R-HPSD と多重分解能像位置検出特性[†]

出 澤 正 徳*・丁 懷 東***

R-HPSD and Its Multi-Resolution Image Position Sensing Characteristics

Masanori IDESAWA* and Huai-Dong DING***

A new type of semiconductor position sensitive device called **R-HPSD (Riken Hybrid Type Position Sensitive Device)** has been invented. The relative resolution of image position sensing can be increased more than several ten times higher than that of conventional type PSD even though using the conventional circuit technology and without any serious sacrifice in simplicity of instrumentation and detecting speed. In addition, the image position detecting resolution can be changed adaptively by selecting suitable output terminal pair. Then the rough detection in wide range and precise detection in narrower range can be realized very easily with the same detecting element. Several prototypes have been manufactured based on the R-HPSD scheme and multi-resolution sensing capability has been proved by measuring image position sensing characteristics of them. This multi-resolution sensing capability is expected to apply for realizing new types of sensing system required in automation system such as robotics. For instance, it is expected to be used as a sensing element for introducing hierarchial sensing mode such as monitoring mode and attentive or intentional sensing mode.

Key Words: PSD, R-HPSD, high relative resolution, multi-resolution, intentional sensing

1. はじめに

ロボットなどの自動システムにインテリジェントな機能を付与するにはセンシングシステムの装備、特に位置や形状など空間的情報の獲得手段の装備が不可欠である¹⁾。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)^{2),3)}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⁴⁾。一方、PSDを使用した計測システムや距離センサの検出範囲に対しての像位置検出分解能(相対像位置検出分解能)は、PSD素子自体に基づく誤差、アナログ演算回路のドリフト、

A/D変換器の分解能などで制限される。PSD素子自体に基づく像位置検出分解能の限界については、ショット・ノイズや分割抵抗値の変動などで制限されるがこれらを考慮しても従来方式で素子自体の分解能を1/5000以上となるように製作するのでもそれほど困難ではない。しかし、信号処理回路について考えると、通常の電子回路技術ではアナログ演算回路の精度を1/2000程度以上にすることは困難である。したがって、A/D変換器に分解能の高いもの(たとえば、12ビット、分解能1/4000以上)を使用したとしても、像位置検出分解能はアナログ演算回路の精度で制限され、1/2000程度までが限界となる。これ以上の飛躍的な相対像位置検出分解能の向上には、特別な高精度信号処理回路や高安定化電源などが必要とされ高価となるばかりでなく、しばしば、その実現さえも困難となる。この障害を克服するため、アナログ・デジタル混合型半導体像位置検出素子**R-HPSD (Riken Hybrid Type Position Sensitive Device)**を考案した⁵⁾。従来と同じ性能の演算処理回路を用いても相対像位置検出分解能を飛躍的に向上できる。区分区間数を増やせば、相対像位置検出分解能10万分の1の実現も夢ではない⁶⁾。このR-HPSDにおいては、検出感度を向上し相対

[†] 第3回ロボットセンサシンポジウムで発表(1992・1)

* 理化学研究所 和光市広沢 2-1

** 雲南工学院 中国雲南省昆明市

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

*** On leave from Yunnan Institute of Technology
(Received May 15, 1992)
(Revised August 6, 1992)

像位置分解能を向上できるばかりでなく、選択する端子間の区分間数を変えることにより検出分解能を自由に变化でき、多重分解能での像位置検出機能を容易に実現できる。すなわち、R-HPSD 方式によれば、従来型の PSD における簡便さや検出速度に致命的な支障を与えることなく、通常の電子回路技術を使用しても、相対像位置検出分解能を著しく向上できるのみでなく、出力端子の選択により、検出分解能を必要に応じて自在に変化できる。この、多重分解能形態での像位置検出機能は、種々の自動化システムやロボティクスなどの分野で新たな応用が期待できる。本論文においては、R-HPSD における検出分解能向上の原理について述べ、この原理に基づいて試作した 1 次元 R-HPSD プロトタイプの多重分解能像位置検出特性を実験的に確認した。

2. R-HPSD(Riken Hybrid Type PSD)

2.1 PSD の原理

半導体像位置検出素子(PSD)は Fig. 1(a)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、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)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。これ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おり、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。

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, I : photo current, I_A , I_B : output current, X : image position}

$$X = \frac{(I_B - I_A)l}{(I_A + I_B)} \quad (1)$$

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動作する。総合的な像位置検出速度は素子の静電容量や抵抗、検出電流から位置情報を演算する演算回路の動作速度などによって制限されるが、通常、数マイクロ秒から数十マイクロ秒程度での高速像位置検出動作が可能となる。一方、前述したように像位置検出精度(検出分解能)は信号処理回路や A/D 変換器などの精度で制限され、通常の回路技術では、アナログ信号処理回路の精度(1/2000 程度)を越える像位置検出分解能の実現は困難である。

2.2 R-HPSD の原理^{5),6)}

アナログ演算系や A/D 変換器の精度(分解能)による限界を克服するには、アナログ演算系や A/D 変換器の分解能を高めずに、像位置検出精度を向上できる方法が必要とされる。そこで、従来型の PSD の出力端子間に複

Fig. 2 Principle of R-HPSD {R: resistant layer (P-type), P: photo-sensitive layer (insulator), C: bias layer (N-type), $T_1, \dots, T_j, \dots, T_n$: output terminals, T_{CB} : bias terminal, S_w : output current selecting switch circuit, I : photo current, I_A , I_B : output current, B : buffer amplifier, Σ : operational amplifier, D : divider, A/D : analog to digital converter, X_d : detected position in the selected interval, X_j : position of j -th output terminal, X : image position},

数の補助出力電極を設け、それらの選択で、任意の連続区分区間が従来型の PSD と同様に動作できる構造とした R-HPSD を考案した (Fig. 2)。まず両端の出力端子を選択し、像がどの区分区間に属するか検知する。つぎに像を含む連続区分区間の端子を選択して、その区間内での位置を検出する。検出範囲内での像位置 (X) は選択区間の位置 (X_j) とその区間内での検出位置 (X_d) との和として確定される。

$$X = X_j + \frac{(I_B - I_A)l_j}{(I_A + I_B)} \quad (2)$$

ここで l_j は選択された区間の長さを示す。出力端子の位置は集積回路技術を使用してきわめて正確かつ安定に製作でき、また、選択区間内ではアナログ演算系、A/D 変換器の限界精度で像位置を検出できる。したがって、通常の電子回路技術によっても広い検出範囲と高い検出精度を同時に実現でき、総合像位置検出精度を著しく高められる。また、検出に要する時間は、2 回の検出演算操作が必要となるため、従来の PSD に比べて 2 倍以上の時間を要することになるがこれは致命的な障害となることなくきわめて高速といえる。

2.3 R-HPSD による検出分解能向上とその限界

前述したように PSD の像位置検出精度は素子自体の精度、信号処理系の精度、A/D 変換器の分解能などで制限される。R-HPSD では特に高分解能化を困難にしている信号処理系や A/D 変換器などのアナログ信号処理系の精度の限界を克服するために考案したものであり、通常の電子回路を用いても検出範囲に対する像位置検出分解能 (相対像位置検出分解能) 著しく向上できる。

素子自体あるいは結像光学系に起因する誤差などを無視できる範囲においては区分区間数を増加するほど相対像位置検出分解能の向上が期待できる。各選択区間内ではアナログ信号処理系の分解能で規定される精度 $1/n$ (たとえば $1/1000$) で検出でき、区分区間数を m (たとえば 100) とし、選択する区間を 2 区分区間とすれば相対像位置検出分解能 $2/(n \times m)$ ($1/50000$) を実現できることになる。一方、通常の計測システムでは光学系の結像性能などにより PSD 素子表面での輝点像の大きさがある程度 (たとえば $20 \mu\text{m}\phi$) 以下にするのは困難である。輝点像は選択区分区間内に十分に含まれることが必要とされ、最小選択区分区間幅はある程度 (たとえば $100 \mu\text{m}$) 以上に制限される。

素子自体による誤差の要因としてはショットノイズ、暗電流、抵抗層の一様性や安定性などが考えられる。ショットノイズや暗電流による誤差については選択区分区間内におけるアナログ信号処理系の誤差に比べて十分に小さい。抵抗層の一様性と安定性については抵抗層形

成に際してのイオン注入などのプロセスを精密化したり分割抵抗を集中抵抗として構成するなどしてアナログ信号処理系の精度に比べて十分高くすることができる。

以上の点を考慮し、R-HPSD 方式を採用し、PSD の検出範囲を $20 \sim 50 \text{ mm}$ とし、区分区間数 $200 \sim 300$ 程度にすれば、相対像位置検出分解能 10 万分の 1 も実現可能と思われる。ただし、実際の計測システムに使用する場合にはバックグラウンド (外光) の影響を排除するなどの手段が必要とされる。

3. R-HPSD の試作と検出特性

3.1 R-HPSD の試作

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が困難である。R-HPSD においても、各区分区間内、および各区分区間の間での抵抗値のばらつきは検出精度を向上させる上で好ましくない。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集中させた集中分割抵抗型の PSD^{7)~9)} を考案し、採用した。Fig. 3 に示す集中分割抵抗型 (櫛形構造、検出範囲 12 mm , 0.15 mm 間隔に 80 分割) 1 次元像位置検出素子の R-HPSD プロトタイプを試作した⁹⁾。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、その集中抵抗より $25 \mu\text{m}$ 間隔で $5 \mu\text{m}$ 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。補助出力電極のタップを 0.15 mm 間隔で基幹抵抗より引出し、ワイヤ・ボンディングにより外部の出力端子切り替え回路へと導く構造とした。R-HPSD チップのマウンテン

Fig. 3 Conceptual diagram showing the structure of the manufactured comb type R-HPSD (full length is 12 mm and the unit length of minimum interval is 0.15 mm . 81 output terminals (80 intervals))

Fig. 4 Conceptual diagram of the image position detecting characteristics measuring system {LD: laser diode, SL: slit, L: projection lens, I: projected slit image, P: R-HPSD chip, minimum step of the x - y stage is $1\ \mu\text{m}$ for each axis}

(a) Characteristics for 4 interval (40 unit length = 6 mm) selection

(b) Characteristics for 2 interval (20 unit length = 3 mm) selection

グに用いた集積回路パッケージの足の本数が18本であるのとワイヤボンディングが困難であるなどの理由で選択する補助出力電極の出力端子数を最大8個とし、出力端子間隔を最小間隔を含んだものから、等間隔となるものなど数種類のR-HPSDプロトタイプ(動作原理確認用センサ)を製作した。これらの1次元R-HPSDについて、像位置検出特性の計測を行いR-HPSDによる多重分解像位置検出動作を実験的に確認した。

3.2 像位置検出特性計測システム

R-HPSDの像位置検出特性の計測には、Fig. 4にその概念図が示されているようにR-HPSDの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、スリットの像を投影レンズを介してR-HPSD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2次元的に $1\ \mu\text{m}$ ステップで移動できる。この計測システムにおいて、 x 方向に $1\ \mu\text{m}$ ステップで移動してR-HPSDの出力信号(出力端

(c) Characteristics for 1 interval (10 unit length = 1.5 mm) selection

(d) An example of the deviation analysis for the case of switch 3-4 selection in (c) (magnification ratio is 20/1).

Fig. 5 Examples of the multi-resolution image position detecting characteristics of R-HPSD. In the case of 8 equi-interval R-HPSD (10 unit length/interval) {Move the stage by $1\ \mu\text{m}$ step in the measuring system (Fig. 4) and the output signals from selected output terminals which corresponding to I_A and I_B in equations (1) and (2) are taken into a personal computer through the A/D converter with 12 bit resolution; for the input signals, image positions in each interval are calculated based on the equation (1) with $l=1024$. Vertical axis denotes the calculated image position and the horizontal axis corresponding to the stage position A denotes the coefficient of position detecting sensitivity}

子からの出力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・コンピュータに入力できるように構成されている。この計測システムを使用し、ステージ位置に対する R-HPSD 位置出力信号の感度(傾斜), 直線性などを計測, 解析した。なお, ステージの Y 方向への移動は計測時には使用せず, スリット像の結像状態調節時にのみ利用した。

3.3 試作 1 次元 R-HPSD の像位置検出特性

R-HPSD の原理確認のために試作したワイヤボンディングで引き出す補助出力端子の位置を異ならせた数種類のセンサのうちで 10 単位区間ごとに等間隔に 8 本の補助出力端子を引き出したもの, すなわち 8 等分型の R-HPSD センサにつき, 端子の選択の状態によってどのような検出特性を実現できるかを計測した。全区間を選択した場合の特性に重ね合せて, 4 区間(40 単位区間)を選択した場合の検出特性を Fig. 5(a)に, 2 区間(20 単位区間)を選択した場合の検出特性を Fig. 5(b)に, 1 区間(10 単位区間)を選択した場合の検出特性を Fig. 5(c)に示した。それぞれの場合のグラフより, 2 倍, 4 倍, 8 倍と検出感度(特性を示す線の傾斜, A の数値が傾斜の度合を示す)が向上していることが確認できる。Fig. 5 では, 各検出区間の端部で検出特性を示す曲線に非直線

性(だれ)がみられるが, これは, 計測に用いたスポットの大きさ(輝度分布の広がり具合)が反映されたものであり, 輝点の大きさが大きくなるほど検出区間端部付近での検出誤差が増大する。通常 PSD による像位置検出では素子および信号処理回路の特性からも検出可能範囲の中央部付近で検出するのが検出特性の直線性と検出精度を向させる上で有利である。最高検出感度は半分となるが, Fig. 5(b)に示した特性に相当するように, 最小選択可能区間の 2 倍となる出力端子を選択し, 常に, 選択区間の中央部付近で検出されるように動作させることが区分区間の接続部での位置検出特性の不連続性を回避でき, また直線性のよい検出特性が得られる。Fig. 5(d)には出力端子近傍を除いた 90% の区間について最小 2 乗法を用いて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一例を示した。Fig. 5(a)~(c)におけるいづれの像位置検出特性についても, Fig. 5(d)におけるものと同様に検出感度直線からのずれは $\pm 0.5\%$ 程度であった。この偏差値は使用したアナログ演算回路の精度とほぼ同程度であり, アナログ演算回路の誤差が反映されていると考えられる。

Fig. 6 には, 4 単位区間ごとに出力端子を引き出した R-HPSD 素子についての像位置検出特性を示した。Fig. 6(b)は Fig. 6(a)の一つの 4 単位区間の特性を拡大して表示したものである。さらに, Fig. 7 には最小単位区間および 2 単位区間について出力端子を引き出した R-HPSD 素子の像位置検出特性を示した。いずれにおいても小さな周期的なうねりが認められ, Fig. 5(d)に相当する検出感度直線からの偏差値が $\pm 1.0\%$ を越えた値となっている。このうねりの位置再現性はきわめて高く, スリット光の結像状態を最適状態から外すとうねりは認められなくなる。したがって, このうねりは $25\mu\text{m}$ の間隔で光感部へ張り出させた櫛歯構造の影響が現れたものと考えられる。櫛歯の間隔が検出すべき像の大きさに

Fig. 6 Examples of the multi-resolution image position detecting characteristics of non-equi-interval R-HPSD [same as in Fig. 5]

Fig. 7 Examples of image position detecting characteristics for an unit interval (1) and double unit intervals (2) of R-HPSD [same as in Fig. 5]

比べて十分に狭くなるように製作すれば、このうねりは現れなくなり直線性の良い位置検出特性が得られるようになる。

4. 多重分解能特性の応用の可能性

4.1 多重様式・多重分解能センシングの必要性

人間の環境情報獲得形態について考えると、いつでも全ての感覚を通じて最大精度・最大レートで情報を獲得しているわけではない。目的や状況に応じて検出範囲やその分解能、獲得量など適応的に変化させて検出している。たとえば、前注意状態(pre-attentive mode)あるいは監視状態(monitoring mode)と呼ばれる動作形態と注意状態(attention mode)と呼ばれる動作形態がある。前者では、移動物体など通常と異なる状態変化などが検出され、後者では、特定の対象・状態に注意を集中して情報を獲得し、解析・処理する。さらには目的を遂行する上で必要とされる情報を意図的・計画的に検出・獲得・処理・利用するインテンショナル・センシング形態(Intentional sensing mode)¹⁰⁾など、いくつかの異なった形態での検出動作が考えられる。

ロボットなど自動装置のセンサ・システムの構成においても人間の場合と同様にその目的や状況に応じて多重形態で動作できる機能の実現が有効と思われる。全てのセンサを通じて、いつでも最大精度で最大量の情報を獲得するのでは情報処理が煩雑となるばかりでなく、情報処理速度を如何に高めようとも要求に応ずることが困難となる。人間の場合に倣い、モニタリング・モードやアテンティブ・モードなどに相当する階層的動作形態の導入が必要とされる。すなわち、モニタリング・モードで対象の出現や存在など通常と異なる状況を検知し、それらが検知された後に注目領域について詳細な解析・処理を行う注意センシングや、目的遂行に必要な情報を必要な分解能で必要な量だけを意図的に検出・獲得するインテンショナル・センシング¹⁰⁾の実現が望まれる。

4.2 R-HPSDの多重様式・多重分解能センシングへの応用^{11)~13)}

PSD像位置検出手段は光ビーム走査による対象物形状の計測や、対象物やロボットの効果器に付けたLEDなど輝点の位置を検出し、対象物やロボットの位置を制御する場合の位置検出に使用される。前述したように自動システムにおける位置検出において要求される検出精度は、いつでも最高精度が要求されるわけではなく、その動作の目的、形態により、大体の位置が検出できれば良い場合、少し高い検出精度が必要とされる場合、可能な限り高い検出精度が必要とされる場合などいろいろな状況が生じる。実際的には、検出可能範囲は広いが精度

は問わない状態と、特定の範囲内のみで高い検出精度が必要とされることが多い。したがって、それぞれの場合に応じて検出分解能を自在に変化できる多重分解能動作可能な像位置検出手段が望まれる。R-HPSDによれば、多重分解能形態で使用できる像位置検出法をきわめて容易に実現でき、様々な応用が期待できる。なお、特定の検出範囲内のみでの検出分解能を高めたい場合には、その範囲内で区分区間(出力端子間隔)が狭くなる構造とするのみで十分であり製作が容易である。人間の場合のモニタリング・モードやアテンティブ・モードなどに相当する階層的動作形態の導入やインテンショナル・センシングなどを実現してゆく上で、R-HPSDの多重分解能検出動作機能の応用が期待される。

5. む す び

R-HPSD方式では、従来のPSDにおける簡便さと検出速度をあまり犠牲にすることなく、相対像位置検出分解能を著しく向上できる。通常の電子回路技術を用いても、相対像位置検出分解能を従来のPSDの数十倍に向上できる。さらに、同一のセンサによって多重分解能検出動作、すなわち広い範囲での粗い検出と狭い範囲内での高精度検出とを容易に実現できる。この多重分解能検出の機能は、物体表面形状計測などにおいて全体のおおまかな形状の把握や表面追跡動作などと注目部分の精細な計測の2形態での検出機能を実現するなどに適している。今後、このようなR-HPSDを利用した多重分解能形態で動作可能な形状計測システムなどの実現が期待される。さらには、ロボットなどの自動システムにおいて必要とされるセンシング・システムにおける機能の高度化、柔軟化における大きな課題である「センサ・フュージョン」¹⁴⁾や「インテンシナル・センシング」¹⁰⁾を実現してゆくためのセンシング素子の一つとして役立ってゆくことが期待される。

参 考 文 献

- 1) 出澤正徳：ロボットのための距離検出法，計測と制御，26-2，103/110(1987)
- 2) P. Peterson and L. E. Lindholm: Position sensitive detectors with high linearity, IEEE J. Solid State Circuits, SC-13, 392/399 (1978)
- 3) W. Wang and I. J. Busch-Vishniac: The Linearity and Sensitivity of Lateral Effect Position Sensitive Device (An Improved Geometry), IEEE Transactions on Electron Devices, ED-36-11, 2475/2480 (1989)
- 4) 倉沢一男：位置測定におけるPSDの応用，精密機械，51-4，730/737(1985)
- 5) M. Idesawa: High-Precision Image Position Sensing Methods Suitable for 3-D Measurement, Optics and Lasers in Engineering, 10, 191/204 (1989)
- 6) 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)

- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 出澤, 松本: PSD の高分解能化と分離光電素子型 PSD, 第 2 回ロボティクス・自動化システムシンポジウム, 47/50(1990)
- 10) 平成 2 年度科学技術振興調整費, センサーフュージョンのための基盤技術に関する調査報告書, 科学技術庁研究開発局 (1991)
- 11) 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)
- 12) M. Idesawa: Multi-Precision Position Measuring Method with R-HPSD Scheme, Proc. MVA '90 (IAPR Workshop on Machine Vision Application), 129/132 (1990, Tokyo)
- 13) 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)
- 14) 特集「センサ情報の統合」, 日本ロボット学会誌, 8-6, (1990)

[著 者 紹 介]

出 澤 正 徳 (正会員)

1973 年, 東京大学大学院博士課程修了 (産業機械工学専攻)。同年理化学研究所入所。情報科学研究室所属。現在に至る。CG, CAD/CAM, 画像処理, 3 次元計測法, ロボットセンサ, 電子ビームシステム, 視覚システムなどの研究に従事。

丁 懷 東

1968 年, 重慶大学機械学部卒業。東川機械工場技術者, 雲南農業大学講師を経て, 86 年雲南工学院計算機科学科講師, 現在に至る。CAD/CAM の研究に従事。91 年 7 月より理化学研究所研究嘱託として 3 次元計測法の研究に従事。