

## SPRING-8 における MicroTCA 画像処理システムの改良

### IMPROVEMENT OF MICROTCA-BASED IMAGE PROCESSING SYSTEM AT SPRING-8

清道明男<sup>#</sup>, 植田倉六, 増田剛正

Akio Kiyomichi<sup>#</sup>, Souroku Ueda, Takemasa Masuda

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPRING-8)

#### Abstract

In SPRING-8, various charged-coupled device (CCD) cameras with Camera Link interfaces have been widely used for electron beam diagnostics of accelerators. We have developed MicroTCA-based image processing system for Camera Link I/F camera as a candidate for the next generation front-end computer. The MicroTCA image processing system has been first applied to upgrade of the two-dimensional (2D) synchrotron radiation interferometer operating at the storage ring (SR) in 2013. In 2015, it has been applied to upgrade of optical transition radiation (OTR) monitor operating at the injection part of SR. We have improved the image processing system by modifying the problem found in actual operations. In a particular operation mode involving a high-current single bunch, it was found a trouble that camera takes unexpected image by noise enters the trigger line. In addition to noise suppression by a ferrite core, we have improved the image processing FPGA logic. There was a trouble every two months that the Linux kernel kills the image data acquisition process in 1Hz cycle operation. We have found and fixed memory leak in the device driver, then we have achieved the long-term operational stability. We have realized hot swapping of AMC's by notifying the hot-plug event to the Linux kernel using the fake Hot-Plug driver.

We are developing implementation using high-performance FPGA AMC compliant with the MTCA.4 standard for performing real-time reconstruction of electron bunch charge distribution measurement.

#### 1. はじめに

SPRING-8 では加速器ビーム診断系に様々な CCD カメラが使われている。画像処理システムの高度化を含めた更新を行うにあたり、次世代フロントエンド計算機の候補である MicroTCA<sup>[1]</sup>をベースとして Camera Link I/F<sup>[2]</sup>カメラに対応する画像処理システムを開発して運用している。MicroTCA 画像処理システムは Camera Link FMC (FPGA Mezzanine Card) と FMC スロット付き FPGA AMC (Advance Mezzanine Card) で構成されており、Camera Link FMC 用の FPGA IP コアと Linux 用ドライバを開発した<sup>[3]</sup>。

開発した画像処理システムは加速器ビーム診断系の更新において制御系のアップグレードとして導入した。実運用において生じた問題点と、その対策について報告する。今後の老朽化対策での導入計画や、より高速処理を行う要望に対して高速 FPGA AMC を用いた展開についても述べる。

#### 2. 画像処理システムの運用事例

##### 2.1 2次元放射光干渉計

MicroTCA 画像処理システムは 2013 年に SPRING-8 蓄積リング 2次元放射光干渉計の高度化で制御システムに適用した<sup>[4]</sup>。2つのプロセッサ AMC による分散処理を実現している。プライマリプロセッサ AMC ではカメラ制御、画像転送、一次元フィッ

ティング処理による水平・垂直方向のビジビリティ算出を行い、セカンダリプロセッサ AMC では二次元フィッティング処理によるビーム楕円成分の長軸・短軸サイズ、ビーム軸の傾き角を算出する。1Hz 外部トリガによって画像が更新し、その都度一次元フィッティング処理と二次元フィッティング処理の算出結果をデータベースに書き込む。中央制御室の大型ディスプレイ上には、ライブビューGUIによる2次元干渉縞表示と、ビジビリティ・ビームサイズ・ビーム軸傾き角のトレンドグラフ表示を行っている。Figure 1 にその様子を示す。

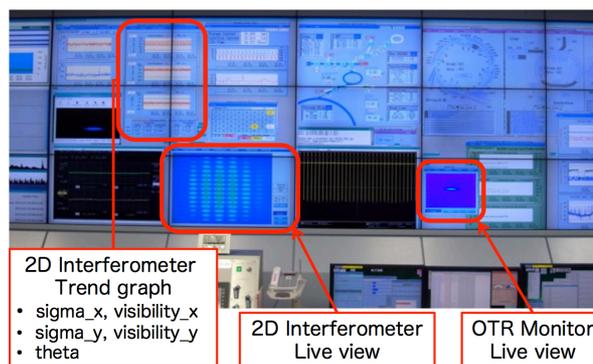


Figure 1: Trend graph GUI and Live view GUI for 2D interferometer on large display at control room.

<sup>#</sup> kiyomichi@spring8.or.jp

## 2.2 蓄積リング入射部 OTR モニター

2015 年には蓄積リング入射部 OTR モニターの更新で制御システムに MicroTCA 画像処理システムを導入した。システム構成は 2 次元放射光干渉計とほぼ同じであるが、二次元フィッティング処理を含めた CPU 負荷は干渉計に比べて大きくないことからプロセッサ AMC 1 台の構成とした。構成図を Figure 2 に示す。ブースターシンクロトロンから蓄積リングへの入射に同期してビームプロファイル画像の取得を行い、二次元フィッティング処理で算出したビーム位置とサイズ、フィッティングピーク値をデータベースに書き込む。中央制御室の大型ディスプレイ上にはライブビュー GUI で表示した (Figure 1, 2)。

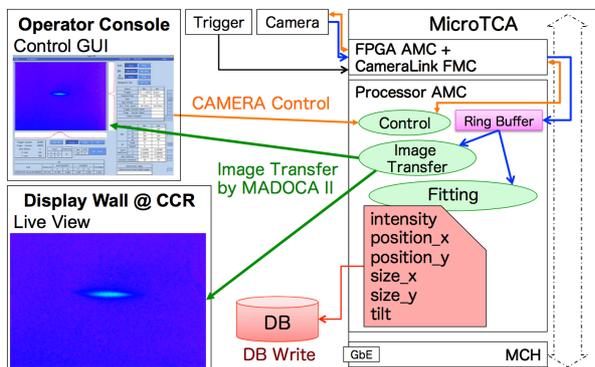


Figure 2: Schematic diagram of the image processing system for the OTR monitor at the SR injection area.

## 3. 実運用で生じた問題

MicroTCA 画像処理システムの運用開始後、幾つかの問題が見つかった。

### 3.1 大電流シングルバンチ運転時の不正画像取得

SPring-8 の運転モードが 11/29-filling + 1bunch のとき、シングルバンチに 5mA~相当の電子が入る運転 (H モード) で想定外の撮影が行われる症状が起きた。通常は電子ビーム入射に同期した 1Hz の外部トリガ信号を Camera Link FMC で受けて Camera Link 信号の CC トリガとしてカメラに入力され、露光時間は CC トリガのゲート幅でカメラに与えられる。H モード運転時にはトリガカウント 1 回の更新に対して、画像取得回数であるフレームカウントが数回分飛び飛びで更新しており、暗い画像となる、画像が途中で切れるといった問題が起きた。外部トリガ信号以外に余計な撮像が行われているものと考察した。

2 次元干渉計の画像処理システムを設置している保守通路にて、Camera Link FMC 上の画像フレーム有効信号 (FVAL) を観測した。比較用に Camera Link PCI ボードを備えた PC ベースのシステムとカメラも用意し、ボードのモニタピンより Camera Link 信号波形を確認した。Figure 3 にオシロスコープによる波形測定を示す。2 次元干渉計のカメラを

MicroTCA システムの Camera Link FMC に接続し、"FMC FVAL" は FMC 上でプローブ測定した FVAL 信号である。PC システムは保守通路に設置してノイズの影響を受けていない比較用カメラと接続し、"D4 FVAL" はその FVAL 信号となる。"D7" の外部トリガは両システム共通である。Figure 3 に示すように、2 次元干渉計のカメラからはトリガ入力が無い期間にランダムに数回の FVAL 信号が観測された。2 次元干渉計のカメラを PC システム側に接続した場合でも、PC システムでトリガ入力が無い期間の FVAL 信号が観測された。また FVAL 信号自身についても短いもしくは分断される事象が観測された。

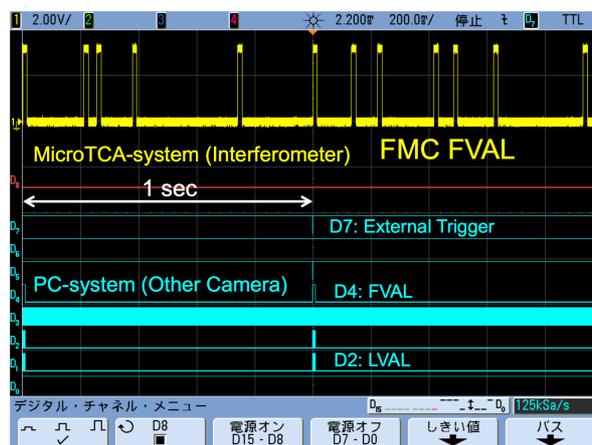


Figure 3: Camera Link signal.

原因調査の結果、カメラを設置しているビームパイプ付近と制御機器の設置している保守通路の間約 20m の Camera Link 信号を延長するために設置した Camera Link Extender がノイズの影響を受け、カメラに対して余計なトリガを掛けていることが分かった。暗い画像は、想定外のトリガの幅が短いことから露光時間が短く反応しているためである。また、画像収集は FVAL 信号の立ち上がりで画像収集を開始し FVAL 立ち下がりで画像収集を停止というロジックで行っているため、画像が途中で切れる現象は FVAL 信号異常により画像収集処理が途中で終了したものと考えられる。

Camera Link Extender 送信部の電源アダプタを加速器トンネル内部に設置した場合この問題は起きないことから、保守通路から配線している DC 電源ラインにノイズが乗っていると考えられる。しかし、トンネル内部に電源アダプタを設置すると運転中の電源切り切りが出来ずトラブル時の対応に支障が出るため、電源配線にフェライトコアを設置するなどのノイズ対策を施した。このノイズ対策によりユーザ運転で利用されるシングルバンチが 5mA のモードで問題は起きなくなったが、加速器スタディで使用するシングルバンチ 7mA 以上では発生する。更なる改善を目指して、制御系でも画像処理ロジックを強化する対策を行うこととした。

### 3.2 画像取得プロセスの異常停止

約2ヶ月の1Hz連続運転で画像収集プロセスが異常停止する不具合が起きた。システムログよりLinuxカーネルからOOM (Out Of Memory) Killerが発行され、データ収集プロセスがkillされたことが分かった。調査により約5Mイベントという一定の回数の撮像でプロセスがkillされており、メモリリークが生じているものと考察した。しかし、プロセスのメモリ使用量を調べたがデータ収集プロセスも他のプロセスもメモリリークは観測されなかった。そこで、カーネルのメモリリーク検出ツール(kmemleak)を有効にしてカーネルを再構築したところ、デバイスドライバのメモリリークを発見したためデバッグを行うこととした。

### 3.3 その他の問題

蓄積リング入射部 OTR モニター向けの画像処理システムを構築した際に、PCI Expressのリンクが成立せずCPUボードから接続ができないという不具合が生じた。原因は、FPGA AMCのFRU (Field Replaceable Unit) 情報のPCI Expressリンクに関する情報が誤っていたことであった。PCI Express Gen3対応のMCH (MicroTCA Channel Hub)が最新のファームウェアにおいてFRU情報を厳密に解釈してPCI Expressポートを有効にするように変更されたことから、FPGA AMCのFRU情報の誤りが明らかになった。以前のファームウェアでは全PCI Expressポートを有効にしていたために、AMC側のFRU情報の誤りに依らずにCPUボードからはPCI Expressを接続できていた。ベンダーにFPGA AMCのFRU情報を修正してもらい解決した。

## 4. 画像処理システムの改良

画像処理システムの導入後に見つかった問題に対して、画像処理ロジックの強化やデバイスドライバの修正といった改良を行った。また保守性を向上させるためのホットスワップ機能や画像収集ステータス確認などのライブラリ関数の追加といった機能追加を行った。

### 4.1 画像収集ロジックの強化

SPRing-8の運転モードによりカメラがノイズの影響を受け想定外の撮影が行われる症状に対して、以下のような画像処理ロジック強化を行った。

- (1) トリガ後の最初のフレームのみ取得：  
ノイズ過多の状況で余計なトリガが掛かることから、トリガ後の最初のフレームのみ取得する機能を追加した。
- (2) Y\_SIZE固定収集：  
FVAL信号のゲート幅で画像収集の場合、FVAL信号の異常の影響を受けるため、あらかじめ設定している画像のX、Yサイズのパラメータを用いて「FVALゲート信号立ち上がりで画像収集を開始、Y\_SIZEまで画像収集を行って停止」というモードを加えた。

ノイズが実際の画像収集のタイミングと重なる場合は影響を排除できないが、これらの画像収集ロジックの改良により画像収集に重ならないノイズの影響は改善できるものと期待される。

2015年6月の加速器スタディにおいて、シングルバンチ7.7mAの運転で100回の画像保存による測定を行った。1Hz外部トリガに対して、ロジック強化対策無しでの撮像数は約20hit/secであり画像取得成功率は約1割であった。本改良により撮像数は1hit/secとなり、画像取得成功率は7割となった。

干渉計に使用しているカメラは最大フレームレートが60Hzであるため、1/60secがカメラでのデータ収集にかかる時間となる。1Hzトリガでの撮像中、強化したロジックではデータ収集中のタイミングを外した時間(59/60sec)にノイズが入った場合は無視されることから、20hit/secのノイズ環境下では

$$(59/60)^{20} = 0.714$$

の画像取得成功率が期待される。7割の成功率は期待通りと言える。

### 4.2 デバイスドライバの改修

画像取得プロセスの異常停止はFPGA AMCベンダー提供のデバイスドライバのメモリリークが原因であることがわかった。本デバイスドライバではDMA転送を実行する度にDMAJOBパラメータをkmallocc関数でメモリ確保し、DMA転送完了時にkfree関数でメモリ解放を行う仕様になっている。しかし、本画像処理システムではDMA転送完了をFPGAからの割込みで処理するノンブロッキング転送を採用したのだが、この場合のメモリ解放が適切に行われていないことが分かった。割込み時でもメモリ解放を行われるように修正したところメモリリークは無くなった。

テストベンチにて、50Hzで1週間の連続運転(1Hzで1年の連続運転に相当)でもメモリリークや異常停止は無く、長期の運用安定性を実現した。

### 4.3 ホットスワップ

MicroTCAの特徴として、システム全体を停止せずにAMCをホットスワップできる機能がある。使用しているFPGA AMCボードはIPMI (Intelligent Platform Management Interface)規格に則り、ハードウェア的にはホットスワップに対応している。しかしこのFPGA AMCはPCIデバイスとして標準的なホットプラグイベントを排出しないため、Linuxカーネルがデバイスのイベントを認識することができない。そこで我々はフェイクホットプラグドライバとデバイスマネージャ機能を使用してLinuxカーネルに通知することでホットスワップを運用上実現した<sup>[5]</sup>。

Linuxカーネル2.6からサポートされたデバイス管理ツールudev (userspace device management)機能を利用した。Udevルール設定ファイルをTable 1に示すように記述することで、OS起動時にFPGA AMC (ドライバ名称: tdrv015)をPCIデバイスとして認識する。

Table 1: Udev-Rule Configuration File

```
/etc/udev/rules.d/51-udev-tdrv015.rules

KERNEL=="tdrv015_[0-9]*", GROUP="root",
MODE="0666", RUN+="echo 1 >/sys/bus/pci/slots/2/power"
```

/sys/bus/pci/slots/2/power の“2”はスロット番号を示す。スロット番号はその下のディレクトリにある address ファイルの内容と lspci コマンドで取得できる PCI 識別番号とで確認できる。FPGA AMC を抜く場合は以下の様に Linux デバイスドライバをアンロードして取り外す。

```
# modprobe -r tdrv015drv
# echo 0 > /sys/bus/pci/slots/2/power
/sys/bus/pci/slots/ 以下にスロット番号を示すディレクトリが存在しない場合には、以下の様にフェイクホットプラグドライバを利用すると PCI 識別番号がディレクトリ名として現れる。
# modprobe fakephp
# modprobe -r tdrv015drv
# echo 0 > /sys/bus/pci/slots/0000:0c:00.0/power
```

再び FPGA AMC を接続する場合は、以下のコマンドを実行して PCI デバイスの再スキャンを行う。

```
# echo 1 > /sys/bus/pci/rescan
```

ホットスワップ対応により、故障時などでシステム全体を停止させることなくボード交換等が可能となり、保守性が向上した。

## 5. 今後の展望

### 5.1 線形加速器プロファイルモニターシステムの更新

SPring-8 加速器ビーム診断系では様々な場所でアナログカメラが使われており、その老朽化対策として CameraLink CCD カメラと本画像処理システムの導入が検討されている。SPring-8 線形加速器ではプロファイルモニターで 49 台のアナログカメラを運用しているが、導入から約 20 年経過しており Camera Link カメラへの置き換えを進めている。

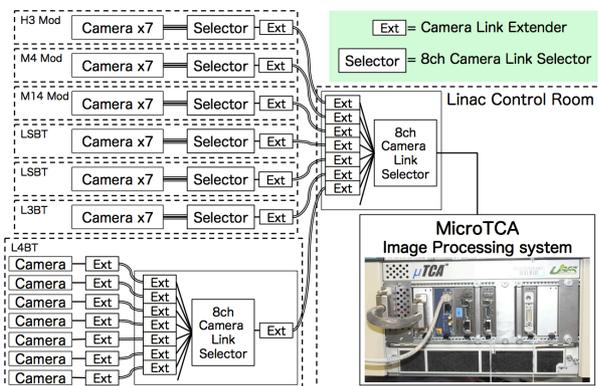


Figure 4: Schematic plan of the image processing system for Linac beam profile monitors.

Figure 4 に示すように、1 台の MicroTCA 画像処理システムから 8ch Camera Link Selector を二段用いて、49 台のプロファイルモニターを切り替えて読み出す構成とする。

### 5.2 3次元バンチ形状モニター用制御システム

SPring-8 では、蓄積リングのエミッタンスを大幅に小さくするために SACLA を入射器として高輝度・単パルス放射光の発生を目指している。このビーム輸送ライン XSBT (from the XFEL Facility to the Booster Synchrotron Beam Transport Line)に設置し、フェムト秒時間分解能で計測可能で 3次元バンチ形状 (バンチ内電荷位相分布: Beam Charge Distribution) をシングルショット・非破壊計測可能なモニターを開発している<sup>16)</sup>。3D-BCD モニターは、EO (電気光学) 結晶を電子ビーム軌道の周りに複数個配置し EO サンプリング計測したプローブ光を空間多重化方式 (ファイバーバンドル伝送・F マッチング分光撮像) で伝送する。このモニター 3 台を 1 組にして 2次元画像としてカメラで読み出す。これを 4 組、最終的には 6 組の画像を同時に読み出し、3次元バンチ形状の再構築を行うための制御システムとして MicroTCA 画像処理システムを適用することを計画している。

複数のカメラから、最終的には 60Hz での同時収集・演算を行うために、より高速な FPGA AMC を用いた画像処理システム構築を進めている。プラットフォームは MicroTCA の拡張規格である MTCA.4 (MicroTCA Enhancements for Rear I/O and Precision Timing)<sup>17)</sup>を選択した。MTCA.4 はトリガ・クロックといったタイミング信号ラインの規定があり、バックプレーン経由のトリガ分配を利用して画像の同時収集が可能となる。MTCA.4 は標準の MicroTCA 規格の資産が活用できるだけでなく、物理実験や加速器制御での用途を目指した規格であり、タイミング信号の他にも Rear Transition Module (RTM)の利用が可能といった特徴がある。次世代フロントエンド計算機として有力な候補である。

Figure 5 に 3D-BCD モニター用の制御システムとして計画している構成図を示す。4~6 台のカメラ画像を同時収集・演算して 3次元バンチ形状の再構

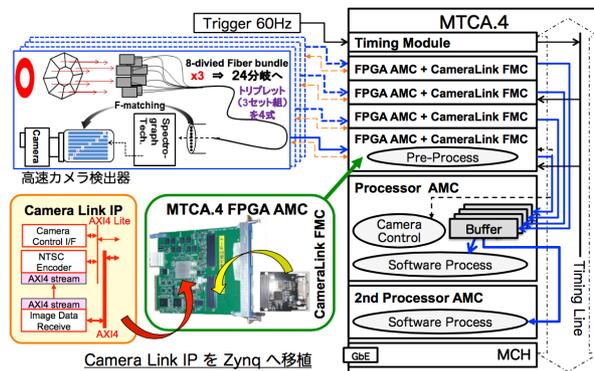


Figure 5: Schematic plan of the image processing system for 3D-BCD monitor.

築を行う。FPGA AMC は ARM プロセッサを組み込んだ System-on-a-Chip (SoC)タイプである Xilinx 社製 Zynq-7000<sup>[8]</sup>を使用した MTCA.4 FPGA AMC<sup>[9]</sup>を採用した。FPGA AMC の ARM プロセッサ上での前処理とプロセッサ AMC で集約した画像による演算処理とを組み合わせた分散処理を行い、リアルタイム再構築の実現を目指す。MicroTCA 2次元画像処理システムで開発した Camera Link IP コアを Zynq-7000 に移植し、Zynq-7000 上の ARM プロセッサに Linux を搭載してカメラ制御ライブラリを整備し、ARM Linux 上でのカメラ制御と画像取得を実現した。

今後、3D-BCD モニターでは分光撮像のためのカメラの選定をして Camera Link 読み出しの調整を行い、プロセッサ AMC への DMA 転送の整備を行う予定である。

## 6. まとめ

MicroTCA をベースとした画像処理システムを開発し、SPring-8 の加速器ビーム診断系へ導入した。導入後に特定の運転モードでノイズ過多となる問題が見つかったが、画像処理ロジックの強化を行うことで画像処理の成功率を改善させた。また、長期運用で見つかったデバイスドライバのメモリリーク対策や、ホットスワップ対応などの保守性を向上させる機能の追加を行い、運用安定性を向上させた。

今後、他の加速器ビーム診断系において老朽化対策での導入が計画されている。また、MTCA.4 プラットフォームの採用や高速 FPGA AMC への移植も進め、より一層の活用が期待できる。

## 参考文献

- [1] PICMG MTCA.0 Micro Telecom Computing Architecture Base Specification (and associated subsidiary specifications), Revision 1.0, July 6, 2006. PICMG [www.picmg.org](http://www.picmg.org)
- [2] Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers, Automated Imaging Association <http://www.visiononline.org/vision-standards.cfm>
- [3] A. Kiyomichi et al., "Development of MicroTCA-based Image Processing System for the Two-dimensional Synchrotron Radiation Interferometer at the SPring-8 storage ring", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 2013, p.242.
- [4] A. Kiyomichi et al., "MicroTCA-Based Image Processing System at SPring-8", Proceedings of the 19th Real-Time Conference, Nara, Japan, May 2014, 7097434.
- [5] A. Piotrowski, and D. Makowski. "PCI Express Hot-Plug Mechanism in Linux-based ATCA Control System", Proceedings of 17th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), Wroclaw, Poland, pp.148-151, June 2010.
- [6] H. Tomizawa et al., "Development of non-invasive monitoring system to measure bunch-by-bunch charge density distribution in 6D phase space", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 2014, p.71.
- [7] PICMG MTCA.4 MicroTCA Enhancements for Rear I/O and Precision Timing, Revision 1.0, August 22, 2011. PICMG [www.picmg.org](http://www.picmg.org)
- [8] <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html>
- [9] M. Ryosi et al., "MTCA.4 FPGA(Zynq) board", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 2014, p.1303.