櫛形構造 PSD と像位置検出特性[†]

丁 懷 東*・出 澤 正 徳*・松 本 晋*

A Comb-Structured PSD and Its Image Position Sensing Characteristics

Huai-Dong DING*, Masanori IDESAWA* and Susumu MATSUMOTO*

A semiconductor image position sensitive device (PSD) is widely used in various measuring systems because of its simplicity of instrumentation and high speed sensing capability of the position of a light spot as its gravity center. In order to increase the image position sensing precision, the dividing resistance should be manufactured in high accuracy. However, it is very difficult to manufacture uniformly distributed dividing resistance layer in the conventional type PSD. In order to overcome the above difficulty, a concentrated dividing resistor type PSD, in which dividing resistor is constructed separately from the photo-sensitive elements as a concentrated resistor and separately formed photo-sensitive elements are connected to it. A dividing resistor can be manufactured stably and correctly by this scheme. A comb structured PSD is proposed and trialy manufactured as a realization of the new scheme. On the contrary, the comb structure may bring the deviation in detecting characteristics which are caused by its periodic structure. Because of this reason, the interval of teeth is one of the important factors in designing the comb structured PSD. In this study, image position sensing characteristics of the comb structured PSDs which had been manufactured in trial are measured in connection with the size of the light spot. Then the influence of the light spot size to the image position sensing characteristics have been analized. Considering the above experimental results, several methods to decreasing the deviation of image position sensing characteristics caused by the comb teeth structure have been investigated and proposed.

Key Words: PSD, comb-structured PSD, image position sensing, intentional sensing

1. はじめに

ロボット, CAD/CAM, FA などの自動システムには, 特に位置や形状など空間的情報獲得手段の装備が不可欠である。空間的情報の獲得においては位置の検出が基本となっている。半導体像位置検出素子(PSD: Position Sensitive Device)¹⁾によれば, 輝点の重心的な位置情報を簡便なアナログ演算回路によって高速に(数~数十 μ 秒で)検出できる。このため, PSD は種々の計測システムや距離センサなどに広く使用されている^{2), 6)}。PSD の像位置検出精度と像位置検出分解能を向上させるためには分割抵抗を精度良くしかも安定に製作することが必要と

される。通常, 分割抵抗を構成する抵抗層はイオン注入や不純物の拡散などで形成されているが, 単位面積あたりの不純物注入量がきわめて微量でその制御は容易でなく, 広い面積にわたり, 一様でしかも所望の抵抗値を有する導電層を形成することはかなりの困難を伴う。そのため分割抵抗を集中型の基幹抵抗として形成し, その分割抵抗にそれぞれ分離された PIN 接合型光電素子を結合させた形態の分離光電素子型 PSD を考案した^{3), 4)}。この構成を採用することによって分割抵抗を安定かつ正確に製作することができる。PSD を複数の区分区間に分割して, 相対像位置検出分解能を著しく向上させる R-HPSPD 方式³⁾の実現は, 従来方式では困難であったが, 櫛形構造の採用により, 安定かつ容易に実現することができた^{6)~10)}。一方, 光電素子を分離された形態となるように形成した場合, 各光電素子の境界部において検出位置信号に不連続性の影響が現れる可能性がある⁵⁾。不連続性の影響が現れないようにするには, もちろん分離光電素子数を増加し, すなわち分割を細かくして, 輝点像が常に多数の光電素子上に投射されるようにすることが有

[†] 第2回ロボティクス・自動化システムシンポジウムで発表(1990・4)

* 理化学研究所 和光市広沢 2-1

* The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako

(Received July 12, 1993)

(Revised September 29, 1993)

効である。しかし、一方において分割を細かくするほど製作が困難となる。輝点像の大きさに対してどの程度の分割数にしたら良いか、また、どの程度の不連続性が見込まれるかは設計上重要な要件となる。本論文では分離光電素子型 PSD の考えに従って、試作した 1 次元櫛形構造 PSD の像位置検出特性を計測し、実験的に像位置検出特性と櫛形構造との対応性を確認し、像の大きさと検出特性の非直線性誤差(うねり)との関係を解析した、そして、これらの結果に基づいて、櫛形構造に基づく検出特性の非直線性誤差の減少法について検討した。

2. 分離光電素子型 PSD の原理と構造

2.1 PSD の原理

半導体像位置検出素子(PSD)は Fig. 1(a) と Fig. 2 の(b)にその構造の概念図が示されているように PIN 接合、すなわち P 形半導体、絶縁体 I, N 形半導体の 3 層から構成され、上下の層(P 形および N 形)のいずれかあるいは双方を抵抗層とし、その両端に出力端子を設けた構造となっている。この表面に光が当たるとその部分で上下層間に光電流が流れる。その光電流は抵抗層を伝わって出力端子へと導かれる。Fig. 1(b)にその等価回路を示してある。両端の出力端子から出力される電流値(I_a, I_b)には光の入射位置と出力端子間の抵抗値が反映されている。そして、抵抗層の抵抗値が一樣である場合には、次式によって光入射位置に対応した値(X)が得られる。

$$X = \frac{(I_b - I_a)L}{2(I_a + I_b)} \quad (1)$$

ここで L はセンサの長さである。PIN 接合は原理的には PIN フォト・ダイオードであり、高速に動作する光検

出器として機能する。

2.2 分離光電素子型 PSD の原理

従来の PSD では分割抵抗として動作する抵抗層は平面的に構成されている。抵抗層は、通常、不純物イオンを拡散あるいは注入して形成されるが、その注入量がき

(a) Conceptual configuration of separate photo-element type (comb structured) PSD

(b) Lateral configuration of separate photo-element type PSD

(c) Equivalent circuit of the separate photo-element type PSD

(d) Simulation result of the deviation from the average line of image position sensing characteristics ("■" represent the output terminals and vertical line shows the comb-teeth position, gaussian like curve showing the brightness profiles of image, sinusoidal like curve showing the deviation of image position sensing characteristics.)

(a) Conceptual configuration of PSD

(b) Equivalent circuit

Fig. 1 Principle of PSD (R : resistant layer (p -type) P : photo-sensitive layer (insulator), C : bias layer (N -type), T_a, T_b : output terminals, C_b : bias terminal, L : light spot, I : photo current, I_a, I_b : output current, X : image position).

Fig. 2 Principle of separate photo-element type PSD (R : basis resistance, T : conductive teeth, P : resistant layer, I : photo-sensitive layer, N : bias layer, L : length of the sensor, I_k : photo-current, H : brightness profile of a lightspot, X : gravity center position of image, X_k : position of the conductive part near the image, I_a, I_b : output current).

わめて微量であるために、広い面積にわたって一様で高い抵抗値を有する抵抗層を形成することは困難である。そこで、特定の狭い領域に比較的多量のイオンを注入でき、抵抗値のばらつきをきわめて小さく安定に製作できるように分割抵抗を光電部と離れた位置に基幹抵抗として集中して構成し、それに互いに分離させた光電素子を接続した集中分割抵抗型の PSD^{(4),(5)} を考案した。この構成を採用することによって分割抵抗を安定かつ高精度に製作することができる。

Fig. 2(a), (b) にその原理を示すように、光が投射されている光電素子部で光量に比例した光電流が生成されバイアス層との間に流れる。この光電流は各光電素子の根元部、すなわち基幹抵抗との接続部へと流れ込み、基幹抵抗を伝わって出力端子へと出力される。各光電素子で生成された光電流はそれぞれ光電素子の基幹抵抗の接続部と二つの出力端子間の抵抗比に応じて分配され、出力端子より出力される。したがって、出力端子より出力される光電流は、各光電素子より基幹抵抗へ流入する電流をそれぞれの流入部と出力端子間の抵抗比によって分配した電流をすべての光電素子について積算した値となる。

Fig. 2(c) に示す等価回路について、この状況は以下になる。

k 番目の光電素子の光電流 (I_k) による出力電流 I_{ak} , I_{bk} は

$$\begin{cases} I_{ak} = \frac{R_{bk}}{R} I_k \\ I_{bk} = \frac{R_{ak}}{R} I_k \end{cases} \quad (2)$$

となる。ここで R_{ak} , R_{bk} は k 番目の光電素子と出力端子間の抵抗であり、分割抵抗の抵抗値を R , 長さを L , k 番目の光電素子の位置を x_k とすると、次式で示される。

$$\begin{cases} R_{ak} = \frac{x_k}{L} R \\ R_{bk} = \frac{L - x_k}{L} R \end{cases} \quad (3)$$

両端出力電極への出力電流 (I_a , I_b) は、次式のようにすべての光電素子について積算したものとなる。

$$\begin{cases} I_a = \sum_{k=1}^m I_{ak} \\ I_b = \sum_{k=1}^m I_{bk} \end{cases} \quad (4)$$

輝点像の重心位置は(1)式によって算出される。

実際には、分離光電素子の間隔や導電部の幅、像の大きさや像の輝度分布などの影響で像位置検出値は理想値(直線)から外れ、光電素子の周期に対応したうねりが現れてしまう恐れがある。すなわち、像位置検出特性に変動誤差が生じる。これをコンピュータ・シミュレーシ

ョンによって⁹⁾、推定した結果の一例を Fig. 2(d) に示した⁹⁾。

2.3 櫛形構造 PSD とその試作

分離光電素子型 PSD の実現の一形態として、櫛形構造 PSD を考案した。光感部の側部に基幹抵抗として分割抵抗を形成し、それより櫛の歯状に導電体を光感部へと張り出させた構造となっている。光が投射された位置で生成された光電子、あるいはホールによる光電流は、櫛の歯状の導電部(光電素子に対応)に集められ、それを通じ基幹抵抗に流入し、基幹抵抗端部の出力端子より出力される。この構造は単純であり、製作が容易である。また、上下層に互いに直交するようにこの構造を形成すれば 2 次元的な PSD も容易に実現できる。本研究では、Fig. 2 に示す 1 次元櫛形構造 PSD を試作し、その特性を計測した。分割抵抗は基幹抵抗として光感部に平行な線に沿って集中させ、その集中抵抗により 25 μm 間隔で 5 μm 幅の導電層を櫛の歯状に光感部へと張り出させた構造となっている。

また、この PSD は R-HPSD のプロトタイプ^{(3),(9)} として試作されたものであり、分割抵抗両端に設けられた出力電極の間に 0.15 mm 間隔に補助出力電極が装備されており、0.15 mm 単位で任意の連続区分区間を選択し、それを従来型の PSD と同様に動作させることができる。

3. 像位置検出特性の計測方法

3.1 PSD 像位置検出特性の計測装置

Fig. 3 に櫛形構造 PSD の像位置検出特性計測装置の概念図を示した。櫛形構造 PSD 素子を搭載した基板を X-Y ステージ上に取り付け、レーザ・ダイオードでスリットを照明し、それを投影レンズを介して櫛形構造 PSD センサ・チップ上に投影するように構成されている。X-Y ステージは制御用パーソナル・コンピュータからの指令によりセンサの位置検出方向 (x 軸) およびセンサとスリット間の距離を変化する方向 (y 軸) について、すなわち 2 次元的に 1 μm ステップで移動できる。この計測システムを使用して、 x 方向に 1 μm ステップで移動して櫛形構造 PSD の出力信号(出力端子からの出力電流信号および割り算器の出力信号)を A/D 変換器を通じて制御用パーソナル・コンピュータに取り込み、輝点像の大きさと特性解析を行った。ステージ移動に対する櫛形構造 PSD の像位置出力信号のデータより像位置検出感度(傾斜)、直線性などの像位置検出特性の解析を行った^{7),(10)}。なお、ステージの Y 方向への移動は像位置検出特性計測時には使用せず、スリット像の結像状態調節時および焦点外しによる輝点像大きさの制御時のみ

Fig. 3 Conceptual diagram of the image position detecting characteristics measuring system (LD: laser diode, SL: slit, L: projection lens, I: projected slit image, E: knife-edge, P: R-HPSD chip, minimum step of the x - y stage is $1\ \mu\text{m}$ for each axis).

使用した。Fig. 3 の E は金属板で製作したナイフ・エッジであり、輝点像の大きさ検出に利用するため PSD 素子表面に配置してある。

3.2 輝点像大きさの評価法

(a) 輝点像大きさと特性

PSD における像位置検出には、光ビームが照射された部分で PIN 接合層間に流れる光電流が、抵抗層において信号出力端子までの抵抗値によって分割出力されることを利用している。輝点像位置情報は、前述したように抵抗値が距離に比例するものとする、出力電流値の差を出力電流値の和で割算して求められる。なお、光電流の密度は、輝点像の輝度にほぼ比例した値となり、それが輝点像が投射されている各光電素子の領域について積分され、基幹抵抗との接合部より基幹抵抗に流入する。輝点像が大きい場合には多くの光電素子にまたがって平均化されてしまうために光電素子が分離されていることの影響は問題とならないが、輝点像が光電素子の配置されている間隔と同程度に小さくなると輝点像が投射される光電素子数が少なくなり、像位置検出特性に光電素子の分離構造に基づく不連続性が現れる可能性がある。したがって、楕円構造 PSD の設計に当たっては輝点像の大きさ (w) と導電体歯の間隔 (p) の比 (w/p) をどの程度にすべきかが重要な設計要因となる。試作した楕円構造 PSD 素子はその導電体間隔 (P) は $25\ \mu\text{m}$ 一定であるので、輝点像の大きさを変化させて、(w/p) の値を変化させ、像位置検出特性を計測し、輝点像の大きさと導電体歯の間隔の比が像位置検出特性のうねりに及ぼす影響を評価することにした。

(b) 輝点像大きさの計測

PSD では輝点像の重心的な位置のみで輝点像を画像として検出できないため、PSD 表面上での輝点像の大き

Fig. 4 Conceptual configuration for light spot size determination.

- (a) Knife-edge and PSD
- (b) Total photo-current ($I_a + I_b$) change when the light spot accrossing the knife-edge
- (c) Differentiation of total photo-current (gaussian like distribution)

さを直接的に計測することはできない。そこで、ナイフ・エッジによる遮蔽を利用して、像の半値幅を推定する方法を考案し、使用した。すなわち、センサの前面に金属ナイフ・エッジを配置し (Fig. 3 の E)、光ビームがこれを横切るときの光電流の変化を検出し、それから推定する方法を考案した。Fig. 4 に示すようにレーザ光がナイフ・エッジを横切って移動すると、ナイフ・エッジの遮蔽で、PSD で検出される光電流 ($I_a + I_b$) は Fig. 4 (b) に示すように最大値から零までに徐々に減少する。

これを微分すると、同図 (c) のようなガウス分布状曲線が得られる。このガウス分布状曲線の高さ (H) はレーザ光の強度に関係している。通常その半分の値 ($H/2$) の幅 (w) が、輝点像の大きさの評価に使用され、半値幅と呼ばれている。検出された光電流の変化によりこの半値幅は以下のようにして推定できる。

注目している点周囲で計測した特性曲線を区分的に直線近似し、検出特性との差の平方和が最小となる直線 ($y = ax + b$) を最小 2 乗法を適用して推定し、その傾斜値 ($a_i = dy/dx$) をその点の微分値とする方法を採用した。

$$J = \sum_{k=i-n}^{i+n} [y_k - (ax_k + b)]^2 \quad (5)$$

a, b は次式のように推定される

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a} = 2 \sum_{k=i-n}^{i+n} x_k y_k - 2a \sum_{k=i-n}^{i+n} x_k^2 - 2b \sum_{k=i-n}^{i+n} x_k = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial b} = 2 \sum_{k=i-n}^{i+n} y_k - 2a \sum_{k=i-n}^{i+n} x_k - 2(2n+1)b = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} a_i = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} x_k y_k}{\sum_{k=i-n}^{i+n} x_k^2} \\ b_i = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} y_k}{2n+1} \end{cases} \quad (7)$$

曲線上の点での傾斜(微分値: a_i)が得られる。

$$a_i = \frac{dy}{dx} = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} x_k y_k}{\sum_{k=i-n}^{i+n} x_k^2} \quad (8)$$

ここでは、注目点の両側の7点($n=7$)を考慮して、すなわち $2n+1=15$ 点で平滑化したことに相当する微分曲線(ガウス分布曲線)を求めて像大きさ(半値幅)を推定した。

(c) 輝点像の大きさの制御

楕円構造 PSD の導電歯間隔(P)と輝点像の大きさ(w)の比(w/p)の値が楕円構造の像位置検出特性に対する影響を表現する上で重要なパラメタとなる。したがって、楕円構造が像位置検出特性に及ぼす影響を調べるには(w/p)の値を変化することが必要とされる。試作された PSD では導電歯間隔(P)は変化できないので、ここでは輝点像の大きさ(w)を制御(変化)して、(w/p)の値を変化した。輝点像の大きさの変化には、スリット幅の変更と焦点外しによる像の大きさ変化との組合せによる方法を用いた。

Fig. 5 に示すように、輝点像の大きさは合焦点の位置(同図中 $d=27.4$ mm の点)で、最小になり、焦点位置から外れるに従って徐々に大きくなる。一般にレンズに対し、光源に近い側のほうがレンズに対し遠い側よりも像大きさの変化は急激となる。コンピュータで座標値を入力し、ステージを移動して、焦点外しの度合を変化させ、適当な像の大きさに制御して特性計測を行った。5 μm , 10 μm , 25 μm , 50 μm ギャップのスリットのうちのいずれかを用い、フォーカスは合焦点の位置から両方向に

Fig. 5. Focus control and image spot size (for slit=10 μm) (d : distance to the PSD element surface, d' : distance to the packaging surface (glass) of PSD, W : Image size (half width (μm))).

±2.2 mm の範囲でずらしてナイフ・エッジを横切らせたときの光電流を計測し、3-2(b)に述べた方法で像の大きさを推定し、輝点像のサイズを半値幅で 34 μm から 220 μm まで制御できることが確かめられた。

なお、PSD 素子は、IC パッケージにガラス封じされているため、ナイフ・エッジは窓ガラス表面上に配置されている。このため、(b)で述べた方法で計測される輝点像のサイズは、PSD 素子面上での値とはならない。ナイフ・エッジの合焦点状態(ナイフ・エッジ部での輝点像のサイズ最小)の位置と PSD の表面上での合焦点状態(楕円構造によるうねり最大)の位置を検出し、その差として、ナイフ・エッジと PSD 素子表面との距離を求め、ナイフ・エッジでのビームサイズ計測後、その分だけ位置を補正移動して、PSD 素子表面上の輝点像のサイズを制御した。本実験では Fig. 5 に示すようにナイフ・エッジと PSD 素子表面間の距離は 0.2 mm であった。

4. 楕円構造 PSD における輝点像の大きさとの像位置検出特性

4.1 像の大きさと像位置検出特性

楕円構造 PSD においては輝点像部で複数の枝状導体(分離光電素子に対応)とバイアス層との間に光電流が流れる。それぞれの枝状導体の光電流は枝状導体の基幹抵抗との接合部より基幹抵抗へと流入する。基幹抵抗により光電流の流入位置と信号出力端子との間の抵抗値で分割された電流が積算され出力信号となる。輝点像の大きさが分割のピッチに対して同程度に小さくなった場合、枝状導体の不連続性の影響が検出特性に顕著に現れる。

Fig. 6 と Fig. 7(b) に示すのは楕円構造で試作した R-HPSD の最小区分区間選択時の像位置検出特性で、Slit=25 μm (Fig. 6) と Slit=50 μm (Fig. 7) において実測したものである。前述の方法で推定された輝点(線)像(スリット像)プロファイルを Fig. 6, Fig. 7(c) に示した。なお、Fig. 6 にしめされば輝点像プロファイルにはガウス分布よりかなり外れたものもあるが、PSD では輝点の重心的位置が検出されることより、本稿の目的に致命的支障を生じないと思われるので、このまま使用した。Fig. 6(a) と Fig. 7(a) に示したのは像位置検出特性の変動(直線からのずれ)を求めた例である。Fig. 6(b) 3 の特性は 25 μm の導電部の間隔に対して 34 μm 幅の輝線像を投射して計測した像位置検出特性である。

明らかに導電部間隔周期に一致した変動が観察できる。すなわち検出特性に現れている 6 個のうねりは最小区間内に存在する六つの楕円の周期に完全に対応している。両図中(a)に示した像位置検出特性の変動において、3 の曲線を中心として、像の大きさが増大するに伴い、

NO.	FOCS	W	H	R
1	25.0	220	2.0	3.0
2	26.2	104	3.9	2.3
3	27.2	34	10.4	3.8
4	28.2	64	5.1	2.3
5	29.4	142	2.3	2.9

Fig. 6 Examples of image position sensing characteristics No.1 (for slit=25 μm, Focus: focuss length (mm) W : half height width (μm), H : relative height of image spot profile, R : deviation of image position sensing characteristics (μm)).

- (a) Linearity of image position sensing characteristics, These curves showing the deviation value from the ideal sensing characteristics line presumed by the least-squares approximation method for 90% of section excluding those near the output terminals.
 (b) Image position sensing characteristics.
 (c) Corresponding image spot profiles.

NO.	FOCS	W	H	R
1	25.0	94	7.6	2.5
2	26.2	52	13	2.6
3	27.2	48	15	2.6
4	28.2	60	6.9	2.6
5	29.4	90	7.8	2.4

Fig. 7 Examples of image position sensing characteristics No.2 (for slit=50 μm, Focus: focuss length (mm) W : half height width (μm), H : relative height of image spot profile, R : deviation of image position sensing characteristics (μm)).

- (a) Linearity of image position sensing characteristics, These curves showing the deviation value from the ideal sensing characteristics line presumed by the least-squares approximations method for 90% of section excluding those near the output terminals.
 (b) Image position sensing characteristics.
 (c) Corresponding image spot profiles.

うねり幅も減少することが明確に認められる。輝点(線)像サイズ(スリット像)が 60 μm 以上になると、うねりはほぼ認められなくなり、中央部の像位置検出特性が直線に近づいてきて、像位置検出の変動誤差も小さくなる。像位置検出特性のうねりは輝点像の大きさと楕円構造の導電部の間隔の比に深い関係がある。Fig. 8 は像の大きさ(w)と導電部の間隔(p)との比(w/p)と像位置検出特性の変動誤差(R)との関係を示した図である。 w/p の値が大きくなるに従って像位置検出特性の変動誤差 R が小さくなっている。像の大きさを導電部の間隔の約半分から 2 倍にすると、変動誤差が約半分に減少している。すなわち w/p をある程度以上、たとえば 2 以上にすれば、楕円構造によるうねりを著しく減少できることが実験的に確認できた。

Fig. 9 は 3 種類のスリット(幅: $S_1=10$ μm, $S_2=25$ μm, $S_3=50$ μm) についての像位置検出特性より算出した像の大きさ(w)と導電部の間隔(p)の比(w/p)に対しての相対変動誤差(R_1/R_2)との関係である。スリット

Fig. 8 Deviation (R) of image position sensing characteristics as a function of the ratio of image size (w) and comb teeth period (p).

空隙の小さい S_1 (10 μm) に相当する像位置検出特性の相対変動誤差が大きく、また、検出特性の安定性が低くなっている。これは検出特性の安定性が検出光電流の大きさ

Fig. 9 Examples of relative deviation (R_1/R_2) of the sensing characteristics as a function of the image size and teeth pitch ratio (R_1 : deviation, R_2 : deviation at best focusing point for slit width 25 μm)

に関係し、光電流量を大きくしたほうが高くなること、逆説的には光電流すなわち光量が小さくなると、SN比が低下し、安定性も低下することを示している。なお、本来ならば相対変動誤差は S_3 のほうが S_2 より小さくなって然るべきであるが、この図では一部の S_3 のほうが大きくなっている。これは最小2乗法によって理想特性直線を計算する場合に選択された90%の区間が S_3 では少々ずれて設定されてしまったためと考えられる。

4.2 像位置検出特性の直線性解析

櫛形構造 PSD より、分割抵抗製作の安定性と精度を著しく向上できる⁹⁾。像位置検出素子の精度評価においては、検出感度や再現性のみでなく、像位置検出特性の直線性(変動誤差)が重要な要件となる。Fig. 6の(a)とFig. 7の(a)は試作された櫛形構造 PSD の最小区分区間に相当する検出特性について最小2乗法で推定された検出感度直線からの偏差値を解析した結果の例である。この(a)は検出特性を2倍に拡大したものであり、Fig. 6とFig. 7の(c)はそれに対応した輝点(線)像プロフィールである。この解析結果より、像の大きさが小さい場合に最小2乗法で計算された像位置検出特性の最大偏差値は $\pm 1.42 \sim \pm 3.07 \mu\text{m}$ で、相対偏差は約 $\pm 1\% \sim 2\%$ である。輝点(線)像の幅が大きくなるに従って偏差値が減少していることがわかる。なお細かい変動が観測されるが、これは輝点像の光量が低下し、SN比が低下したために生じたものである。いずれにせよ、輝点像のサイズと櫛の歯のピッチとの比をある程度以上(たとえば2以上)にすれば、櫛の歯構造に基づくうねりを著しく低下できる。本実験における場合には150 μm にわずかに6本の歯(分離光電素子に対応)が存在しているだけであ

Fig. 10 Conceptual figure explaining the mechanism of the image position sensing deviation between the adjacent teeth

- (a) Conceptual figure showing the photo-current at the photo-sensitive part (teeth) of comb structured PSD
- (b) Expected image position sensing deviation in the unit period of teeth (i_k : partial photo-current, H : brightness distribution of image spot, 1, 2, 3, 4, 5: five different positions between i_k th and i_{k+1} th teeth)

るが W/P を2以上にすれば、分離構造に基づくうねりが $\pm 1\%$ 以下となっている。すなわち、像位置検出特性の理想直線からの偏差値は $\pm 1\%$ 以下にできることが実験的に確認された。

5. 櫛形構造 PSD における像位置検出特性うねりの減少法

5.1 櫛形構造に基づく像位置検出特性うねりの分析

像位置検出特性は直線となるのが理想的であるが、Fig. 6(b) 3に示すように理想的な特性より外れたうねりが認められる。前述したようにこの像位置検出特性うねりの周期は櫛の歯構造における歯(導電部)の周期と一致している。

Fig. 10は櫛形構造 PSD の櫛の歯の1区間で輝点が移動した場合に像位置検出特性曲線にうねりが現れるメカニズムを示す概念図である。Fig. 10(a)の1, 5の位置では輝点像による光電流はほぼ一方の櫛の歯に集中し、また3の位置では両方の櫛の歯に等分されるので像位置検出特性の値は理想直線上(同図b点1, 3, 5)に一致し、変動誤差は0となる。逆にFig. 10(a)の2および4の位置では輝点像の光感部の面積は両側の導電部に非対称に配分され、その近い側の導電部に流れる光電流のほうが大きくなるため、像位置検出特性は近いほうの櫛の

歯に接近した位置として検出される(同図 b2, 4 点). すなわち光電素子の光感部に対応する導電部の構造は, 輝点像の移動に対して, 輝点像で照射される隣合う導電部光感部面積の変化(負方向側の減少, 正方向側の増加)ができるだけ比例的となるように配置することが望ましい.

5.2 櫛形構造に基づく検出特性うねりの減少法

以上の結果より, 櫛形構造 PSD においては輝点像の大きさと導電部のピッチ(間隔)の比(w/p)を変化して, すなわち輝点像の大きさを導電部のピッチ(間隔)に比べて十分に大きくすれば, 輝点像は多数の導電部にまたがって投射されるので, 像位置検出特性に櫛形構造に基づくうねりが現れにくくなる. しかし, 輝点像の大きさは PSD 検出域に対して充分に小さいことが必要とされる. すなわち輝点像が検出域よりはみ出てしまつては正確な像位置検出ができない¹¹⁾. そこで, PSD の構造上の改良によって櫛形構造に基づくうねりを減少する方法を考えた.

Fig. 11 Simulation results of the deviation of image position sensing characteristics when the width of comb teeth is changed ("■" represent the output terminals and vertical line shows the comb-teeth position, gaussian like curve showing the brightness profiles of image, sinusoidal like curve showing the deviation of image position sensing characteristics. It was estimated about 1% of the sensing range in the case of c)

(a) 櫛の歯(導電部)間隔を狭くする

櫛の歯(導電部)の間隔を狭くすることにより, 櫛の歯構造に基づくうねりを小さくできる. たとえば最小区分区間内の隣の両導電部中央に, 導電部を設けて, 間隔を半分にすると, 輝点サイズとピッチの比(W/P)は 2 倍となり, Fig. 8 に示したように変動値 R を小さくできる. 導電部の間隔を狭くするほど櫛形構造によるうねりは減少できるがその一方で製作が困難となる.

(b) 導電部(櫛の歯)の幅を広くする

Fig. 11 は櫛の歯(導電部: 光感部に対応)の幅を変化した場合に, 像位置検出特性の理想検出直線からのずれをシミュレーションで求めた結果である. このシミュレーションでは光電流が光が照射された導電部のみに, 輝度が比例に流れるものと仮定している. 導電部の幅を広くするに従って, 像位置検出特性のうねりが減少している. この場合, 導電部が 6 個であるにもかかわらず, 理想特性からのずれが約 $\pm 1\%$ まで減少されている. すなわち, 導電部(櫛の歯)の幅を広くすることにより, ほかの設計パラメータを変化させなくても, 櫛の歯構造に基づくうねりをかなり減少できる.

(c) 隣合う導電部面積分布が相補的となるように構成する

Fig. 12 に示すように光感部の両側の導電部の面積分布が基幹抵抗への接合の中心位置から離れるに従って比

Fig. 12 Examples of the structure of conductive part (photo-sensitive element) which can decrease the deviation of image position sensing (R : basis resistance, t : conductive part (photo-sensitive element))

例的に減少し、互いに隣の面積分布とが相補い合うように構成することにより両側の電極に達する光電流がそれぞれ面積比に分けられるので、楯の歯構造に基づくうねりを著しく減少できることはシミュレーションを行うまでもなく容易に理解できる。また、スリット光の1次元計測であれば同図(c)の構造でも十分である。

以上、像の大きさを考慮し、さらに5.2節の(a),(b),(c)の方法を併用することによって楯の歯構造に基づくうねりを実用上障害が生じないように設計することが可能となる。

7. む す び

楯形構造の半導体像位置検出素子 PSD 方式によれば、分割抵抗を安定かつ精度よく製作できる。PSD を複数の区分区間に分割して、相対像位置検出分解能を著しく向上させる R-HPSD 方式⁹⁾の実現は、従来方式では困難であったが、楯形構造の採用により、安定かつ容易に実現することができた⁹⁾⁻¹⁰⁾。一方において、像位置検出特性に楯の歯構造の影響が現れてしまう可能性がある。本研究では、楯形構造 PSD における像の大きさと像位置検出特性を計測し、像の大きさと楯形構造との関係を解析検討した。その結果により、楯の歯周期に対して像の大きさ比ができるだけ大きくなるように制御することによって楯の歯構造に基づくうねりを著しく減少できることが確かめられた。また、構造上の改良としては楯形構造の光感部において光電素子(導電)部の占める面積の割合が大きくなるように、また互いに隣合う光電素子(導電)部の面積分布が位置に対し、比例的に変化し、互いに相補うように構成することにより、光電素子(導電)部の間隔をあまり狭くしなくても、像位置検出特性の理想値(直線)からのずれを著しく減少できることが原理的実験および文献4)のデータなどより明らかにされた。この楯形構造方式の半導体像位置検出素子は、種々の計測システム、自動システム、ロボット、CAD/CAM、FA などの分野に様々な応用が期待される^{12),13)}。今後、楯形構造 PSD の実用化と製品化のための研究が望まれる。

参 考 文 献

- 1) W. Wang and I.J. Busch-Vishniac: The Linearity and Sensitivity of Lateral Effect Position Sensitive Device (An Improved Geometry), IEEE Trans. on Electron Devices, 36-11, 2475/2480 (1989)
- 2) M. Idesawa: High-Precision Image Position Sensing Methods Suitable for 3-D Measurement, Optics and Lasers in Engineering, 10, 191/204 (1989)
- 3) 出澤正徳: R-HPSD: 相対像位置検出分解能 10 万分の 1 を目指す, 理研シンポジウム第 10 回「非接触計測と画像処理」, 20/26 (1989)
- 4) 堀口, 倉橋, 出澤: 新しい方式の半導体位置検出素子の試

作, 理研シンポジウム第 9 回「非接触計測と画像処理」, 12/25 (1988)

- 5) 出澤, 松本: 分離光電素子型半導体像位置検出器とその特性解析, 理研シンポジウム第 10 回「非接触計測と画像処理」, 7/12 (1989)
- 6) 出澤正徳: R-HPSD による多重分解能像位置検出法とその応用, 理研シンポジウム第 11 回「非接触計測と画像処理」, 5/9 (1990)
- 7) M. Idesawa: Multi-Precision Position Measuring Method with R-HPSD Scheme, Proc. MVA '90 (IAPR Workshop on Machine Vision Application), 129/132 (1990, Tokyo)
- 8) 出澤, 丁: R-HPSD による多重分解能センシングと表面形状計測, 第 3 回「ロボットセンサシンポジウム」, 123/128 (1992)
- 9) 出澤, 丁: R-HPSD による多重分解能像位置検出特性, 計測自動制御学会論文集, 29-2, 152/158 (1993)
- 10) M. Idesawa, Ding: Multi-Precision Bright Spot Position Sensing Method with R-HPSD, proc ISMCR '92, 715/722 (1992)
- 11) 出澤, 丁: 楯形構造 PSD とその特性, 第 10 回日本ロボット学会学術講演会, 1053/1054 (1992)
- 12) 丁, 出澤: R-HPSD の多重分解能検出特長性, 理研シンポジウム第 13 回「非接触計測と画像処理」, 1/10 (1993)
- 13) Huai-dong Ding, Idesawa M: Multi-Resolution Image Position Sensing Characteristics of R-HPSD, Journal of Robotics and Mechatronics 5-2, 122/129 (1993)

[著 者 紹 介]

丁 懷 東

1968 年, 重慶大学機械工学系卒業, 雲南農業大学機械工学系講師を経て, 86 年雲南工学院計算機科学系講師, 92 年同助教授, CAD/CAM, 自動設計などの研究に従事。91 年 7 月より現在に至る, 理化学研究所研究嘱託として, 三次元計測法などの研究に従事。

出 澤 正 徳 (正会員)

1968 年, 横浜国立大学工学部 2 部機械工学科卒業。73 年東京大学大学院博士課程修了(工学博士)。同年理化学研究所入所(情報科学研究室)。93 年電気通信大学大学院・情報システム学研究科教授, 現在に至る。図形・画像情報処理, 3 次元計測法, オプトメカトロニクス, 視覚システムなどの研究に従事, 日本機械学会, 情報処理学会, 応用物理学会, IEEE などの会員。

松 本 晋

1990 年, 東京理科大学理学部応用物理学科卒業。同年松下電工(株)入社。現在, 情報配線事業推進部にて統合情報配線システムのシステム設計に従事。