

## BEAM PROFILE MONITORING SYSTEM FOR XFEL/SPring-8

Takahiro Matsumoto <sup>#,A), B)</sup>, Akihiro Yamashita <sup>A), B)</sup>, Shinobu Inoue <sup>C)</sup>, Yuji Otake <sup>A), B)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN, XFEL Joint Project/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

<sup>B)</sup> JASRI, XFEL Joint Project/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

<sup>C)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd. (SES)

2-23-1 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

### Abstract

A beam profile monitoring system was developed for XFEL/SPring-8. In this paper, we focus on an image processing system. The system is composed of 46 screen monitors (SCMs) and the transverse size and shape of electron beams are measured with resolution down to 10  $\mu\text{m}$ . The SCMs provide a valuable tool for beam commissioning to optimize beam transport and also to measure beam emittance. The imaging system uses CCD cameras which are connected with Camera Link. An image data is selected with Camera Link selectors and processed with an image server. Many functions are required as the diagnostics tool of the beam profile monitoring system: real time image monitoring, image analysis, camera control and screen control etc. We developed GUI (Graphical User Interface) by the tool of python to flexibly implement the required functions and a synchronized data acquisition system for the image data. The system was successfully implemented to the SCSS prototype accelerator, and worked as expected. The system can be applied to the beam commissioning of XFEL/SPring-8, which is planned in March 2011.

## X線自由電子レーザー計画におけるビームプロファイルモニターシステム

### 1. はじめに

現在 SPring-8 において X 線自由電子レーザー (XFEL/SPring-8) が建設されている。2011 年 3 月からビームコミッショニングを開始する予定である<sup>[1]</sup>。XFEL/SPring-8 では SASE(Self-amplified Spontaneous Emission)方式により、0.1 nm 以下の波長をもつ高輝度の X 線レーザーを生成させることが目標である。この X 線レーザーの生成では、約 70m のアンジュレーター区間において、8GeV まで加速した低エミッタンスの電子ビームと発生した自然放射光をその区間で 10 $\mu\text{m}$  程度に重なり合わせなければ SASE 相互作用を引き起こすことができない。このためには、ビームの情報(位置、形状、電荷量など)を加速器の各点において高い精度で測定する

必要がある。

XFEL/SPring-8 で使用するビーム診断機器の配置を図 1 に示す。位置測定に RF 空洞型ビーム位置検出器(RF-BPM)、形状測定に遷移放射光(OTR)や蛍光版を用いたスクリーンモニター(SCM)、ビーム電荷測定には、差動型 Current Transformer (CT)を用いる<sup>[2]</sup>。ビームプロファイル測定を行う SCM は全部で 49 式設置する。本稿では、SCM の画像処理システムの開発、特にビームの横断方向の形状測定(10 $\mu\text{m}$  以下での位置精度)を行う CCD カメラを用いたシステム(46 式)を中心に説明をする。他に、ビームの縦方向の形状測定を行うスクリーンモニターによるシステム(3 式)があるが、ここでは説明を省略する。このビームプロファイルシステムは、ビーム軌道の最適化、ビームパラメータの測定(エミッタンス、

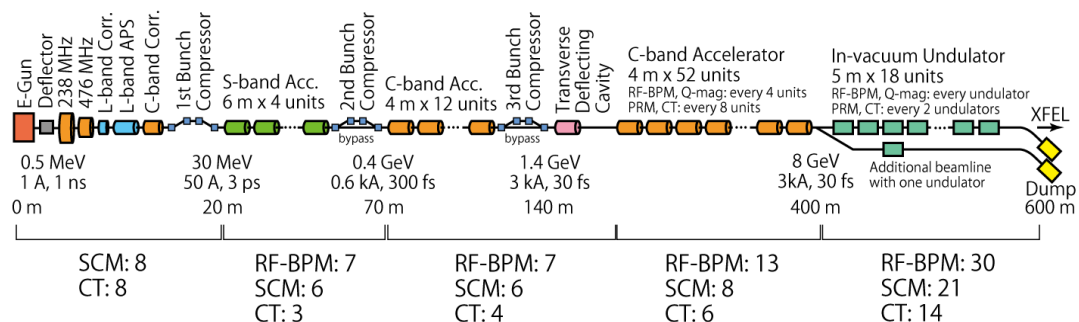


図 1: XFEL/SPring-8 施設の構成及びビーム診断機器の配置

#matumot@spring8.or.jp

Twiss パラメータ等)などに利用され、特にビームコミッションングにおいて重要な役割をなす。XFEL/SPring-8 の立ち上げが円滑に進むよう、必要な機能を実装し、かつ安定に動作するシステムを構築する必要がある。

## 2. スクリーンモニター (SCM)

SCM の構成を図 2 に示す。スクリーン、光学系システム、スクリーン機器制御(スクリーン駆動、レンズ倍率調整など)、画像収集システムなどさまざまな要素から構成される。

スクリーンは、30MeV 以上のビームには OTR(Optical Transition Radiation)用の金属フォイル、300MeV 以下のビームでは、Ce:YAG の蛍光板を用いる。30-300 MeV では両方のスクリーンが選択可能である<sup>[3]</sup>。光学系はカスタムメイドのレンズとモータ駆動の可変ズーム機構を導入している。このスクリーンモニターの分解能は 4 倍ズーム時で  $3\mu\text{m}$  程度であり、要求される  $10\mu\text{m}$  以下の分解能を満たす<sup>[4]</sup>。スクリーンの機器制御は、PLC(Programmable Logic Controller)を用いて構築し、この PLC 群を FL-net プロトコルを用いて制御する<sup>[5]</sup>。CCD カメラは 2 種類のカメラ、JAI : CV-A10CL(モノクロ 46 万画素、フレームレート 60 fps)と、JAI : CV-M4+CL(モノクロ 145 万画素、フレームレート 24 fps)をモニター位置に応じて使い分ける。

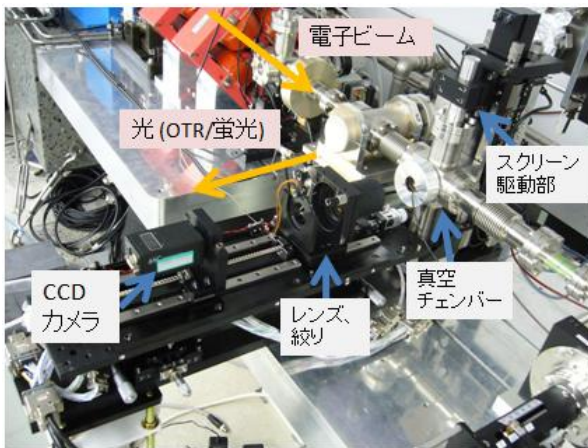


図 2: XFEL/SPring-8 用 SCM

## 3. SCM 画像処理システム

SCM で用いられる CCD カメラの通信には Camera Link を用いる。この Camera Link を用いて画像伝送、外部トリガー信号の伝送、カメラ制御(仮想シリアル通信による)を行うことができる。SCM は破壊型の測定器であるため同時に使用できるモニターの数は 1 つである。図 3 に示すように、複数の Camera Link の信号は Camera Link 切替器(Stack : CLS-900A)により 1 つに選択されたあとカメラサーバーへ入力される。実際には、46 台の CCD カメラが加速器トンネル内に設置されており、そこから XFEL

制御室にあるカメラサーバーまで Camera Link 信号を長距離伝送させる必要がある。このため Camera Link の信号は光に変換し光ファイバーを用いて延長させる。Camera Link 信号で 1 つのカメラを選択するために 11 台の Camera Link 切替器を使用する。

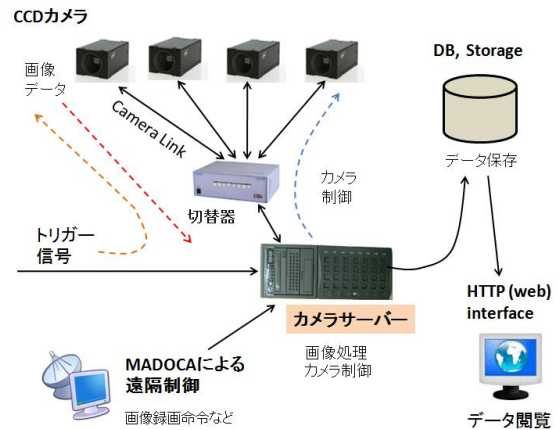


図 3. SCM 画像処理システムの構成

画像処理およびカメラ制御を行うカメラサーバーには、画像収集用ボード(AVALDATA APX-3312/1)とカウンターボード(Interface PEX-632102)を実装する。これらは PCI Express ボードであり Linux ドライバが利用可能である。カメラサーバーのシステムは Linux /Cent OS 5.4 を用いて構築した。

カメラサーバーには、ビームに同期して画像データを収集するため外部トリガー信号を入力する。XFEL 加速器の RF 機器は最大 60Hz のトリガー信号で同期して制御されるが、ビームはこの信号を分周させたトリガー信号に同期させて発生する。このため、カメラサーバーにはこれら 2 種類のトリガー信号を入力する。ビーム同期のトリガー信号は画像入力用、RF 制御のトリガー信号は同期収集事象番号(以後タグ番号と命名する)計測用として利用する。画像は後で解析するため DB(database)及びディスクに記録される。画像データは容量が大きいためファイル経由でディスクに記録する。DB には、画像ファイル名、タグ番号、測定条件等を記録する。このデータは Web 経由で閲覧することも可能である。また、画像の録画操作などを MADOCA の制御フレームワーク<sup>[6]</sup>を用いて遠隔制御させることも計画している。画像録画は各種条件(ビーム輸送用磁石の磁場値、ビームコリメート用のスリット値など)を変化させながら行うことも想定されるが、このために条件を変えながらカメラサーバー以外の端末からも画像録画を可能にする必要がある。本システムでは、この事を実現させて制御の柔軟性を向上させる。

### 3-1. ソフトウェア構成

カメラサーバーにおいて行う画像モニター、画像録

画などの操作は、直接画像入力ボード・カウンターボードを制御して行うのではなく、図4に示されるように間に Shared Memory (制御用、画像用)を介在させるようソフトウェアを構成した。ボードの直接の制御は画像収集、カウンターボード用のソフトウェアを用いて行う。このように、間に Shared Memory を介在させることでさまざまなメリットが生じる。

- Shared Memory に画像のバッファ領域を設けることで、過去に取得した画像データも参照することができる。
- 画像モニターしながら画像録画をするなど、画像処理に複数プロセスを非同期に介在させることができる。
- 現在は、Camera Link 対応のカメラのみ処理することができるが、GbE 対応カメラなど他のカメラの処理も、画像収集ソフトウェアのみに改造を加えることで柔軟に対応することができる。また、同様にして疑似データを取り込むよう実装することで、カメラを使わずにシステムテストを行うこともできる。

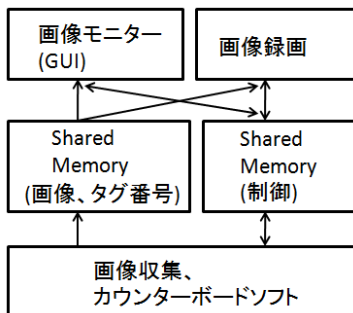


図4: Shared Memory を介したソフトウェア構成

### 3-2. Python による GUI 構築

画像モニターに利用する GUI(Graphical User Interface)は、ビームコミショニングで必要とされる多くの機能を実装することが要求される。調整時には、カメラ制御、スクリーン操作、画像のバックグラウンド差引などの操作が必要である。画像処理に関しては、5Hz 程度でリアルタイムでのモニター、また、ビームプロファイル画像から位置、幅、強度を解析する必要がある。また、画像データはタグ番号も付加して保存することで同期収集系へ取り込む必要がある。同期収集系への取り込みは、画像データを RF-BPM、CT などの他の同期収集系データとビームショット毎に比較するために行う。

この GUI の構築にあたって、従来 SPring-8 で利用されてきた C 言語による X-Mate の GUI<sup>[6]</sup>では機能面の不足(画像モニターがちらつくなど)があったため、Python 言語による WxPython<sup>[8]</sup>を用いて GUI 構築を行った。

Python では既存のモジュールを活用することで多く

の機能を柔軟に取り入れることができる。活用した Python モジュールには、PIL(画像処理)<sup>[9]</sup>、numpy(数値計算)<sup>[10]</sup> などの汎用モジュール、画像解析、MADUCA 制御、データベース(DB)アクセスなど必要に応じて開発したモジュールが挙げられる。

GUI 構築に関しては GUI フレーム部と GUI アルゴリズム部を分離させプログラム開発効率を向上させるため、フレーム設計に WxFormBuilder<sup>[10]</sup>を用いた。この機能分離は、WxFormBuilder によって設計した GUI フレーム情報を XRC ファイル(XML 形式)に保存し活用することで可能になる。

## 4. SCSS 試験加速器における SCM 画像処理システムの実装、及び動作試験

XFEL/SPring-8 のために開発したビームプロファイルシステムは、XFEL の技術開発および実証のために建設された SCSS 試験加速器を用いて動作試験を行った。SCSS 試験加速器では、既に Camera Link を用いた画像収集システムを実装している<sup>[12]</sup>。しかし、このシステムではカメラサーバーの OS に Windows を使い Labview(NI)により制御システムを構築していた。実際の XFEL 用の本装置では、MADUCA 制御フレームへの組み込み、ビームコミショニングに必要なさまざまな機能の実装等、拡張性を考慮し、本稿で示した Linux によるシステムに置き換え、ビームプロファイルシステムの評価を行うことになった。

図5に SCSS 試験加速器に実装した OTR スクリーンモニターの GUI を示す。以下にこの GUI で操作が行われた各操作の説明、及び動作試験の結果を記す。ビームコミショニングで必要とされる機能(カメラ調整、画像処理、同期収集系への画像データの保存)が問題なく動作することが検証された。

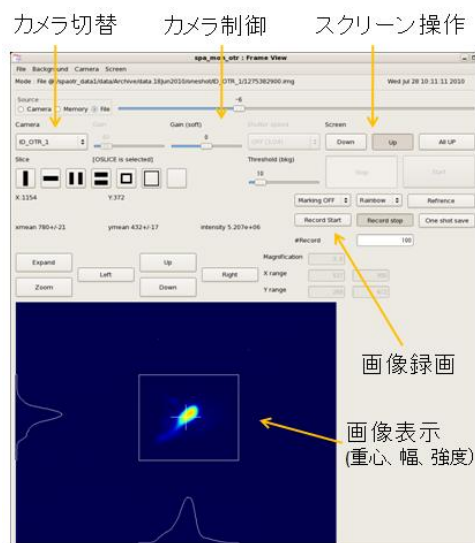


図5: SCSS 試験加速器における OTR スクリーンモニターGUI



#### 4-1. カメラ調整

実験でのカメラの調整時には、カメラ切替えを行い、各カメラに対して露光時間、ゲインの調整などの設定をおこなったり、ノイズを除去するため、閾値を設定したり、バックグラウンドデータを取得し差し引くなどの操作を行う。調整値はカメラ毎に異なるため、設定値は DB(database)に自動保存することで同じ条件での再設定が可能となる。この後、スクリーンを駆動させることでビームプロファイル画像をモニターすることができる。調整後は、設定値を変えることができないようロックをかけることもできる。

#### 4-2. 画像処理

画像の閲覧は、CCD カメラによりリアルタイムで収集している画像をモニターする場合、または、収集後にファイルまたは Shared Memory に記録された画像をモニターする場合があるが、これら画像源の選択ができるようになっている。リアルタイムでの画像収集に関しては、実験時に 5Hz で動作し、スムーズに画像が収集されることを確認している。画像モニターは必要に応じて各種の操作が可能である。ビームプロファイル画像の中心、幅、強度の算出、プロジェクション表示ができ、画像データの統計処理を行う領域の選択できる。また、実際に実験で利用した際、ビームの径が小さくビーム形状がわかりにくい状況もあった。これを克服するため画像の拡大縮小の操作も実装している。

#### 4-3. 同期収集系への画像データの保存

画像データはタグ番号を付加して保存することで同期収集系に取り込む。タグ番号の決定は、カメラサーバーで行っているトリガー信号のカウントのみでは行うことはできない。カウント値からタグ番号を求めるためには、他の BPM データなどのタグ番号との相対関係を求めるために別途オフセット値を決定する必要がある。このため、同期収集系の制御に用いられている他の計算機において DB に保存されているタイムスタンプとタグ番号の関係を利用する<sup>[13]</sup>。画像録画開始時にカメラサーバーの割り込み機能を用いて画像入力時のタイムスタンプとカウント値を求める。このタイムスタンプ値を上記 DB のタイムスタンプ値と比較する。タイムスタンプ値の差が同期収集の時間幅(16ms)と比べて十分に小さい時の DB におけるタグ値とカメラサーバーでのカウント値を比較し、差をとることでオフセット値を決定する。この手法は SCSS 試験加速器において動作検証が行われて、安定して運用が行われている。

### 5. 改良点

SCSS 試験加速器の動作試験において、稀に Camera Link 経由での制御がハングアップによりできなくなる場合があった。この際は手動でカメラの電源でリセットをおこない対処を行った。XFEL/SPring-8 では、装置の規模が大きくこのような手動の電源リセットは不可能である。これに対応するために、XFEL/SPring-8 では、遠隔操作でカメラの電源制御を行うことができるようにした。カメラ電源はカメラ切替え時に立ち上げる予定であり、通信の安定性が確保されることが期待される。

### 6. まとめ

XFEL/SPring-8 のためのビームプロファイルモニターシステム、特に画像処理に関わる開発を行った。CCD カメラは Camera Link で接続され、カメラサーバーにより画像収集・制御が行われる。本システムでは、システム調整、画像処理、同期収集系への画像の取込みなど多機能を実装することが必要とされるが、開発したシステムを SCSS 試験加速器に実装し以上の機能が問題なく動作をすることを実証した。カメラ通信のハングアップによる安定性の問題はああるが、カメラ電源の遠隔制御により解決できる見込みである。今後は XFEL/SPring-8 におけるビームプロファイルモニターシステムを構築し、2011 年 3 月から開始予定のビームコミッションングに備える。

### 参考文献

- [1] 新竹積, 他, “X 線自由電子レーザー計画の進展”, 本 Proceedings, WEPL01
- [2] 前坂比呂和, 他, “XFEL/SPring-8 におけるビーム診断システムの建設状況”, 本 Proceedings, WELH06
- [3] 井上忍, 他, “XFEL に向けたスクリーンモニター試作機”, 第 5 回加速器学会年会 Proceedings, pp. 545-547
- [4] 柳田健一, 他, “XFEL 用スクリーンモニタの空間分解能”, 第 6 回加速器学会年会 Proceedings, pp. 448-451
- [5] 井上忍, 他, “X 線自由電子レーザー計画におけるビームモニターシステム制御装置”, 第 6 回加速器学会年会 Proceedings, pp. 313-316
- [6] R. Tanaka, et al., “The first operation of control system at the Spring-8 storage ring”, Proceeding of ICALEPCS'97, Beijing, China, 1997, p. 1
- [7] <http://www.fdsnet.co.jp/?index=products&index2=xmate>
- [8] <http://www.wxpython.org/>
- [9] <http://www.pythonware.com/products/pil/>
- [10] <http://numpy.scipy.org/>
- [11] <http://wxformbuilder.org/>
- [12] 井上忍, 他, “SCSS 試験加速器におけるビームプロファイルモニター”, 第 3 回加速器学会年会 Proceedings, pp. 324-326
- [13] M. Yamaga, et al., “Event-Synchronized Acquisition System for SPring-8 XFEL”, Proceeding of ICALEPCS'2009, Kobe, Japan, 2009