積分型位置敏感比例計数管と画像検出への応用[†]

武 藤 彰 英*・長谷川 賢 —**

Charge-Integrating Position-Sensitive Proportional Counter and Its Application to the Image Detection

Akie MUTO* and Kenichi HASEGAWA**

A charge-integrating position-sensitive proportional counter (CIPSPC) has been developed for X-ray image detection. The CIPSPC is a 1-D position-sensitive detector with 320 electrodes, and can be used for industrial X-ray image measurements. With this detector and its signal processor, radiographs can be recorded in the energy range of 8keV X-ray. The detector is 128 mm long in effective length, and the signal processor is able to scan 1-line (320ch) for 1 ms. Recorded images of 320×250 pixel are obtained with this system. For the purpose of demonstration, the image of free falling scissors was recorded. The measuring time was 100 ms for the scissors with the over all length of 150mm. From this image, the binary images of the scissors were obtained. The patterns of fine metal wires were also recorded. It was possible to distinguish the metal wire of 0.3 mm in diameter. Experimental results of the image detection demonstrate the feasibility of the proposed CIPSPC system.

Key Words: PSPC, image detection, radiograph, x-ray.

1. はじめに

近年、PL法の施行に伴い、異物検出の分野において画像検出が行えるシステムの必要性が増してきている。物体の移動速度が既知である場合や自由落下する物体の画像検出には、必ずしも2次元検出器を用いる必要はなく、時分割測定が可能な1次元位置検出器 (Position Sensitive Detector, 以下 PSD と略) で対応可能である。また、異物検出では、金属性の混入物のみを発見したい場合がある。この場合、光を主体とする検出方法よりも、X線を用いるのが一般的である。

X線透過画像を得る産業用CTやイメージ検出では、電離箱、半導体検出器といった検出器が使われている¹⁾。本論文では、高速にX線透過画像を得る検出器の一つとして積分型位置敏感比例計数管 (Charge-Integrating Position-Sensitive Proportional Counter, 以下 CIPSPC と略) を提案する。CIPSPCは、X線領域に有感感度を持つ1次元のPSDである²⁾³⁾。10keV程度のX線での利用を目的として開発され、

比例計数管でガス増幅を利用しているため、1次電離から得たイオンの数千倍の電荷を検出器から得ることができる。被検体の密度や厚さによっては、電離箱よりも低エネルギー、低強度 (数) のX線で高速に透過画像の検出ができる。はじめに、計測システムの概要及び、開発したCIPSPCの諸特性について述べる。さらに、自由落下するハサミの画像検出実験について述べ、CIPSPCの画像検出への有効性を示す。

2. CIPSPCの検出原理

CIPSPCの概略をFig.1に示す。検出器に希ガスを主成分とするカウンタガスを流し、アノード線には高電圧を印可する。ガス中をX線が通過すると気体原子を電離し、電子とイオンの対が生ずる。この1次電離で生じた電子が強い電場によって加速されて、さらに、気体原子を電離する。このような電離がねずみ算的に生じて電子が増殖し、いわゆるガス増幅を起こす。このガス増幅によって生じる電荷を利用して位置検出を行う。

検出器は、多数のカソードストリップで構成されるマルチカソードを有する。カソードストリップには、それぞれコンデンサがついている。ガス増幅によって生じた電荷は、カソードストリップを通してコンデンサに蓄積される。コンデンサに蓄積している電荷を、アナログマルチプレクサを介し周期的に読出す。読み出した電荷は、1つのプリアンプによって積分され、電圧に変換される。プリアンプからの出力

[†] 電気学会第11回量子計測高度利用技術調査専門委員会発表 (1998・3)

* 法政大学大学院 小金井市梶野町3-7-2

** 法政大学工学部 小金井市梶野町3-7-2

* Hosei University, Graduate School, Koganei

** College of Engineering, Hosei University, Koganei
(Received June 4, 1998)

(Revised October 23, 1998)

を V_o 、電荷吸収係数を k 、1つの入射 X 線による 1 次電離から発生したイオン量を q 、ガス増幅率を A 、1つのカソードストリップで吸収する X 線強度を I 、プリアンプの静電容量を C_f 、アナログマルチプレクサの読み出し周期を T とすると、

$$V_o = \frac{kqAIT}{C_f} \quad (1)$$

となる。カソードストリップ毎にこの走査を行い、単位時間に入射した X 線の位置検出とその計数を行う。問題となるのは、アナログマルチプレクサとプリアンプで用いられているアナログスイッチの暗電流である。これらは、あらかじめバックグラウンドとして測定し、測定データから差し引くことで対応する。また、後述のように、ガス増幅率 A は高計数率領域では低下するので、出力 V_o の X 線強度に対する比例性が悪くなる。

3. 開発したシステムの概要

3.1 開発した検出器

製作した検出器の概要を Fig. 2 に示す。この検出器には、CIPSPC として位置検出を行う積分法の他に、入射する 1 つ 1 つの X 線に対して処理を行う電荷分割法でも位置検出が可能な構成とした。ウィンドウには厚さ 0.5mm のベリリウム板を使用している。X 線は Fig. 2(a) の Y 軸方向から入射する。計数効率を上げるため、直径 55 μ m のチタン合金のアノードワイヤを 2 本用いている。CIPSPC で用いるカソードストリップの対面は電荷分割型 PSPC のカソードストリップとなっている。CIPSPC 用のカソードストリップは 0.4mm ピッチで 320 枚ある。位置検出の有効長は 128mm で、奥行きは 20mm である。積分法と電荷分割法の位置検出を同時に実現させているため、アノードとカソードストリップの間隔を Fig. 2(b) で示す位置関係にした。積分法で用いるカソードストリップとアノードワイヤとの間隔は 2.5mm である。

Fig. 1 The Charge-Integrating Position-Sensitive Proportional Counter

ガスには、一般に P10 ガス (アルゴン 90%, メタン 10%) と呼ばれるものを使用する。少量のガスを補給するガスフロー方式を用いて、検出器内のガス圧を 1 気圧に保つ。

3.2 開発した計測システム

製作した計測システムの概要を Fig. 3 に示す。ノイズ対策のためアナログマルチプレクサとプリアンプは、検出器と一体化した構造になっている。アナログマルチプレクサには ON 抵抗が低く静電気対策が施された製品を使用している。16 チャンネルのアナログマルチプレクサ IC を 22 個使用し、320 チャンネルから任意の 1 チャンネルを選択する。なお、アナログマルチプレクサ IC では、電源ピン隣の暗電流が大きい 1 チャンネルを除き、15 チャンネルを使用している。ストリップカソードをアナログマルチプレクサのチャンネルに対応させ周期的に走査する。1 ライン (320 チャンネル) を最小 1ms で読み出せる。プリアンプで出力電荷を電圧信号に変換し、メインアンプで整形した後、AD 変換器でデジタル化してメモリに記憶する。この ADC の分解能は 12bit である。メモリは連続した 250 回の走査結果を記憶できる。メモリ上の走査結果はパーソナルコンピュータを通して確認、保存する。

光源には X 線回折装置の X 線管を使用する。この X 線管

Fig. 2 Schematic diagram of the developed detector

Fig. 3 The experimental system for image detection

はCuをターゲットとして8keVの特性X線を出力する。

以上の計測システムにより、128mm×250lineの画像(320×250pixel)を得ることができる。

4. 開発したCIPSPCの基礎特性

4.1 ガス増幅率と検出効率

本検出器は、アノード側から信号を読み出した場合、比例計数管として動作する。アノード側から測定した検出器のガス増幅率をFig. 4に示す。アノードに印可する電圧を1600Vから50Vづつ1900Vまで変化させて測定を行った。

アノード側から検出器の検出効率を測定した。検出効率は28.6%であった。アノードに印可する電圧を変化させても、検出効率に変化はなかった。

4.2 計数特性

0.5mm×0.45mmのスリットを通過させたX線を検出器の有効長128mmの中央に入射して、有感面に0.45mmの幅のX線が入射したときの計数特性を測定した。アノードに印可する電圧は1600Vとした。X線管の管電流を変化させた。X

Fig. 4 The gas gain of the developed detector

Fig. 5 Counting characteristics

線の発生数は管電流に比例する。測定時間は250msである。1つのチャンネルの測定結果をFig. 5(a)に示す。X軸は検出効率をもとにした計数すべきX線のカウント数である。Y軸は低計数率領域での変換効率を用いて出力電圧を計数値に変換した積分法の計数結果である。計数すべき1秒間のカウント数を n 。積分法で測定された計数率を M 、検出器の不感時間を $\tau = 2.4\mu s$ としたとき、

$$M = \frac{n}{1 + n\tau} \quad (2)$$

に従った。(2)式は放射線検出器の不感時間から起こる計数の数え落としを補正するのに用いられる式である。この検出器では、ガス増幅率が高計数率領域での空間電荷効果の発生で低下するので、計数特性が変化するが、計数結果をこの(2)式で補正できる。また、この式から M/n が90%に低下する n を求めると、 $5 \times 10^4 \text{ cps/ch}$ になる。

0.5mm×80mmのスリットを通過させたX線を検出器の有効長128mmの中央に入射して、有効長の広い範囲にX線が入射したときの計数特性を測定した。測定時間は250msである。80mmの幅で入射したX線の位置検出結果が得られた。中央の1つのチャンネルにおける計数結果をFig. 5(b)に示す。この特性は、 τ を変化させても(2)式に従わなかった。原因として、広範囲にわたる空間電荷効果によって、(2)式では補正しきれないと考えられる。同様に、比例性が悪くなり、計数率が90%に下がる計数率は n で表示すると、 $1.7 \times 10^4 \text{ cps/ch}$ になった。

狭い範囲と広い範囲に同時にX線を入射したときの測定像を得るため、幅20mmの中心に0.45mmの方形口を持つ

(a) Linear region

(b) Nonlinear region

Fig. 6 The patterns of X-rays passed throughout a slit

遮蔽物を有感面の前面に置いて、広角(0.5mm×80mm)にX線を入射して測定を行った。Fig. 6(a), (b)に得られた測定像を示す。測定時間は250msである。Fig. 6(a)は、線形で測定できる計数範囲以下でX線が入射したときの測定像である。Fig. 6(b)は、線形で測定できる計数範囲以上の測定像である。線形で測定できる計数範囲以上のX線が入射すると、Fig. 6(b)で示すように、幅広く入射させたときの出力は飽和し、細い入射ビームでのピーク値に対する比が線形領域での比より小さくなる。また、幅広く入射のときは中央が下がり、結果としてエッジが上がるようになる。これは、X線の入射の状況により、チャンネルごとの計数特性がFig. 5(b)の斜線で示す領域S内で変化するためである。このFig. 6(b)にみられるX線の入射幅による計数特性の変化は、X線回折実験に使用する場合、回折像が正しく得ることができないため好ましくない。しかし、被検体の画像を得る場合や、2値化等による特徴抽出においては、むしろ、物体の輪郭外を強調する現象といえる。

5. 検出結果

5.1 X線透過画像の検出

X線透過画像の検出実験を行った。1ラインの走査時間を1msとして、320ch×250lineの画像を得ることにした。測定された画像から、バックグラウンドを差し引き、さらにX線管からの放射による立体角とチャンネル毎の固有な感度の違いを補正した。得られた画像の正規化は行っていない。検出器のアノードに印可する電圧は1900Vとした。X線管の出力は最小の管電流2mA、管電圧20kVである。X線回折装

Fig. 7 The histograms of the images

置の遮蔽空間内で実験を行うため、有効長128mmの中心に80mmの幅でX線を入射している。

Fig. 7(a)に物体の通過していないときに得られた画像の階調のヒストグラムを示す。ピークにおける画像の階調の階級の半値幅は、66階調にわたっている。この広がりの原因を調べるために、物体が通過していないときに得られた画像の1つのチャンネルを時間方向でDFTを用いて周波数解析を行った。その結果、直流成分以外で100Hzが主要周波数成分であることが分かった。これはX線管と計測システムの電源の中で、50Hzの交流電源を平滑整流したものを利用しているためである。使用したX線管について、X線の発生数が一定数以上で100Hzで周期的に揺らいでいることを、シンチレーション検出器でも確認した。

被検体は全長150mmのハサミとした。柄を下にして、検出器の有感面から30mm離し、40mm上から落下させた。X線管と有感面の距離は320mmである。Fig. 8に得られた画像を示す。Fig. 7(b)は、Fig. 8に示す画像の階調のヒストグラムである。

5.2 検出した画像の2値化処理

自由落下による速度の違いを補正した画像をFig. 9(a)に示す。ハサミの原形と一致する。

次に、ヒストグラムFig. 7(a), (b)を使って、Fig. 9(a)の画像を2値化した。

Fig. 7(a)のピークを基に画像の階調値のしきい値を1500として、Fig. 9(a)の2値化を行った。結果をFig. 9(b)に示す。ハサミの原形と一致する。

Fig. 7(b)の画像の階調値のしきい値を500としてFig. 9(a)の2値化を行った。結果をFig. 9(c)に示す。ハサミの金属部分である。

Fig. 7(a)を基に画像の階調値のしきい値を1800としてFig. 9(a)の2値化を行った。結果をFig. 9(d)に示す。ハサミの輪郭の外側部分が強調されている。

Fig. 7(a)を基にしてしきい値を決めれば、容易に、どのような形状のものが通過したかを、Fig. 9(b)で示すように、2値画像化できる。

被検体として使用したハサミはプラスチックと金属で構成されている。Fig. 9(c)はハサミの金属部分である。

Fig. 8 The image of free falling scissors

Fig. 9 The binary corrected images

Fig. 10 The patterns of wire

Fig. 9(d) で示すように、被検体の外側部分の計数が高くなるのが、CIPSPC を用いた X 線透過画像における特徴である。Fig. 7(a) のピーク右側部分では見られない裾を、Fig. 7(b) の最大ピークでは見ることができる。このことから、高速で移動する被検体においても、X 線の入射幅による計数特性の変化が起こっていることがわかる。

5.3 ワイヤの検出

針などの細い被検体の検出が可能であるか調べるため、直径 0.3mm の金属ワイヤを被検体として、1 次元像を得る実験を行った。検出器のアノードに印可する電圧は 1600V とした。X 線の強度、測定時間を変化させて実験を行った。検出器の前面に置かれた 0.5×80mm のスリットの中心にワイヤを縦に張り付け、広角に X 線を入射した。なお、X 線源から検出器有感面までの距離は 30cm である。実験結果を Fig. 10(a), (b), (c) に示す。

Fig. 10(a) は、X 線管の管電流を 2mA とし、測定時間を 250ms とした。1ms での走査結果を 250 回足し合わせている。

Fig. 10(b) は、X 線管の管電流を 20mA とし、測定時間を 1ms とした。

Fig. 10(c) は、X 線管の管電流を 20mA とし、測定時間を 250ms とした。1ms での走査結果を 250 回足し合わせている。

2mA, 250ms の測定条件の像と 20mA, 250ms の測定条件の像から、直径 0.3mm のワイヤの検出は可能であるといえる。特に、20mA, 250ms の測定条件の像からは、ワイヤの両隣のチャンネルの計数が 1% 程度多かった。CIPSPC 固有の入射幅による計数特性の変化が、直径 0.3mm のワイヤの測定でも起こることがわかる。

20mA, 1ms の測定像では、X 線の発生の揺らぎが約 5% あるにもかかわらず、検出できている。320×250pixel の画像

としても、十分、検出可能であった。2mA, 1ms の測定条件でも実験を行ったが、X 線の発生の揺らぎが大きく、検出可能な像は得られなかった。

6. 考 察

CIPSPC は、半導体検出器と違って、専用の製造装置を必要としない。その構造は簡易であり、製作は容易でそのコストも低い。ストリップカソードを増やしたり、間隔を広げることで有効長を長くすることは可能である。また、本研究ではガスフロー方式を採用しているが、ガス密封方式の検出器も製作可能である。

交流電源の周波数に同期して測定を行えば、補正により Fig. 7(a) のピークの半値幅は狭くできる。より 2 値化がしやすい画像が得られると思われる。

CIPSPC を高計数率領域で用いて X 線透過画像の検出を行うと、X 線の入射幅による計数特性の変化から、被検体の輪郭外の計数が多くなる。この特徴は、2 値化等の処理で得られる被検体の原形画像には、影響しないと考えられる。

8keV の X 線は、1mm の厚さの水であれば、36% 透過する。ポリエチレンであれば、1mm で 70%、5mm で 17% が透過する。金属においては、アルミでさえ 1mm の厚さであれば、ほぼ透過しない。Fig. 9(c) で示すハサミの金属部分のみの画像を得ることができた。被検体によって X 線のエネルギーやアノードに印可する電圧を調整することで、大きさによっては、簡易な物質の選別は可能といえる。

7. む す び

以上、CIPSPC の基礎特性と画像検出結果について報告した。本研究で明らかにされた事項を列挙すると

- (1) 開発した CIPSPC の基礎特性を示した.
- (2) 1 ライン (320 チャンネル) を 1ms で走査して, 自由落下するハサミの X 線透過画像を得た. この画像は全長 150mm のハサミの全長を 100ms でスキャンしたもので, それから補正と 2 値化処理によりハサミの特徴を抽出した. これにより, 高速移動物体の画像検出が可能であることを示した.
- (3) X 線の入射幅によって CIPSPC の計数特性に違いがある. これにより, 静止物体, 及び自由落下するハサミから得られた画像において, 輪郭が強調されることを示した.
- (4) 直径 0.3mm のワイヤを検出する試みを行い, X 線強度・測定時間によっては, 針などの異物を検出できる可能性を示した.

以上より CIPSPC は, 画像検出に適した特性を有し, 形状測定や異物検出などの分野で利用できるものと思われる. なお, CIPSPC は放射光実験施設における動的小角散乱実験での検出器⁴⁾として開発されている.

最後に, 開発にあたって多大なご助力と有益なご助言を与えていただいた原子力研究所の浅野芳裕氏, Spring8 の八木直人氏, 東京大学工学部の雨宮慶幸先生に感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) 岩井, 齊藤, ほか: 医用画像診断装置, コロナ社 (1988)
- 2) K.Hasegawa, K.Mochiki and A.Sekiguchi, IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol.NS-28, No.4(1981)3660-3664
- 3) K.Mochiki and K.Hasegawa, Nuclear Instruments and Methods in Phys.Res., A234(1985)593-601
- 4) A.Muto, K.Hasegawa, N.Yagi and Y.Asano, KEK Proceedings, 97-8(1997)151-155

[著 者 紹 介]

武 藤 彰 英 (学生会員)

1996 年法政大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程修了. 現在, 同大学院同研究科同専攻博士課程在学中. 放射線測定器, 信号処理回路の研究に従事. 応用物理学会などの会員.

長谷川 賢 一 (正会員)

1957 年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業. 同年東京大学工学部応用物理学科助手, 59 年原子力工学科に移り, 66 年講師, 71 年助教授を経て 1988 年法政大学工学部電気工学科教授. 現在, システム制御工学科教授. 1973 年フランス CENG 外国人研究員. 放射線測定器, 工業計測器, 電子回路の研究に従事 (工学博士). 応用物理学会などの会員.