

Spresense カメラモジュールを用いた放射線検出器の開発

DEVELOPMENT OF RADIATION DETECTOR USING SPRESENSE CAMERA MODULE

塩澤真未^{#, A)}, 帯名崇^{A)}, 路川徹也^{B)}

Mami Shiozawa^{#, A)}, Takashi Obina^{A)}, Tetsuya Michikawa^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

^{B)} East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

Abstract

Measuring radiation emitted from beam losses during accelerator operation is very important for beam tuning and equipment protection. However, commercially available radiation detectors are often expensive and it is difficult to install a large number of them in accelerator rooms. Therefore, we decided to develop an inexpensive and compact radiation detector that can operate in a radiation environment using a SONY's Spresense microcontroller and a camera board with a CMOS sensor. It is known that when the camera's image sensor (CCD, CMOS, etc.) is exposed to radiation, white dots (stardust) appear as noise in the image, and this is used to measure the radiation dose by counting the white dots (pixels). Tests in the accelerator room have demonstrated that the system can indeed detect radiation. The results, the analysis method and the progress of the development will be presented.

1. はじめに

ビームの調整を行ったり機器を保護したりするため、加速器を運転する際にビームロスから発生する放射線を計測することは非常に重要である。これまで KEK の放射光実験施設 Photon Factory (PF) において、ガフクロミックフィルムや市販の放射線エリアモニターなどを用いて運転中の加速器室内の放射線量の計測を行ってきた[1, 2]。これまで使用してきたガフクロミックフィルムは配線不要で複数の場所で手軽に測定を行えるが、リアルタイムでの測定ができないというデメリットがあった。また、市販の放射線エリアモニターはリアルタイムで線量率をモニターできる反面、比較的高価であった。特に加速器のビーム調整を目的とする場合には、加速器室内に多数の放射線検出器を設置し、どこでビームロスしているかをリアルタイムでモニターする必要があるため、市販の放射線検出器を多数設置することは現実的ではない。

そこで我々は放射線環境下でも動作する SONY 製のマイコン Spresense と CMOS センサ搭載のカメラボードを用いた安価で小型な放射線検出器を開発することにした。一般的にカメラの撮像素子 (CCD, CMOS 等) に放射線が当たると画像にノイズとして白いスポット (スターダスト) が見える事は良く知られているため、それを利用して白く見えるスポット (ピクセル) をカウントすることで放射線量を計測する構成である。もし放射線環境下に設置することで故障してしまったとしても、安価であれば気軽に交換することができる。これまで複数のテスト機を運転中の PF リング内に設置し放射線計測を何度か行い、実際に放射線を検出できることを実証した。本稿ではその結果及び解析方法、開発状況について報告する。

2. Spresense について

Spresense はソニーグループの半導体部門ソニーセミ

[#] mami@post.kek.jp

コンダクタソリューションズが開発した低消費電力な IoT 用ボードコンピュータであり、この製品最大の特徴は耐放射線性が高いことである[3]。これは絶縁層の薄い FD-SOI (Fully Depleted Silicon on Insulator : 完全空乏型 SOI) を使うことで、性能低下の原因となるリーク電流を低減しているからである。開発する放射線検出器は加速器室内の厳しい放射線環境下に設置することが前提なので、耐放射線があることからこの製品を採用した。

Spresense はメインボードやメインボードのインターフェースを拡張するための拡張ボードをはじめ、カメラボードや LTE 拡張ボードなどが販売されており、目的に応じてメインボードと各ボードを組み合わせて使うことができる。また、メインボードは Arduino と互換性があるため Arduino IDE でソフトウェア開発を行うことができる[4]。日本語の開発ガイドやチュートリアルも充実しているので初心者でも開発に取り組みやすい。また、将来的にはエッジコンピューティングとして AI の利用も視野に入れているため Neural Network Console との連携がとりやすい点だが、Spresense を採用した理由の一つである。なお、今回の開発で使用したのはメインボードとカメラボードである。以下の Table 1 および Table 2 に各ボードの仕様を示す。他に入手性のよい比較的小型で安価なカメラとして USB 接続の WEB カメラがあるが、露光時間や ISO などのカメラパラメータを手動で設定できず自動制御する製品が大部分であるため今回の用途には不適であった。

テスト機の外観を Fig. 1 に示す。今回の開発では上記のメインボードとカメラボードのほかにクレイン電子製の Ethernet ボードを用いて、メインボードの USB マイクロ B から給電を行い、通信は LAN ケーブルで行う方針とした。さらに PoE スプリッターを用いることで、検出器までの配線は PoE 対応の LAN ケーブルを1本引くだけでよいので手軽に設置できる。また、各ボードを組み合わせても手のひらサイズで軽いため設置場所の制限がないことも特徴である。

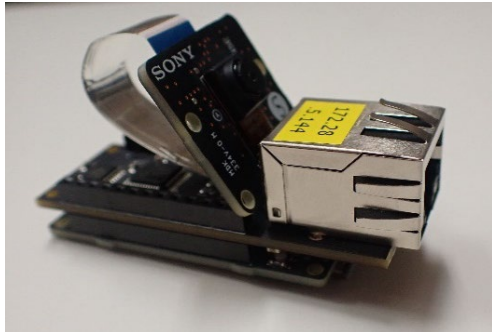


Figure 1: Test Machine

Table 1: Spresense Main Board Spec [4]

Model name	CXD5602PWBMAIN1
Size	50.0mm x 20.6mm
Processor	ARM® Cortex®-M4F x 6cores
Maximum Drive Frequency	156 MHz
SRAM	1.5MB
Flash memory	8MB
Digital Input/Output	GPIO, SPI, I2C, UART, I2S
Analog Input (A/D converter)	2ch (0.7V range)
Camera Input	Dedicated Parallel Interface

Table 2: Spresense Camera Board Spec [4]

Model name	CXD5602PWBCAM1
Size	24.0mm x 25.0mm
Number of pixels	approx.5.11M pixels (Effective) 5.04M pixels (Recording)
Driving Voltage	DC 3.7V
IO Voltage	DC 1.8V
Camera Interface	CMOS 8bit parallel
Output format	Y/C, RGB, RAW and JPEG
Control Interface	I2C
Filter	IR cut filter
Sensor Model name	ISX012
Sensor Type	1/4 type CMOS image sensor
ISO (Gain)	40 ~ 800
Exposure Time	1/8 ~ 1/42000 s

3. セットアップ

3.1 遮光と鉛シールド

開発に用いたカメラボードは放射線検出用ではなく一般的な可視光用のカメラである。我々は可視光を見たいわけではないので、まずカメラボード全体を遮光テープで覆い、完全に遮光する必要がある。また、Spresense は放射線環境下でも動作するが、今回は放射線耐性の試験ではないので念のためメインボード及び Ethernet ボード、PoE スプリッターを厚さ 1 mm の鉛シートで覆った。

3.2 加速器室内への設置

加速器室内の任意の測定場所へ検出器を設置する。これまでの測定により、PF において特徴的に放射線が発生することがわかっている入射点や超伝導ウィグラー付近などへ設置した。今回は開発段階の試験的な測定であるためカメラボードやメインボードは養生テープやインシュロック等を用いて簡易的に固定したが、今後定期的に測定を行う場合には治具などの導入も考える必要がある。

3.3 カメラのパラメータ

測定を行った際のカメラの各パラメータを Table 3 に示す。露光時間はハードウェア的には Table 2 に示した通りだがソフトウェア的には最大 2000 ms まで設定可能である。また、RGB raw データを取り出すことも可能だが、読み出しサイズが小さくなってしまふことから、今回は JPEG を採用した。JPEG で画像データを取得する際、2592×1944, 1632×1244, 1280×960, 640×480 等のサイズが選択できるが、今回は実用上の利便性を考えて 1280×960 (1.23M pixel) を選択している。画像データの取得周期は原理的には 1 秒まで縮めることが可能だが、今回は試験的な測定のため 10 秒で固定としている。このほかにホワイトバランスの設定があるが OFF とした。

Table 3: Measurement Condition

ISO (Gain)	400
Exposure Time	1000 ms
Interval Time	10 s
Output format	JPEG

3.4 EPICS IOC

カメラのパラメータ (ISO、露光時間、データ取得頻度) や画像データの取得周期は PF で導入している加速器分散制御システム EPICS[5]に組み込んでいる。また、10 秒ごとに取得した JPEG の画像データは PF のサーバー計算機に保存される。

4. 解析手法の検討

4.1 解析方針

Figure 2 は PF の超伝導ウィグラー下流に設置した検出器で取った生の画像データである。左がビームなし、右が蓄積電流 $I=100 \text{ mA}$ の時のデータとなっている。この二つの画像を見比べてみると $I=100 \text{ mA}$ の放射線ありの時のデータでは明らかに白いピクセルが多く見えるこ

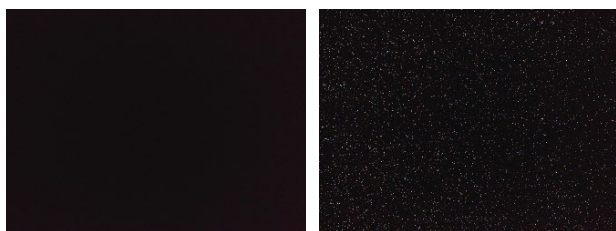
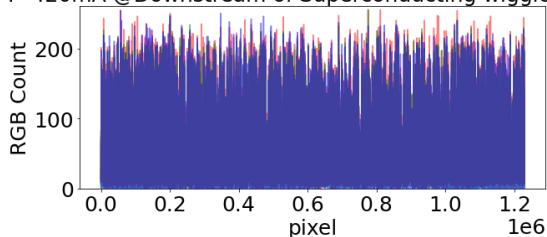


Figure 2: Raw Image Data (ISO : 400, Exposure : 1000 ms @ Downstream of Superconducting wiggler in PF). The image on the left is without beam (NO radiation). The image on the right is with a beam (radiation).

とがわかり、このシステムで放射線を検出できていることを示している。大まかにはこの白く見えるピクセルをカウントすることにより放射線量に相当する値を決めることを目指す。なお、解析は主に Python で行っている。

4.2 生画像のグレースケール化

I=420mA @Downstream of Superconducting wiggler in PF



I=420mA @Downstream of Superconducting wiggler in PF

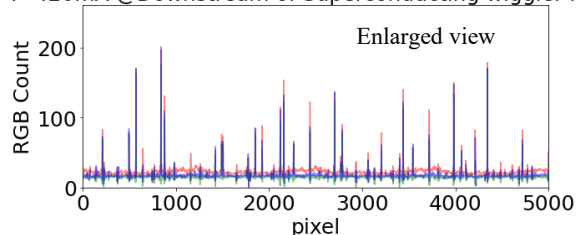


Figure 3: RGB Count Value (I=100 mA, ISO : 400, Exposure : 1000 ms @ Downstream of Superconducting wiggler in PF).

Spresense からサーバーに保存される画像データは 8 bit RGB の JPEG データである。Figure 3 上図は放射線ありの時の例として、超伝導ウィグラー下流において I=420 mA の時の RGB のそれぞれのカウント値をそれぞれの色で横軸を全ピクセル (1280×960=1.23M) にとってプロットしたものである。先に述べたようにカメラは完全に遮光しているので RGB の色情報に意味はないが、このカメラボードは計測専用の CCD でないため、ここでは RGB 特性を調べるために、まずは RGB に分離して解析することとした。全体的に青く見える部分は R,G,B のカウント値がそれぞれ重なり合う部分である。Figure 3 下図はそれぞれのスパイク状のピークを見やすくするため横軸を 0 から 5000 ピクセルまで拡大したものである。なお、8 bit の場合 RGB カウント値がすべて 255 であった場合に「白」であるので、このスパイク状のピークが Fig. 2 に示した白く見えているピクセルに相当している。

このプロットを見る限りでは、ある一枚の画像データ内

において RGB のカウント値はピークに対しどれも似たような傾向を示し、どれか一つの要素のみが著しく低いもしくは高いカウント値を示すようなことはなかった。これより、解析においてこの RGB のカウント値をそれぞれ使うのではなく、単純化するためグレースケールに換算してから用いることにした。なお、グレースケールへの換算には (1)式に示す Python の組み込み関数を用いた。また、カメラ本体からグレースケールのデータとして取り出すことも可能である。

$$L = R * \frac{299}{1000} + G * \frac{587}{1000} + B * \frac{114}{1000} \quad (1)$$

4.3 閾値と計数方法

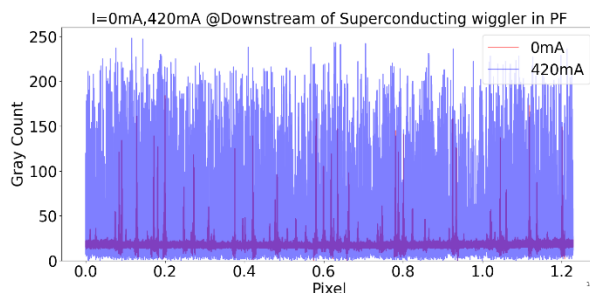


Figure 4: Gray Scale Count Value (I=0 mA,420 mA ISO : 400, Exposure : 1000 ms @ Downstream of Superconducting wiggler in PF).

Figure 4 は I=0 mA (放射線なし) と I=420 mA (放射線あり) のときのグレースケールカウント値のプロットである。赤線で示した放射線なしの場合と青線で示した放射線ありの場合を比較すると青線ではスパイク状のピークがかなり多くみられ、放射線を検出できている。また、今回カメラを設置した場所での放射線量は、蓄積ビーム電流に比例することがわかっている。0 mA のデータでもスパイク状のピークが見られるがこれは後述する常時発光しているピクセルである。また、放射線なしのデータからカウント値が 20 程度のところにベースラインがある。これは回路のオフセットと考えられる。各ピクセルのカウント値の総和を考える際、純粋に放射線によるスパイクのみを数えたいが、その際にこのオフセットは大きなノイズになってしまう。そこでグレースケールカウント値に閾値を設けることにした。Figure 4 より閾値は最低でも 20 以上にすべきであるが、閾値を不必要に上げすぎてもダイナミックレンジが狭まってしまう。

Figure 5 の上のグラフに、閾値を 0 から 255 まで変えた時にその閾値を超えたピクセル数をプロットする。回路オフセットを排除し、放射線によるスパイクを数えるために以降の解析では閾値を 50 として進める方針とした。一方で下のグラフは閾値を超えたピクセルにそのカウント値を乗じて一枚の画像内での和をとったもの(ここではトータルカウント値と呼ぶ)となっている。それぞれ蓄積電流値(放射線量)に応じて 3 パターンプロットした。Figure 5 より閾値に対しての変化はピクセル総数もトータルカウント値も似たような推移を示すことがわかるので、ダイナミック

レンジをより広くとれるトータルカウント値を放射線量と比較する値として扱うことにした。

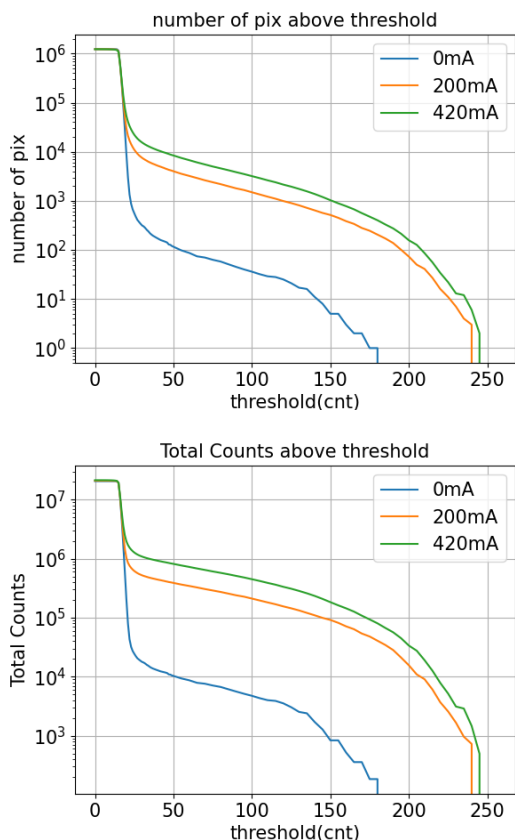


Figure 5: The graph above shows the total number of pixels that exceed the threshold in an image, while the graph below shows the sum of the number of pixels that exceed the threshold multiplied by the count value within an image. (I=0 mA, 200 mA, 420 mA ISO : 400, Exposure : 1000 ms @ Downstream of Superconducting wiggler in PF).

4.4 測定誤差について

放射線量が一定 (0 mA および 420 mA でトップアップ運転) のときに画像ごとのトータルカウント値がどの程度ばらつくのかを調べた。使用したデータはそれぞれ 1 時間分であり、画像データ約 360 枚分である。結果を Table 4 に示す。放射線あり・なしいずれの場合においても、トータルカウント値の平均に対する標準偏差は 1%にも満たず、リング内で放射線量を測定するには大きな問題は無いと分かった。

Table 4: Measurement Error

	I = 0 mA (NO radiation)	I = 420 mA
Average	10000	822062
Standard Deviation	430	23525
Error Ratio (%)	0.043	0.029

5. PF リングにおける放射線エアモニターとの比較測定

PF 加速器室内には既存の放射線エアモニターが設置しており、常時リング内の線量率をモニターしている。特に超伝導ウィグラー下流に設置してあるエアモニターから、この周辺における線量率は蓄積電流によく比例することが知られている。この場所において Fig. 6 に示すように Spresense を用いた検出器と市販のエアモニターを隣に置き蓄積電流ごとのトータルカウント値および線量率がそれぞれどのように変化するかを調べた。

測定結果を Fig. 7 に示す。上図に示したのは蓄積電流値に対する、既存のエアモニターで測定した線量率

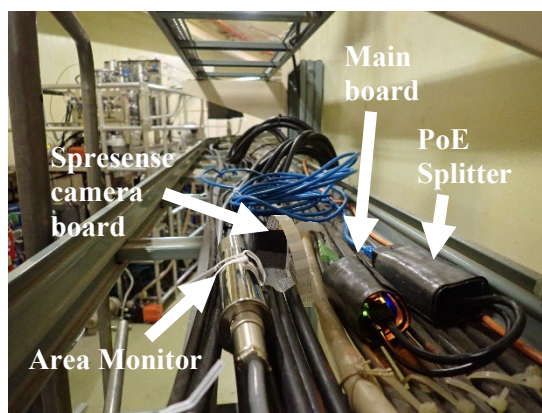


Figure 6: Area monitor and Spresense camera board.

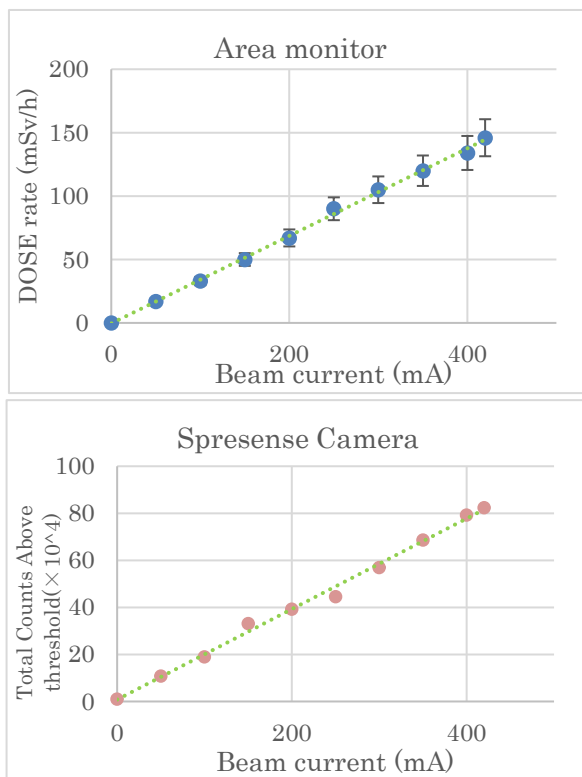


Figure 7: Response of dose rate and total count value to stored beam current.

の反応である。線量率は蓄積電流値によく比例することがわかる。一方下の図は蓄積電流値に対するトータルカウント値の反応である。こちらもよく比例する結果となった。Figure 7 の結果より、解析で画像データより抽出したトータルカウント値は放射線量に対応するパラメータと考えても問題ないことが分かった。

6. 今後の展望

Spresense を用いた放射線検出器の開発はまだ発展途上であり、以下に示すような課題がある。今後も実用化に向けてさらなる検討、改良を行う予定である。

- Exposure Time や ISO の最適化
- 個体差の検証
- 解析方法のさらなる検討
- データ取得停止の原因の切り分け
- ノイズ対策
- データ取得(継続)
- USB 経由でのデータ取得
- 放射線環境下に長時間設置することによる影響の検証

特に放射線環境下にカメラを長時間設置した際にカメラのコンポーネントであるセンサや回路へ与える影響を理解しておくことは、今後対策を考えていくためにも最も重要な課題である。現状で長時間放射線環境下にさらされた検出器からわかっていることは以下の二つである。

- グレースケールトータルカウント値のベースラインの低下
- 放射線とは関係なく常時発光しているピクセルの出現

これらはカメラの設置場所(すなわち放射線のエネルギー)や ISO (Gain) の違い、カメラが浴びた積分放射線

量の違いによるもの考えられる。今後、それらの詳細なデータを取る予定である。

7. まとめ

Spresense メインボードとカメラボードを用いた小型で安価な放射線検出器の開発を行った。実際に運転中の PF リング内に入れて試験測定を行ったところ既存のエリアモニターとよく一致する結果となった。しかしながら、長期的にリング内で使用するにはまだ課題が残る。実用化に向けて改善の余地がある。

謝辞

本開発において KEK 放射線科学センターの岸本祐二氏よりアドバイスを頂いた。ここで感謝の意を表します。

参考文献

- [1] M. Shiozawa *et al.*, "Beam Loss Evaluation by Gafchromic Film", in the Proceedings of the 19th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2022, THP014.
- [2] M. Shiozawa *et al.*, "Dose Distribution Measurement Downstream of Superconducting Wiggler in PF", in the Proceedings of the 20th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, TUP06.
- [3] Y. Kobayashi, "Application of Deep Learning using "Neural Network Console" and single board computer "SPRESENSE"", The 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, SAOHT01.
- [4] IoT 用ボードコンピュータ Spresense, <https://www.sony-semicon.com/ja/products/spresense/>
- [5] EPICS, <https://epics.anl.gov/>