

COMMISSIONING OF BEAM PROFILE MONITOR DAQ SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8 “SACLA”

Takahiro Matsumoto ^{#,A)}, Toru Fukui ^{B)}, Naoyasu Hosoda ^{A)}, Akihiro Yamashita ^{A)}, Shinobu Inoue ^{C)}, Shinichiro Tanaka ^{C)}, Takuya Morinaga ^{C)}, Taichi Hasegawa ^{C)}, Mitsuhiro Yamaga ^{A)}, Kenichi Yanagida ^{A)}, Yuji Otake ^{B),A)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

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

^{B)} RIKEN SPRING-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

^{C)} SPRING-8 Service Co., Ltd. (SES)

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo, 679-5165

Abstract

A beam profile monitor DAQ (data acquisition) system was developed for XFEL/SPRING-8, “SACLA”. The system is composed of 49 Screen monitors (SCMs) based on OTR targets and YAG:Ce scintillators, and transverse beam shape and size is obtained down to 10 μm accuracy. The imaging system uses CCD cameras connected with Camera Link. For beam diagnostics, real time and synchronously correlated analysis of the image data is desired. We also need image data recording from multi clients due to multi-purpose usages (ex. image viewer GUI and beam emittance GUI). A DAQ system was developed with MADOCA control framework to fulfill such requirements. The image data was managed efficiently with HDF5 and MySQL. X-ray image data in the experimental area was utilized for undulator tuning by transferring the image data via socket to XFEL control room. The developed beam profile monitor DAQ system successfully operated with the demanded conditions, such as the real time and synchronous data acquisition, at beam commissioning with a 1 Hz repetition, and was useful to accomplish the lasing with a wavelength of 0.12nm.

SACLA ビームプロファイルモニター画像収集システムのコミッショニング

1. はじめに

SPRING-8 において建設されてきた X 線自由電子レーザー施設 SACLA (SPRING-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)は完成し、今年 2 月からビームコミッショニングを開始した。6 月には波長 0.12nm での XFEL 発振を達成している^[1]。SACLA は SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 方式により 0.1nm 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を目標とする。SACLA における X 線レーザーの生成では、8GeV まで加速した 3 kA ピーク電流、30fs バンチ長、1mrad 以下の低エミッタンスの電子ビームをアンジュレーター区間において、その領域で発生した自発発生光と 4 μm 程度に重ね合わせ SASE 相互作用を引き起こす必要がある^[2]。このような条件を実現するためには、ビーム診断システムを整備し、加速器の各点においてビームパラメーターを高精度で把握する必要がある。ビーム診断には、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 YAG:Ce の蛍光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) ほかを用いられる^{[3][4][5][6][7]}。

ビームプロファイルモニターは 49 の SCM から構成され、リアルタイムでビーム強度と共にビーム形状、ビームに横断方向の位置を 10 μm の精度で測定する。ビームプロファイルはビーム調整においてビーム軌道最適化、エミッタンス測定などの用途で用いられる。画像データ収集に関しては、取得した大量の画像を効率よく処理しリアルタイムでのモニターをおこなうこと、画像データ収集を同期収集系に組み込み、BPM、CT 等のデータとビームショット毎の比較を可能にすること、幅広い利用のため画像データ収集を複数クライアントから行うこと、などさまざまな要求がある。ビームコミッショニングが始まるまでにこれら多くの機能を満たすシステムを構築する必要があった。

SACLA におけるビームプロファイルモニターシステムについては昨年度の加速器学会等でも報告した^{[6][7]}。本稿では、ビームプロファイル画像収集システムに関して重点をおき、昨年度から新たに開発した項目、及び実際のビームコミッショニングにおける性能について報告する。

2. ビームプロファイルモニター画像収集システムの概要

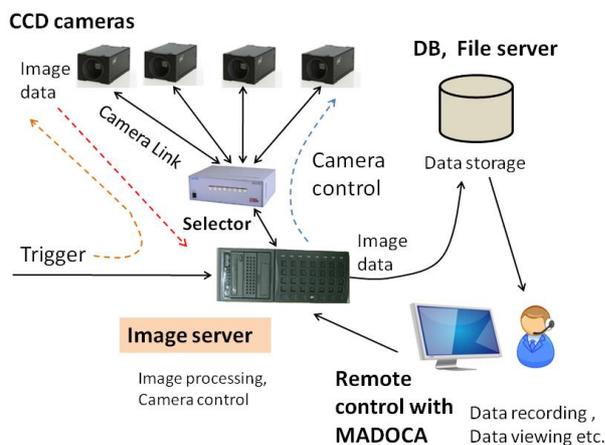


図 1: SACLA ビームプロファイルモニター画像収集システムの構成

SACLA ビームプロファイル画像収集のシステム構成について図 1 に示す。各スクリーンモニターで CCD カメラにより取得したビームプロファイル画像は Camera Link 規格 (Base configuration) を用いて画像サーバーにおいてデータ収集を行う。スクリーンモニターはビーム破壊型の測定器であるため、使用時はターゲットとなるスクリーンに該当する CCD カメラを Camera Link の Selector を用いて選択する。図 1 では 1 つの Selector が示されているが、実際には約 50 台の CCD カメラから 1 つ画像データを選別するために 11 台の Selector を用いている。CCD カメラと画像サーバー間は最大約 600m 程度の距離がある。遠距離を伝送させるため Camera Link 信号は途中光に変換した。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 60fps) と、JAI : CV-M4+CL (モノクロ 145 万画素、フレームレート 24fps) を、モニター位置により使い分けている。

Camera Link により各 CCD カメラへのトリガー配信、カメラ制御 (露光時間、ゲイン等)、及び画像データ収集を行うことができる。画像データ収集は数 Hz で行う。トリガーはビームに同期したタイミングで入力するが、画像サーバーに実装したカウンターボードを利用することでビームショット番号も計測する。カウント数のオフセット調整は他の同期収集系の VME と時間同期をとることにより行う。このことにより、取得した画像データと他の同期収集系のデータ (BPM、CT) とビームショット毎の比較が可能になる。スクリーンモニターとして利用する際は、これら画像収集の他に、スクリーン操作、レンズ調整、CCD 電源などの制御も必要になるが、これらの制御には PLC (Programmable Logic Controller) を用いている^[9]。

ビームプロファイル画像収集に関しては、昨年の加速器学会での報告後、さらに以下の開発を行い実際のビームコミッショニングに備えた。

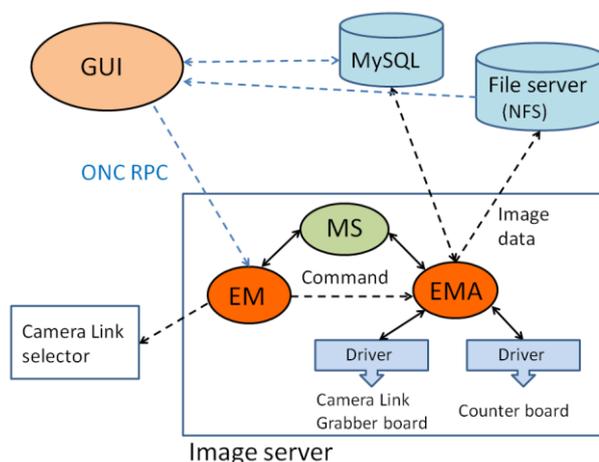


図 2: MADOCA 制御による画像収集システムのソフトウェア構成

- 複数クライアントからの画像制御を実現するため、画像データを NFS ディスク上のファイルに直接書き出す方式を採用した。これら画像データ収集は MADOCA 制御により構築した。
- 効率よく画像データを処理するため、HDF5 と MySQL を組み合わせたデータ管理システムを導入した。
- 光学ハッチにおいて収集された X 線画像データを XFEL 制御室にネットワーク転送し録画できるように対応することで、アンジュレーター調整を可能にした。

3. ビームプロファイルモニター画像収集システムの開発

3.1 MADOCA 制御による画像データ収集

図 2 に構築した画像収集システムのソフトウェア構成について記す。制御システムには MADOCA 制御フレームワークを用いた^[8]。画像サーバーのシステムには Linux / CentOS5.4 を利用している。

録画操作を遠隔で行うため、画像サーバーにおいて EM (Equipment Management) を立ち上げ、外部クライアントからの制御指令を ONC RPC (Open Network Computing Remote Procedure Call) 経由で受け付ける。Camera Link 画像入力ボード (AVALDATA APX-3312/1) とカウンターボード (Interface PEX-63201) の制御は EMA (EM Agent) が行う。録画における制御指令 (録画枚数設定、カメラ制御、録画開始など) は、GUI (Graphical User Interface) から EM に伝えられ、その後、EM から MS (Message Server) 経由で EMA に伝達され実行される。

画像録画操作の GUI の例を図 3、4 に示す。図 3 は、SCM のビームプロファイル画像を録画すると共にリアルタイムで画像を表示し、プロジェクション、ビーム位置抽出などの統計処理を行うビームブ

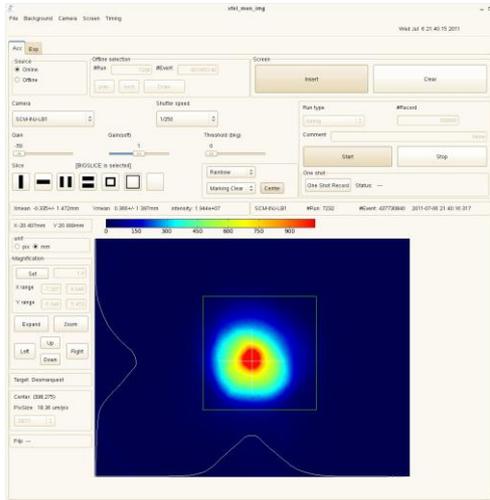


図3: 電子ビームプロフィール観測用 GUI (LBにおける電子ビームのプロフィールを示す)

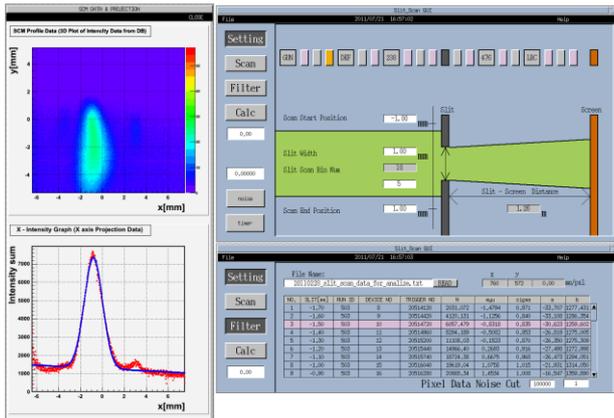


図4: ビームエミッタンス測定用 GUI

ロファイル観測専用の GUI である。図4はスリット条件をかえながら画像録画し、各測定点のデータのフィッティングを行うエミッタンス測定用の GUI である。画像録画はこのように用途がさまざまあるため複数のクライアントから実行する必要がある。

この要求を満たすため、取得した画像データを EMA が NFS ディスク上のファイルに1枚毎に書き出す方針をとった。画像データは、NFS ディスク上に直接書き出されることから、計算機間で共有を行うことができ、録画制御を単一サーバーに限ることなく複数クライアントから容易に実現することができた。

NFS ディスクに書き出す際のデメリットとしては、ファイル書き出し時の時間遅延の影響が考慮される。テストの結果、本システムで利用する画像サイズ(~1MB/枚)の場合、平均的には 10 Hz 程度での録画が可能であることがわかった。しかし、時々ネットワーク遅延のため時間的に間に合わないこともある

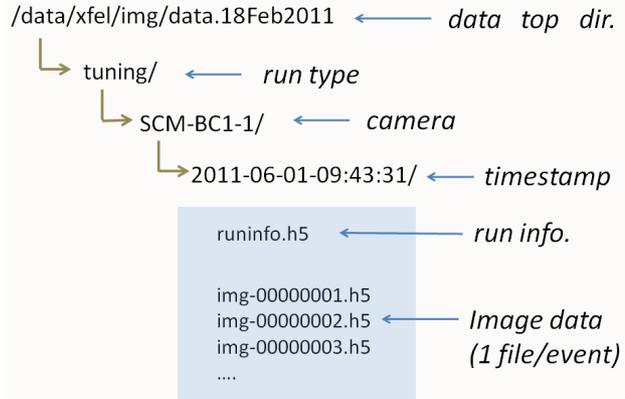


図5: 画像データのディレクトリ構造

ため、ビームコミッション開始時は 1 Hz で録画を行うことになった。

3.2 HDF5 と MySQL を用いた画像データ管理システム

本システムでは取得画像のデータフォーマットとして HDF5(Hierarchical Data Format Release 5)を採用した^[10]。HDF5 は人工衛星の画像データ解析にも利用されており、データをグループ毎に分類し階層的に扱うことや、また多次元配列を含むさまざまなデータフォーマットをあつかうことができる。ビームプロフィール画像収集では、画像データは画像サイズ、カメラ名などのメタ情報と共に扱うが、HDF5 を用いることでこれらを統一して扱うことができ管理性を向上させることができる。また、HDF5 はオープンソースのライブラリとして提供されており C や Python など豊富な API もあることから利用がしやすい。

図5に画像収集システムで録画した画像ファイルのディレクトリ構造を示す。録画ランごとにディレクトリ階層が生成され、その配下にラン情報、及び、各画像毎の HDF5 ファイルが生成される。例えば、ラン情報のファイル(runinfo.h5)ではラン番号、タイムスタンプなどの情報と共にバックグラウンドの2次元画像データなど各種データを1つの HDF5 ファイルで取り扱うことができる。

また、画像データのリアルタイムでの解析を可能にするため、ラン番号、ビームショット番号、カメラ名、画像ファイル名等の情報は MySQL のテーブルに登録し検索のため利用することにした。

ビームプロフィール画像解析では状況に応じてさまざまなパラメータ(CCD ピクセル当たりの校正後の長さ、各スクリーンで使用したターゲットの種類等)が必要になり、適宜これらパラメータを解析で利用する場合が生じる。本システムでは MySQL と HDF5 を組み合わせている。MySQL の場合、テーブル構造は運用を開始した後は変更しにくいですが、

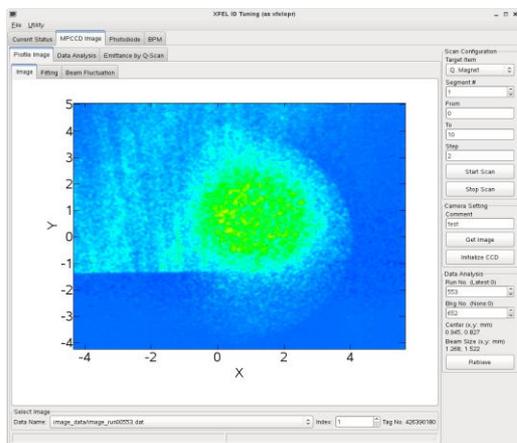


図 6: MPCCD により取得した X 線画像データ

HDF5 の場合、ファイル毎にデータ構造を自由に変えることができるため、メタ情報を適宜追加することで対応することが可能である。このように HDF5 と MySQL のそれぞれの利点を活かして解析を柔軟に遂行することができる。

3.3 MPCCD による X 線画像データのネットワーク転送による利用

アンジュレーターの調整(光軸確認、ギャップ調整など)に関しては、光学ハッチにおいて観測した X 線画像データを用いて行う。X 線の観測には MPCCD(Multi-port CCD)を用いている^[11]。

アンジュレーター調整のための制御は XFEL 制御室において行う。光学ハッチは XFEL 制御室と遠距離にあるため、光学ハッチにて別途設置した Camera Link の画像サーバーを用いて X 線画像のデータ収集を行った。画像データはリングバッファ形式で画像サーバーの shared memory 上に記録される。XFEL 制御室からの画像収集制御を可能にするため、光学ハッチの画像サーバーに対してビームショット番号を要求することで該当する画像データを socket 経由で取得できるようにした。画像収集システムの構成は図 2 のシステムで、EMA を光学ハッチの画像サーバーから socket 通信でデータ取得するように変更したのみで後は同等である。SCM の場合と同様に MADOCA を用いた制御システム、HDF5 と MySQL を用いたデータ管理システムが利用可能である。

図 6 に MPCCD により取得した X 線画像データを示す。X 線画像データを用いたアンジュレーター調整は 5 月から開始し、本システムは問題なく利用された。

4. ビームコミッショニングにおける性能、今後の改善点について

今年 2 月から開始したビームコミッショニングに

おいてビームプロファイルモニター画像収集システムは当初より順調に稼働をしている。データ収集は 1Hz で行われ、取得した画像データは効率よく処理され、リアルタイムでの画像モニター、統計処理、他同期収集系のデータ(BPM、CT 等)とのビームショット毎のデータ比較など必要な機能を実現することができた。ただ、いくつかのトラブルは発生しており今後対応が必要である。多くの Camera Link 機器を利用していることから、Camera Link 周りのトラブルがまれに発生している(同じ Selector に繋がれたカメラ画像が一斉に乱れ Selector の電源再起動が必要になるなど)。また、EMA 再起動時に、カウンターボードのドライバのオープンが失敗し EMA が起動しなくなる不具合が発生している。これらトラブルに関しては対応マニュアルを整備しビーム運転への影響が少なくなるよう配慮をおこなった。

5. まとめ

SACLA ビームプロファイルモニター画像収集システムを開発し、本システムを今年 2 月から開始したビームコミッショニングにおいて当初より順調に稼働させることができた。6 月には 0.12nm の XFEL 発振にも成功しビーム調整に大きく貢献した。本システム利用に関して大きな問題は発生していないが、カウンターボード等に関してトラブルがあり今後より安定化させるための対応を進めていく。画像録画に関しても、録画過程をマルチスレッド化することでより高速化させるなど改善をはかっていく予定である。

参考文献

- [1] 田中均,他”動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況”本プロシーディングス, MOPL01
- [2] T. Tanaka et al.,”Consideration on the BPM alignment tolerance in X-ray FELs”, Nucl. Meth. A 528, 172 (2004)
- [3] 前坂比呂和,他 “XFEL/Spring-8 “SACLA”用ビームモニタシステムの試運転と性能”, 本プロシーディングス, WEMH06
- [4] 前坂比呂和,他 “XFEL/Spring-8 “SACLA”における RF-BPM の性能評価”, 本プロシーディングス, MOPS056
- [5] 松原伸一,他 “XFEL/Spring-8”SACLA”用の高速差動 CT の特性, 本プロシーディングス, MOPS067
- [6] 松本崇博,他 “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”, 第 7 回加速器学会年会プロシーディングス, pp. 297-300
- [7] T.Matsumoto et al., “Beam profile monitoring system for XFEL/Spring-8”, Proceeding of PCAPAC’2010, Saskatoon, Canada, 2010
- [8] 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 回加速器年会プロシーディングス, pp. 545-547
- [9] 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
- [10] <http://www.hdfgroup.org/HDF5>
- [11] T. Kameshima et al., “Development status of X-ray 2D Detectors for SPing-8 XFEL”, Proceeding of IEEE Nuclear

Science Symposium N13-4, Knoxville, Tennessee USA,
2010