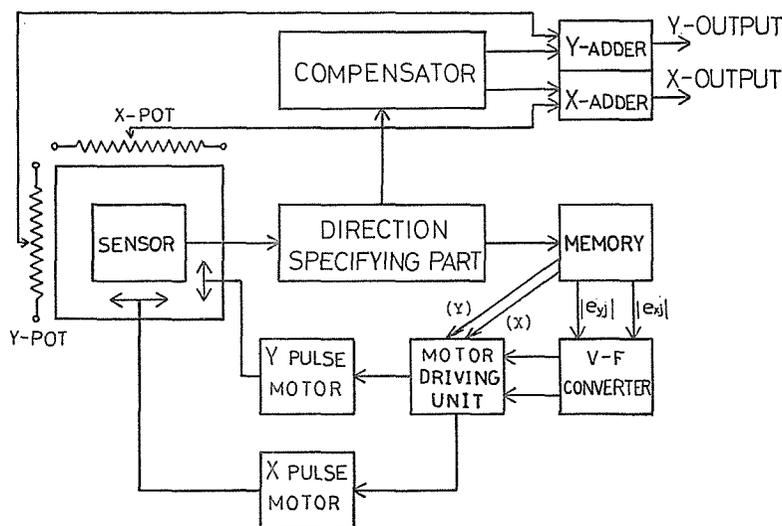


Fig.5 (a) Block Diagram of the Present Device

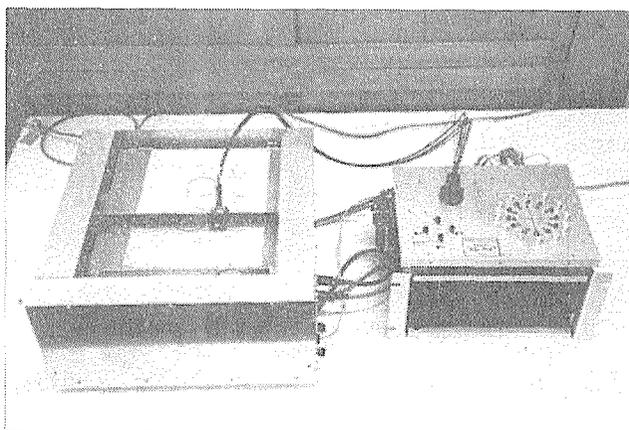


Fig.5 (b) Photograph of the Present Device

3-1. センサ

図6に示すようにセンサヘッドは直径1mmの柔軟性のあるアクリル光学ファイ

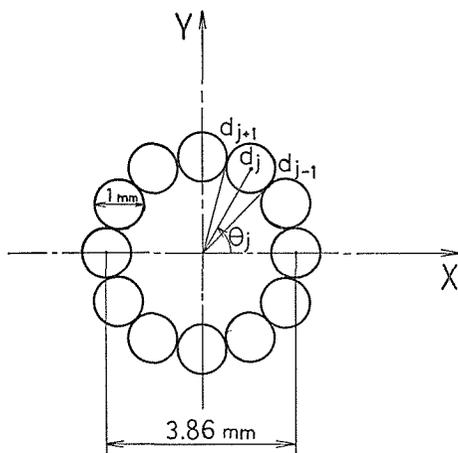


Fig. 6 Sensor Head

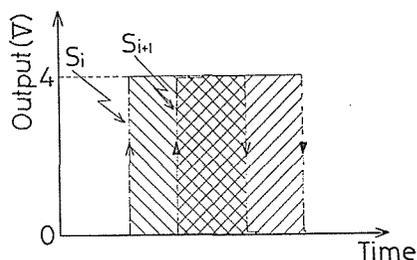


Fig. 7 Output of the P-E (Photoelectric Converter)

パ12本を半径 $r=1.93\text{mm}$ の円周上に配列してある。その1端面が検出端で、その他端には各ファイバ毎に光電変換器 (図. 8, P-E) を設けてある。隣接する2本のファイバのP-E出力の実測例を図7に示す。この図で見られるように各ファイバのP-E出力は検出動作が中断されないように重なっている。

3-2. 方向指定部

方向指定部は図8において12個のP-E出力を入力するS端子群からQ端子群までの部分とQ端子群からD端子群までの部分とから成り、前者は検出始点を指定する論理回路である。また、後者は検出点の数を実効的に倍増する論理回路である。被追従曲線とセンサヘッドとの交点数に対応してS端子群にP-E出力が入力されるので、その中の任意の1つ S_i に対応するマスタスレイブフリップフロップ (J-K MSF-F) のタイミング端子TをトリガするとQ端子群の Q_i にだけ出力が生じ検出始点が1点指定され、以後自動的に逐

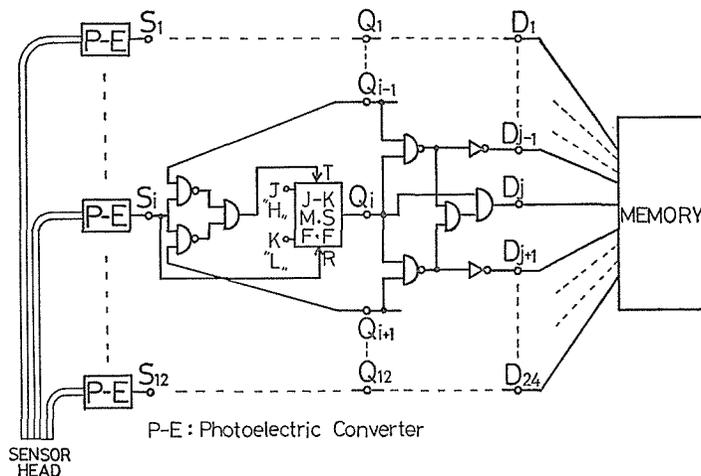
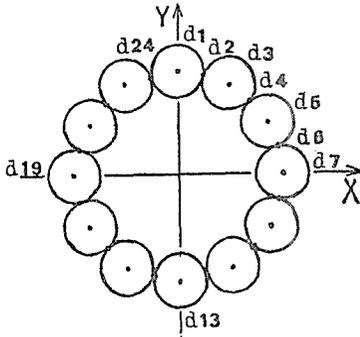
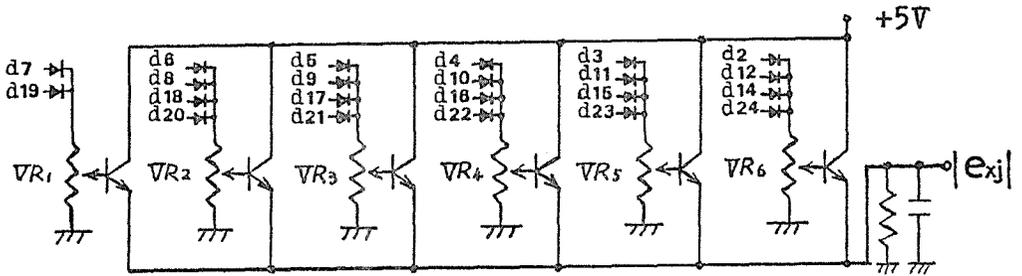
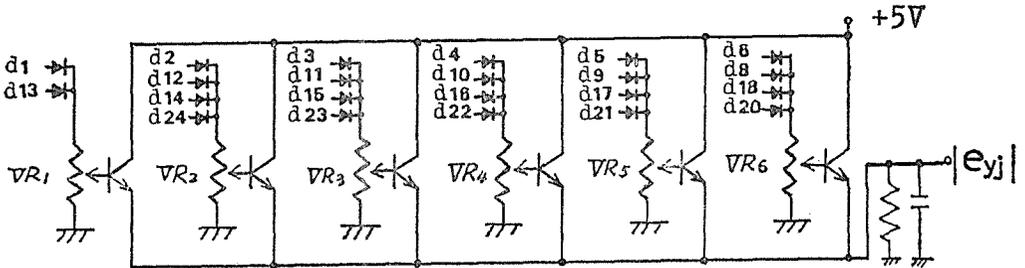


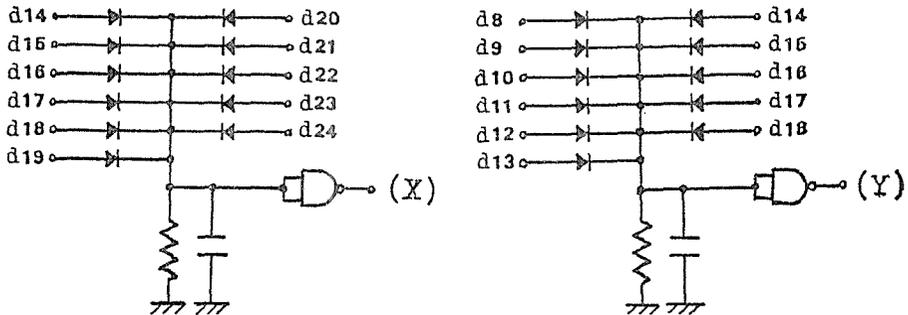
Fig. 8 Direction Specifying Part



- $VR_1 : \sin 90^\circ$
- $VR_2 : \sin 75^\circ$
- $VR_3 : \sin 60^\circ$
- $VR_4 : \sin 45^\circ$
- $VR_5 : \sin 30^\circ$
- $VR_6 : \sin 15^\circ$



Signal of rotary velocity



Signal of rotary direction

Fig.9 Memory

Table 1 Truth Table

S_i	Q_{i-1}	Q_{i+1}	Q_i	D_{j-1}	D_j	D_{j+1}
L	L	L	L	L	L	L
L	L	H	L	L	L	L
L	H	L	L	L	L	L
L	H	H	L	L	L	L
H	L	L	H	L	H	L
H	L	H	H	L	L	H
H	H	L	H	H	L	L

次連続して検出動作が遂行される。オプティカルファイバは12本であるので検出点数は12であるが各ファイバの隣接点間に被追従曲線がまたがった時も検出信号を等価的に発生させるようにしたのが検出点数倍増回路である。これらの論理回路動作の真理値表を表1に示す。ここで、図6のセンサヘッドの検出点 d_j と図8の D_j 端子とは対応している。

3-3. 記憶部

記憶部は図6に示すセンサヘッドの検出点 d_j に対応して、(4)式で決まる電圧の絶対値 $|e_{xj}|$, $|e_{yj}|$ をポテンショメータに記憶しておき、 D_j 端子出力で動作する電子スイッチにより $|e_{xj}|$, $|e_{yj}|$ を読み出す部分と、 e_{xj} , e_{yj} の符号に対応して電圧 5v, 0v を上記と同様に読み出す部分から成っている。

$$\left. \begin{aligned} e_{xj} &= E \cdot r \cdot \cos \theta_j \\ e_{yj} &= E \cdot r \cdot \sin \theta_j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 E は設定定数である。

X 方向および Y 方向のパルスモータの回転速度はそれぞれ e_{xj} と e_{yj} の絶対値により決まり、また回転方向はそれらの符号に対応した信号 5v, 0v でそれぞれ決まる。図9はこれらの機能を行なわせる具体的な回路である。

3-4. 電圧一周波数変換回路

電圧一周波数(V-F)変換回路は上記3-3の前者部分の出力電圧 $|e_{xj}|$, $|e_{yj}|$ に比例した周波数のタイミングパルスが発生する。従って、 e_{xj} , e_{yj} の符号に対応した回転方向を含めた X , Y 方向パルスモータの回転速度 ω_{xj} , ω_{yj} は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \omega_{xj} &= c \cdot e_{xj} \\ \omega_{yj} &= c \cdot e_{yj} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで c は、V-F変換定数や1パルス当りのパルスモータの回転角などで決まる。

3-5. モータ駆動ユニット

モータ駆動ユニットの全体構成模様を図10に示す。各パルスモータのプーリ半径を a , 動力伝達ナイロンベルトの滑り、伸縮等を含めた速度効率を ξ とすると、センサヘッドの速度成分 V_{xj} , V_{yj} は(4), (5)式により次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} V_{xj} &= \xi \cdot a \cdot \omega_{xj} = \xi \cdot a \cdot c \cdot E \cdot r \cdot \cos \theta_j \\ V_{yj} &= \xi \cdot a \cdot \omega_{yj} = \xi \cdot a \cdot c \cdot E \cdot r \cdot \sin \theta_j \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

従って、(3), (6)式より、センサヘッドの速度の大きさ V は

$$V = K \cdot r = \xi \cdot a \cdot c \cdot r \cdot E$$

となり、速度比例定数 K は次式で与えられる。

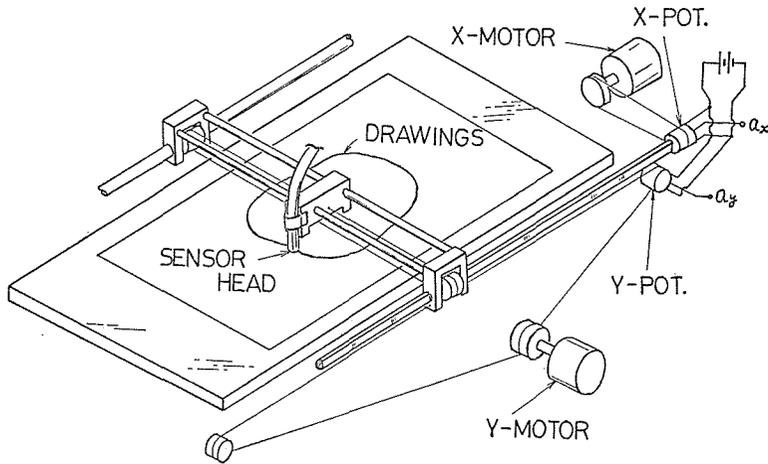


Fig. 10 Driving Unit

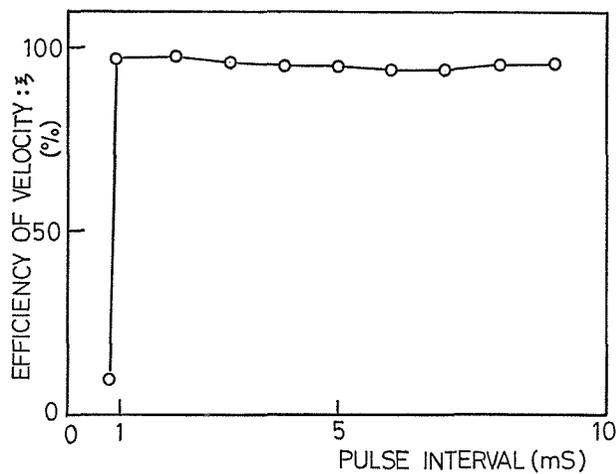
$$K = \xi \cdot a \cdot c \cdot E \quad (7)$$

4 試作装置の動作特性

試作装置の追従可能な速度限界，被追従曲線の幅の限界，折れ線の折れ角の限界などについて検討した。

4-1. 追従速度限界

図11はパルスモータのタイミングパルス周期に対するセンサヘッドの速度効率 ξ を測定したものである。この結果， ξ は使用したパルスモータ（山洋，PMM-C-306-1）の周波数トルク特性で決まる最小パルス間隔 $1m\text{ sec}$ 以上ではほぼ一定で約96%である。また，パルスモータのプーリ半径 $a=3.2\text{mm}$ であり，試作装置の最大追従速度は約 48.3mm/sec

Fig. 11 ξ of the Driving Unit

である。この時の K の値は(7)式から 25/sec となる。

4-2. 被追従曲線の最小幅

被追従曲線の最小の幅 W は、使用するオプティカルファイバの半径 m と光電変換部の閾値電圧の最大電圧に対する比率 U で決まり、図12に示すように透過光が平行光線で理想な場合、次式の関係を満たしている。

$$\pi \cdot U \cdot m^2 = m^2 \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{mW - \frac{W^2}{4}}}{(m - \frac{W}{2})} \right\} - (m - \frac{W}{2}) \sqrt{mW - \frac{W^2}{4}}$$

ここで、 $m = 0.5\text{mm}$ とした時の計算された W と U の関係を図13に示す。さらに、図14は $U = 1/2$ として、追従実験を行なった結果である。センサヘッドは線の幅約 0.7 mm の所で追従を停止している。この値は計算結果とほぼ一致していると考えられる。

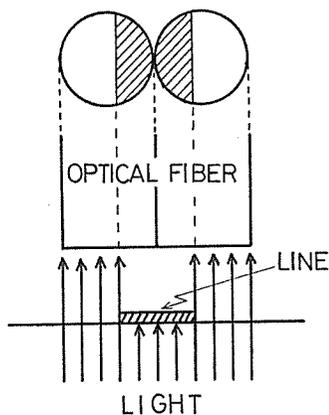


Fig.12 Detection of Line

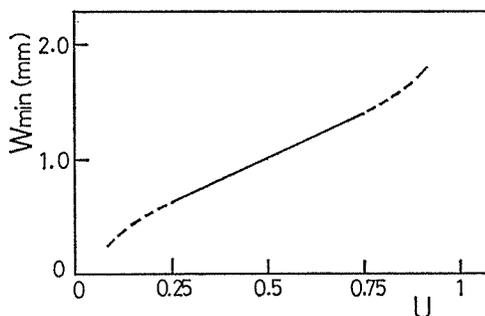


Fig.13 Limit of w (Wmin)

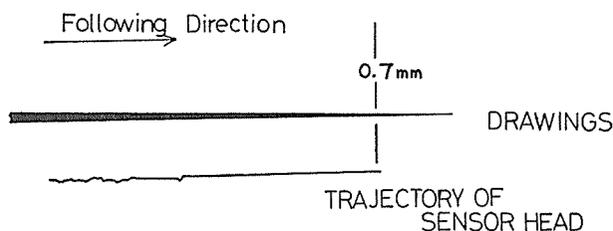


Fig.14 Limit of W

4-3. 折れ線の折れ角の限界

追従可能な折れ線の折れ角の限界 θ'_{\min} は図15に示すように、使用するオプティカルファイバの数 N と4-2で述べた U によって決まる。オプティカルファイバの半径 0.5 mm, $U = 1/2$, 線の幅を1mm以上としたとき、

$$\theta'_{\min} = \pi \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{N} \right)$$

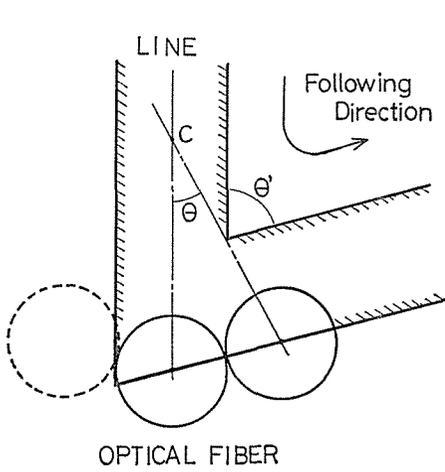


Fig. 15 Bending Angle

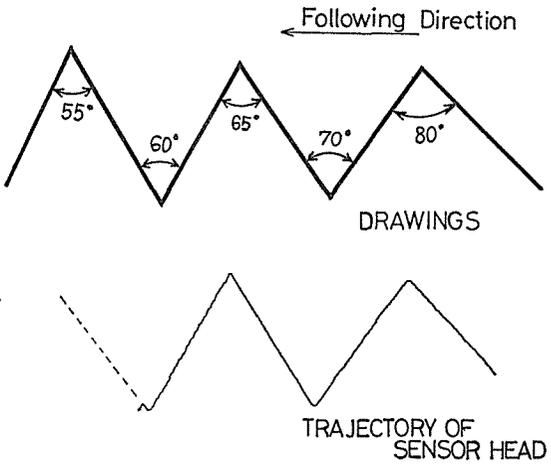


Fig. 16 Limit of θ'

Table 2 Limit of θ' (θ'_{min})

N	θ'_{min}
4	45°
8	67.5°
12	75°
16	78.8°

となる、表2は計算結果である。図16は折れ線の折れ角を除々に鋭角にして追従させた結果であり、折れ角60°で追従できなくなっている。この結果は計算値とほぼ一致している。

5 曲線座標検出について

試作装置のセンサヘッドの追従軌跡は図10に示すようにX, Y方向それぞれに設けられたポテンショメータにより容易に検出される。しかし、第2章で述べたように被追従曲線と追従軌跡は必ずしも一致していない。従って、コンピュー

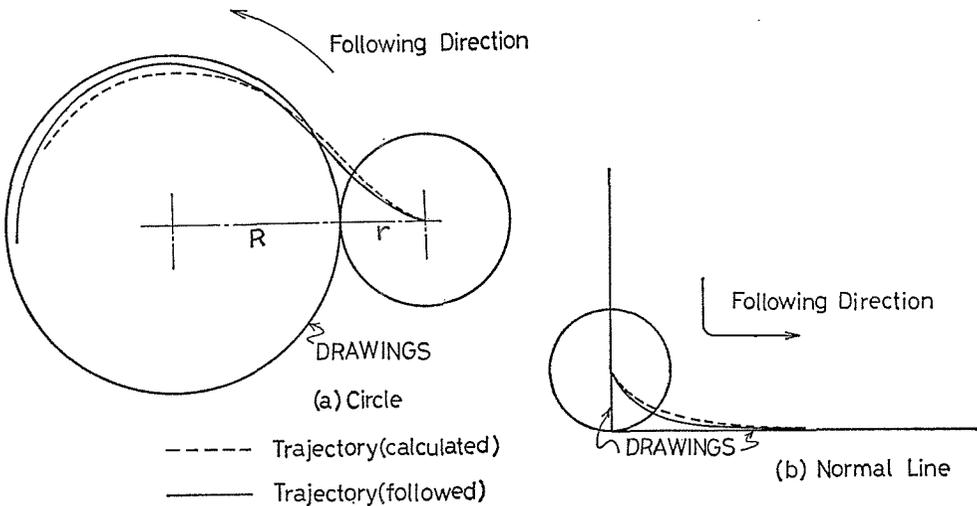


Fig. 17 Examples of Following

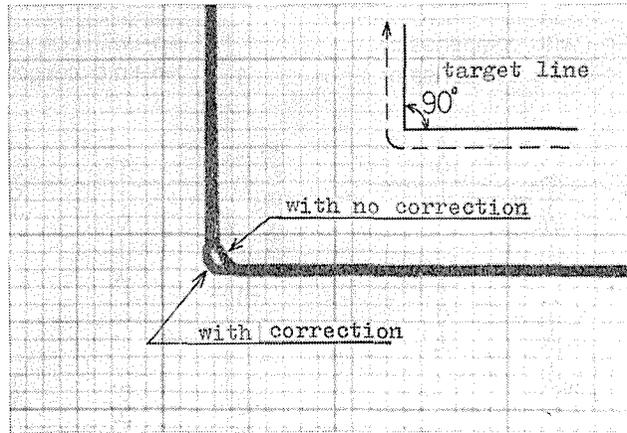


Fig.18 Example of Correction

タへの曲線座標入力としてポテンショメータの出力を用いると誤差を生じる。図17はポテンショメータの出力 a_x , a_y を用いて記録したセンサヘッド中心Cの追従軌跡であり、被追従曲線とは一致していない。ここで計算値とのずれはオプティカルファイバの太さや被追従曲線の太さなどが原因と考えられる。

そこで、試作装置では a_x , a_y にそれぞれ誤差成分に等しい電圧を加算あるいは減算することで補正し、座標検出を行なった。この誤差成分としてはセンサヘッド中心Cに対する交点Pの座標に相当する電圧を用いた。この電圧は図9に示す記憶部から簡単に得られ、図18は直角折れ線において補正した結果であり、十分精度の良い座標検出が行なわれるものと考えられる。

6 試作装置の応用

本試作装置をコンピュータへの座標入力装置として用い、その応用を検討した³⁾。具体的には曲線で囲まれた面積の自動測定と曲線の長さの自動測定を行なった。

6-1. 面積測定

面積測定の手順を図19のフローチャートに示す。面積計算は台形公式を用いている。測定対象は1辺の長さが50mmと60mmの正方形と直径50mmと60mmの円の面積である。図20(a), (b)に測定回数50回の平均値と標準偏差を示す。測定結果は第5章で述べたように補正を行なうことで十分精度の良い結果が得られた。ここで、補正を行なわない場合には少なく測定されているが、これはセンサヘッドの追従軌跡が被追従曲線で囲まれた内側にあるからである。

6-2. 曲線の長さの測定

曲線の長さの測定はセンサヘッドの追従速度が一定であるため、追従速度と追従時間の積で容易に行なうことができる。

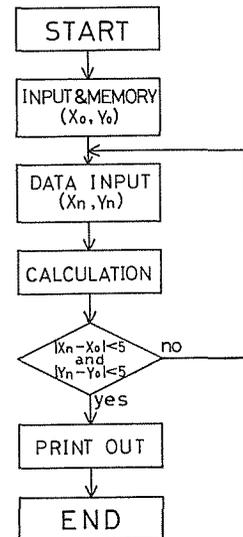


Fig.19 Flow Chart

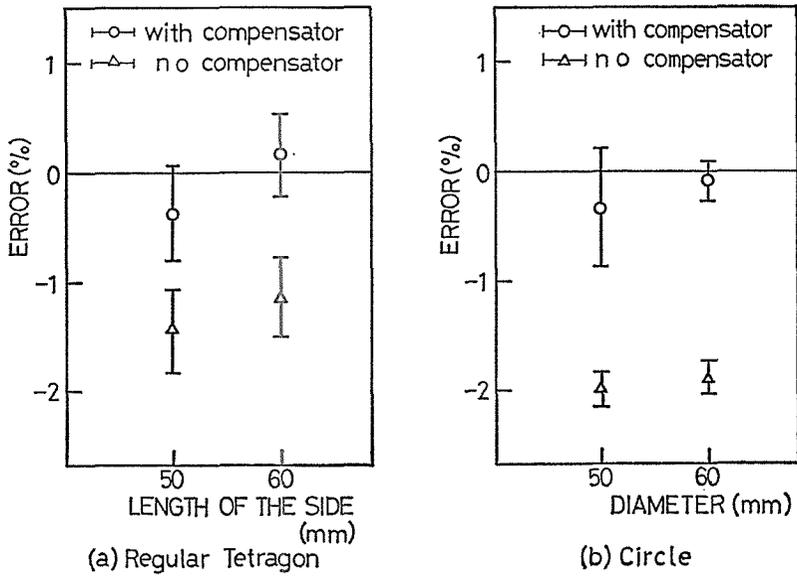


Fig.20 Measurement of Area

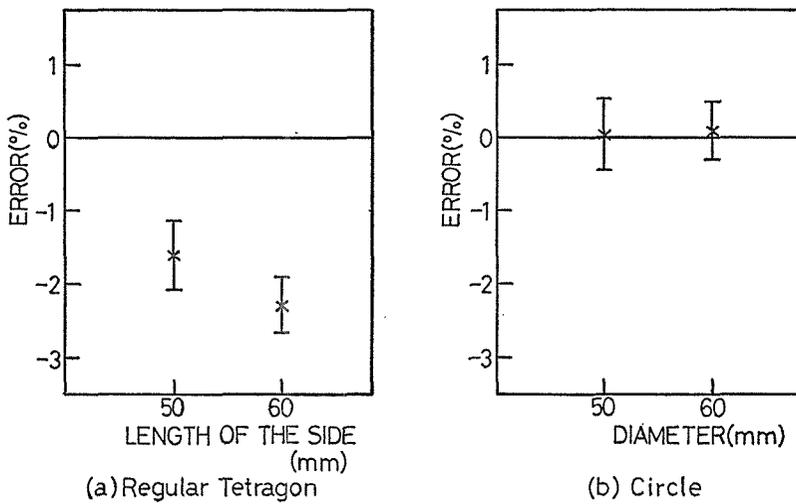


Fig.21 Measurement of Length

図21(a), (b)は面積測定で用いた図形の周囲の長さの測定結果である。ほぼ満足できる結果が得られたのと考えられる。

7 結 言

曲線自動追従装置のセンサ部および駆動方式に新たな方法を提案した。実際にこの方法に基づく装置を試作し、その追従特性の検討を行ない、提案した方法の妥当性を確認した。

また、試作装置を用いて曲線座標をコンピュータへ自動入力し、曲線で囲まれた面積あるいは曲線の長さの計測を行なった。これらにより、コンピュータなどの図形自動入力装置として本法に基づく曲線自動追従の有用性を示した。

謝 辞

本研究を行なうに際し、装置試作の機械加工工作について御助言および御協力いただいた精密工学科平田幸吉技官に深く感謝いたします。本試作装置の応用実験に協力いただいた卒研生渡辺裕之君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 窪田啓次郎，中川三男，末川元庸：入出力装置；233～235，コロナ社，1982年6月
- 2) 松山潔，竹前忠，菊地昭洋：任意曲線自動追従装置；電通学会信越支部大会講演論文集，50。(1982)
- 3) 松山潔，竹前忠，菊地昭洋，渡辺裕之：任意曲線追従装置の一応用；電通学会信越支部大会講演論文集，98(1983)