PSD を利用した角位置検出器の試作と その等速ならい装置への応用[†]

松 井 義 和*・新 井 智 一*

Trial Manufacture of the Angular Position Detector Utilizing the PSD
and Its Application to the Line Tracer with a Constant Speed

Yoshikazu MATSUI* and Tomokazu ARAI*

This research concerns the trial manufacture of an angular position detector utilizing the Position Sensitive Detector (PSD) and its application to the electro-mechanical line tracer with a constant speed.

The PSD is a planar type PIN photo-diode utilizing the "Lateral Photo Effect" on the semiconductor surface, and it enables the accurate and fast detection of the position of a light spot on its active area with the aid of operational amplifiers.

The angular position detector manufactured here, has a simple structure; it comprises a light source, the PSD, and a slit. The advantages are listed up as follows: i) Free from problems arising from mechanical contact, ii) wide in the effective angle of rotation, iii) excellent in temperature characteristics, iv) free from the noise effects, v) a fast response, vi) a small moment of inertia, vii) various non-linear output voltages are obtainable directly by simply changing the slit shape.

The present detectors are two types of output voltage in proportion to the angular position θ , and two simultaneous output voltages in proportion to $\sin \theta$ and $\cos \theta$.

Furthermore, the line tracer manufactured here, as one application of the angular position detector, can automatically follow figures drawn in a thin black line on a paper. It is applicable to automatic welding or cutting machine, etc.

The performances of the line tracer are as follows: i) A following speed of 12mm/s max, ii) the width of line capable of being followed, 0.15 to 2.0 mm, iii) a tracking error of ± 0.3 mm in width.

Key Words: optoelectronics system, measuring instrument, angular detector, position sensitive detector, line tracer

1. はじめに

機械などの軸回転角の検出にポテンショメータを用いることが多い。これは構造が簡単で慣性が小さい、高精度、高分解度が可能などのほかに、比較的大きなアナログ電圧が直接えられ、簡単な増幅によりモータなどを駆動することができるといった利点があるためと思われる。しかし、現在一般に用いられている摺動形式のポテンショメータはブラシの機械的接触に伴う多くの問題点がある。このため、これまでも種々の非接触式ポテンショメータの研究^{1),2)}がなされているが、有効回転角が狭い、温度特性が悪い、応答速度が遅いなどといった問題点がある。

筆者らは先に、CdS, CdSeなどの光導電体を利用した非接触式ポテンショメータを試作し、その諸特性などについて報告³⁾した。これは非接触であることから、ブラシの機械的接触による問題点がない上に、構造が簡単、有効回転角が広い、温度特性が良いなど多くの利点を有するが、応答速度が遅いという問題点があった。同形式のポテンショメータでCdSeにTeを添加することにより応答速度を改善したとの報告⁴⁾もあるが、筆者らはPIN ホトダイオードであるPosition Sensitive Detector (以下、PSDと略称する)の高速応答性に着目し、これを利用した非接触式角位置検出器の製作を試みた。試作した角位置検出器

[†] 第22回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 58・7)

第23回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 59・7)

* 静岡大学工学部 浜松市城北 3-5-1

* Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu

(Received December 15, 1984)

(Revised July 26, 1985)

は出力が回転角に比例するものと、回転角の正弦と余弦の2信号を同時に発生する2機種である。また、この一応用例として試作した等速ならい装置は紙上に描かれた曲線などを光電的方法を用いて自動的に追跡するもので、自動切断、自動溶接など多くの用途が考えられる。

2. 角位置検出器の原理と構造

PSD は半導体表面における“Lateral Photo Effect”を利用したプレーナ型 PIN ホトダイオードである。

この基本構造を Fig. 1 に示す。高抵抗シリコン I 層の表面に P 型抵抗層、裏面に N⁺ 層の3層構造である。P 型抵抗層の両端には L, R の2箇の信号取り出し用電極が、N⁺ 層の中央には共通電極 C が設けられている。

いま、電極 L から X の位置 P に光が入射すると、受光位置の空乏層には入射エネルギーに比例した光電流 I_0 が生じ、P 型抵抗層に到達する。この光電流 I_0 は受光位置 P から L, R の各電極までの抵抗値に逆比例するように I_L と I_R に分割され電極 L, R に達する。ここで L-R 間の表面抵抗は均一で、長さとは抵抗値が比例するとすれば、

$$I_L = I_0 \left(1 - \frac{X}{S}\right), \quad I_R = I_0 \frac{X}{S} \quad (1)$$

となる。ここで、 I_L と I_R の差をとり I_0 で基準化すると、

$$\frac{I_L - I_R}{I_0} = 1 - \frac{2X}{S} \quad (2)$$

となり、基準化出力は入射エネルギー、周囲温度に依存することなく、受光位置によって一意的に定まる。

試作角位置検出器の構造を Fig. 2 に示す。全体は外部光を遮へいする構造であり、外筒には2箇の1次元 PSD(a), (b) がそれぞれ受光面を軸心に向け、互いに90度離れた位置に取り付けてある。また、この受光面と対向する位置に9箇の発光ダイオードを受光面の長手方向に等間隔に配置し、光源としている。光

Fig. 1 Crosssection of position sensitive detector

Fig. 2 Angular position detector by PSD

源と PSD の間には所要のスリット形状を印刷したポリエステルフィルムを筒状にし、中央の回転軸に固定している。スリットを通った光はスポット光となり、軸の回転につれて PSD 受光面上を移動する。この結果、角位置検出器の出力は軸の回転位置に応じて定まる。

使用した PSD は受光面が 34×2.5 mm の S-1352 であり、光源の赤外発光ダイオードは TLN 103 である。

3. 特性

試作角位置検出器の諸特性を以下に述べる。

3.1 位置出力と有効回転角

Fig. 3, Fig. 4 は軸回転角と出力電圧の関係を求めたものである。Fig. 3 は外筒に1箇の PSD を設け、直径 87 mm の円筒筒上で幅 1.2 mm、ピッチ 30 mm のら旋形となるスリットを用いた場合の実験結果、Fig. 4 は外筒に2箇の PSD を互いに90度離れた位置に設け、直径 87 mm の円筒筒上で幅 1.2 mm、全振幅 30 mm の正弦波形となるスリットを用いた場合の実験結

Fig. 3 Output voltage vs. angle

Fig. 4 Output voltage vs. angle

Fig. 5 Relative sensibility vs. revolutions

果である。

Fig. 3において、○印は測定値、実線は測定値を結んだ直線である。出力は0~356度の間で回転角に比例して上昇し、その直線誤差は0.6%以下であった。

また、356~0度の間もほぼ直線的に下降し、全体はノコ歯状であった。ここで、不感帯とも考えられる下降範囲はPSD受光面の幅とスリット円周長との比によって決まる。直線誤差の主な原因は光源が均一平行光でないため、PSD受光面における入射エネルギーの重心と受光部の図心とが一致していないためと考えられる。したがって、この誤差を小さくするためには光源からの光を均一平行光とするか、スポット光の面積を小さくすればよいと思われる。

Fig. 4において、各印は測定値、実線は回転角を θ 、2出力電圧をそれぞれ V_s, V_c としたとき、 $V_s = 8.78 \sin \theta$ 、 $V_c = 8.78 \cos \theta$ となる曲線である。また、この実線を理論値と考え

たときの誤差は全振幅の0.9%以下、角度換算で2度以下であった。

3.2 回転速度と応答性

本検出器の応答速度はPSDと演算回路の応答速度によって決まる。PSDの時定数は主に接合容量と負荷抵抗の積で決まる。Fig. 5は軸回転速度と相対出力の関係を示す。負荷抵抗 R_f は20k Ω 、50k Ω 、100k Ω の3種類である。図中に示す破線は先に報告³⁾したポテンシオメータの特性である。これより本検出器の応答速度が非常に速いことがわかる。負荷抵抗が20k Ω のとき、出力電圧が1%低下する回転速度は約8,000rpmであった。

3.3 温度特性とその他特性

実験は検出器の回転軸に0.9rpmの回転を与え、その周囲温度を-10~50℃まで10℃間隔で変えたときの各温度における出力電圧をペンレコーダで記録した。この結果をFig. 6に示す。横軸は周囲温度、縦軸は各温度における検出器の出力信号振幅の周囲温度20℃における値を基準とした相対誤差である。この温度範囲における誤差は0.6%以下であった。

Table 1に本検出器の諸特性を示す。

4. ならい装置

4.1 原理と構造

Fig. 7に試作した本装置の構造を示す。X-Y移動

Fig. 6 Deviation ratio of output voltage vs. ambient temperature

Table 1 Characteristics of angular position detector

Electrical values	Mechanical values
Effective rotation 356° (Linear type) 360° (Sine type)	Mechanical rotation 360° Torque $\leq 8.2 \text{ g} \cdot \text{cm}$ Moment of inertia $430 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$
Linearity tolerance $\leq 0.6\%$ (Linear type) $\leq 0.9\%$ (Sine type)	Weight 700 g Size $\phi 100 \times 80 \text{ mm}$
Rise time 0.08 mS ($R_f = 20 \text{ k}\Omega$) Fall time 0.46 mS ($R_f = 20 \text{ k}\Omega$)	Light spot $2.5 \times 1.2 \text{ (mm)}$ Ambient temperature -10~50℃
Supply voltage D.C 10 V

Fig. 7 Construction of line tracing device

D_{TH} : line-sensing detector
 D_{AP} : angular position detector
 M_{TH} : D.C servomotor for the tracing head
 M_X : D.C servomotor for the X axis
 M_Y : D.C servomotor for the Y axis

Fig. 8 Block diagram of operating system

台(h)上には紙上に描かれた曲線(追跡線)を検出し、追跡する追跡ヘッド(a)、追跡ヘッドの検出部信号によって追跡ヘッドの位置を制御するD・Cサーボモータ(c)、追跡ヘッドの位置を検出する角位置検出器(b)があり、これらは歯車によって連動する。X-Y移動台は角位置検出器の2出力信号 $k \cos \theta$, $k \sin \theta$ (k は定数) のそれぞれで動作するD・Cサーボモータ(e), (d)により、ボールネジ(g), (f)を介してX軸およびY軸方向へ同時に駆動される。この結果、追跡ヘッドにはXとY方向を合成した運動が加わる。

Fig. 8 は本装置の動作を示すブロック線図である。ここに、 θ_i はX軸と追跡線とのなす角、 θ はX軸と追跡ヘッド検出部とのなす角である。二点破線で示す部分はX方向とY方向の速度ベクトルの合成を図式化したものである。

4.2 追跡ヘッド

Fig. 9 は追跡ヘッドの構造である。光源 La は紙上に描かれた追跡線を照射する。レンズ Le は追跡線を拡大し検出部に結像する。検出部は PD_1 , PD_2 の2箇のホトダイオードであり、各ホトダイオードへの追

Fig. 9 Tracing head

Fig. 10 Block diagram of operation circuit used with line-sensing photodiode

Fig. 11 Velocity vectors of points O and Od

跡線の結像面積の差から生ずる信号を出力する。また、検出部を含むレンズ系の中心軸 Od は回転中心 O に対して r 偏心した位置にあり、追跡動作において、常に回転中心の前を走行する。Fig. 10 は検出部信号の処理回路である。

4.3 追跡動作

Fig. 11 は検出ヘッドの回転中心 O と検出部の中心 Od の運動を示したものである。追跡ヘッドの運動方向とX軸とのなす角 θ をとしたとき、角位置検出器の出力は $k \cos \theta$ と $k \sin \theta$ である。これらの信号をアンプで増幅後、X軸およびY軸駆動用サーボモータにそれぞれ入力したとき、モータと負荷となるX-

Y移動台の摩擦, 慣性, 粘性などの影響が小さいとすれば, 追跡ヘッドの速度の大きさ V は,

$$V = \sqrt{(mlk \cos \theta)^2 + (mlk \sin \theta)^2} = mlk \quad (3)$$

となる。ここに m はボールネジと減速機の減速比によって定まる定数, l はアンプのゲインとモータの単位電圧当りの回転速度との積で定まる定数である。したがって, 速度の大きさ V は一定である。

検出部の運動は O-Od 間の距離を r , 追跡ヘッドの回転角速度を ω とすると, 点 Od の速度は $\sqrt{V^2 + (r\omega)^2}$ で, その方向は V に対して $\varphi (= \tan^{-1} r\omega/V)$ 傾いた方向となる。また, 点 O が微小時間 dt の間に進んだ距離を dS , 方向の変化を $d\alpha$ とすれば, 点 O が描く軌跡の曲率半径 ρ_0 はつぎようになる。

$$\rho_0 = \frac{dS}{d\alpha} = \frac{V}{\omega} \quad \left(\because \frac{dS}{dt} = V, \frac{d\alpha}{dt} = \omega \right) \quad (4)$$

また, 同様にして, 点 Od の描く軌跡の曲率半径 ρ_{Od} はつぎようになる。

$$\rho_{Od} = \sqrt{\left(\frac{V}{\omega}\right)^2 + r^2} \quad (5)$$

(4), (5)式は本装置の追跡可能な曲率半径を与える。

5. 追跡実験結果

本装置による追跡動作の確認と追跡可能な図形を判別するための実験を行った。追跡動作は, あらかじめ, X-Y 移動台と追跡ヘッドを動かすことによって, 追跡線の任意の位置を検出部に投影し, この投影された追跡線の X 軸とのなす角 θ_i に検出部の X 軸とのなす角 θ (追跡方向)を合わせて, 検出部出力をおよそ零とした後に実行される。なお, 実験に使用した機器の諸元はつぎに示す通りである。

- D・C サーボモータ: 定格出力 16W, 機械的定数 3.8ms, 静止摩擦トルク 70g・cm
- 追跡速度 V : 6mm/s, 12mm/s の2種類
- 検出部偏心量 r : 5, 2, 1mm の3種類
- レンズの拡大率 n : 4~5倍
- ホトダイオード受光面形状: 5×5(mm)
- ホトダイオード間の空隙: 0.1mm

5.1 追跡速度一定の確認

Fig. 12 は本装置の追跡速度が一定であることを示す実験結果の一例である。(a)は線幅 0.5mm の原図

Fig. 12 Original line vs, tracing line with constant-speed

Fig. 13 Comparison with original line and tracing line for spiral curve

である。円の直径は図に示すように 20~160 mm まで 20 mm づつ大きくなっている。(b)はこの追跡結果を示したもので, 円の下に示す数字はそれぞれを一周するに要した時間である。原図の円の直径とこれらの円を追跡するに要した時間との比がほぼ一定になっていることから, 本装置が一定速度で追跡していることがわかる。

なお, このときの実験条件は $r=1.0\text{mm}$, $n=5$ 倍, 追跡速度 $V=12\text{mm/s}$ である。また, 重ね合せより求めた追跡結果の原図からのズレ量は 0.3mm 以下であった。

5.2 追跡可能な最小曲率半径

理論上, 追跡可能な最小曲率半径は追跡ヘッドの角速度 ω の最大値と追跡速度 V が分かれば, (4), (5)式より求めることができるが, $\omega \gg V$ のとき, 点 Od の描く軌跡の曲率半径($\rho_{Od} \geq r/n$)以下にすることはできない。Fig. 13 はらせんを追跡した結果である。(a)は線幅 0.5mm の原図であり, この最小曲率半径は 3mm である。(b)は $V=12\text{mm/s}$, $r=1.0\text{mm}$, $n=5$ 倍の実験条件で追跡した結果である。実験結果は本装置が原図の全てを追跡したことを示している。したがって, 本装置の追跡可能な最小曲率半径は 3mm 以下であることがわかる。なお, このときの追

Fig. 14 Comparison with original line and tracing line for broken line

跡結果の原図からのズレ量は 0.3 mm 以下であった。

5.3 折線の追跡

本装置のような原理に基づく速度一定の追跡装置において、曲率半径が零となる部分をもつ図形の追跡は厳密には不可能である。このことは(5)式からも容易に推測される。しかし、実際には追跡線を検出するホトダイオードに面積があるため、この追跡方向の長ささと追跡速度の比、追跡ヘッドの回転速度の大きさ、X-Y 移動台と追跡ヘッドの慣性の大きさなどによって定まる追跡可能に折角の範囲がある。

Fig. 14 は折線を追跡した結果である。(a)は線幅 0.5 mm の原図である。図中の数字は折角を、矢印は追跡方向を示す。(b)は $V=12\text{ mm/s}$, $r=1.0\text{ mm}$, $n=5$ 倍の実験条件で追跡した結果である。実験結果は折角 75 度まで追跡したことを示している。折角が 90 度以下になると角部に若干のオーバーシュートが認められ、追跡結果の原図からのズレ量はオーバーシュート部で最大 0.7 mm, その他の部分では 0.3 mm 以下であった。また、これと同一実験条件で、この原図の角部分に半径 1.75 mm の曲率を付けた場合には、全てを追跡することができた。そして、その追跡結果の原図からのズレ量は 0.3 mm 以下であった。このことより、本装置の追跡可能な最大曲率半径はら旋の追跡結果より知られた値よりさらに小さく 1.75 mm 以下であることがわかる。

5.4 追跡線が交叉する図形の追跡

原理上、本装置は追跡線が直交する以外の交叉する曲線を忠実に追跡することはできないはずである。これは検出ヘッドの追跡方向が常に検出部信号を零とする方向をとるため、検出部に 2 本の追跡線が投影される交叉点付近において、検出ヘッドの方向が希望する追跡線から外れるためである。Fig. 15 は追跡線が直

Fig. 15 Experimental result of following a figure with a cross point of the lines

交以外の角度で交叉する図形を追跡した実験結果の一例である。(a)は線幅 0.5 mm, 交叉角 80 度の原図, (b)は $V=12\text{ mm/s}$, $r=1.0\text{ mm}$, $n=5$ 倍の実験条件で追跡した結果である。このように、追跡線が交叉する図形の追跡が可能なのは、交叉する追跡線のなす角度が大きいこと、この角度が同じ場合でも V/ω が大きいことが望ましいことが観測された。これは、検出部が交叉点に近づいたときに生ずるチャタリングは交叉角が小さいほど早く発生し、 V/ω が小さいほど周期が短くなり、検出部が希望する追跡線から外れ易くなるためと考えられる。

5.5 追跡線の太さ、濃度、色

本装置の追跡可能な線の太さ、濃度、色は主にホトダイオードの受光面積、分光感度特性、追跡線の拡大率、信号処理回路を含む検出部の S/N などによって制限される。 $V=12\text{ mm/s}$, $r=1.0\text{ mm}$, $n=5$ 倍の条件で実験した結果、追跡線の色は黒が望ましく、茶褐色でも追跡可能であるが、赤、青色は適さない。また、追跡線を黒色とした場合、鉛筆濃度が 2H 以上の濃さで、線幅が 0.15 mm 以上であれば追跡可能であるが、線幅が 2 mm 以上になると、この投影像が検出部の幅を越え、オーバー分は不感帯となるため、検出部中心と追跡線中心とのズレが生じ、良い追跡結果が望めなくなることがわかった。

6. おわりに

試作した検出器は PSD, 光源, そしてスリットからなる簡単な構造で、慣性を小さくすることが可能である。また、この出力信号はアブソリュート形のアナログ信号であり、構成要素から見るとロータリーエンコーダと似ているが、出力信号の形式が異なる。実験の結果、応答速度は負荷抵抗が 20 k Ω のとき、出力

電圧が1%低下する回転速度は約8,000rpmと、先に報告したポテンシオメータに比べ非常に速いことがわかった。

また、一応用例として試作した等速ならい装置は本検出器の長所である、i)回転部はスリット形状を施したフィルムであるから慣性を小さくできる。ii)スリット形状を変えるだけで種々の出力信号が得られる。などを活用したもので、実験の結果、この部分に電磁誘動形のレゾルバを用いた装置⁶⁾(追跡速度0.5~2mm/s、追跡可能な最小曲率半径約16mm)に比べ、追跡速度を6~24倍の12mm/sに、追跡速度12mm/sで追跡可能な最小曲率半径を約1/10の1.75mm以下にすることができた。このことは、本検出器が有効に機能していることを示すものである。

終わりに臨み、PSDを提供して下さった浜松ホトニクス、実験によく協力して下さいった本学卒業生、浅

野一也、安藤馨一、河野浩、中野智彦の諸君に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 片岡照栄：接触から無接触へ、機構部品の半導体化をめぐる、エレクトロニクス，15-4，448/462 (1970)
- 2) 大野，大河原：光導電体を応用したポテンシオメータ，第4回SICE学術講演会予稿集，65/66 (1965)
- 3) 松井，新井：Optical Potential Deviceの等価回路とDeviceの一応用例，計測自動制御学会論文集，18-8，65/71 (1982)
- 4) Takagi et al：改良Cdse光導電膜利用の無接触ポテンシオメータを使った高速角度検出器，日経エレクトロニクス，No. 189，39/42 (1978)
- 5) 大橋，山本：半導体位置検出器とその応用，電子材料，19-2，119/124 (1980)
- 6) 大石，森脇：線速度一定の曲線追跡装置，計測と制御，7-1，1/8 (1968)