

## SPRING-8 ブースターリング及びビームトランスポートラインにおける カメラリンクを用いたビームプロファイルモニターシステムの構築

### CONSTRUCTION OF THE BEAM PROFILE MONITOR SYSTEM WITH CAMERALINK IN THE SPRING-8 BOOSTER RING AND BEAM TRANSPORT LINE

本井傳晃<sup>A)</sup>, 満田史織<sup>B)</sup>, 青木毅<sup>B)</sup>, 植田倉六<sup>B)</sup>, 鍛冶本和幸<sup>A)</sup>, 佐々木茂樹<sup>B)</sup>, 深見健司<sup>B)</sup>, 松本崇博<sup>B)</sup>  
Teruo Honiden<sup>A)</sup>, Chikaori Mitsuda<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Aoki<sup>B)</sup>, Souroku Ueda<sup>B)</sup>, Kazuyuki Kajimoto<sup>A)</sup>, Shigeki Sasaki<sup>B)</sup>,  
Kenji Fukami<sup>B)</sup>, Takahiro Matsumoto<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup> SPRING-8 service.,co.ltd

<sup>B)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

#### Abstract

We had measured the beam position and size in the SPRING-8 booster ring and beam transport line by the monitor system that consists of analog video camera and fluorescent plate. It was difficult to estimate the seasonal change of the beam position and beam size between user operation cycles. In order to keep the high injection efficiency to SPRING-8 storage ring, we need to achieve the tuning reproducibility of the accelerator parameter in the booster ring and beam transport line by using the quantitative data. The newly constructed beam profile monitor system consists of the digital CCD camera with external trigger synchronous capturing function, camera selectors, and server computers. Each camera system placed on the booster ring and beam transport line are managed by the UNIX server computer setup for each area. This system is connected by the cameralink configuration devices with cameralink cables or optical fiber cables. It became possible to capture image of beam profile synchronous with a beam trigger with a high resolution and a fast capturing time as same as it by using the analog video system. We will report the detail of beam profile monitor system with cameralink and the system operation.

#### 1. はじめに

SPRING-8 入射系ブースターリング、及び蓄積リングへのビームトランスポートライン(Synchrotron to Storage ring Beam Transport line、以下 SSBT)のビーム軌道、ビーム形状のデータ取得には蛍光板にアナログビデオカメラを組み合わせたビームプロファイルモニターシステムを使用してきたが、蓄積リングへの入射効率を左右するビーム通過ごとのショットバイショットのデータ取得ができないため、ビーム軌道とビームプロファイルの定量的な評価が行えなかった。特にユーザー運転サイクル間で季節的な変動による入射効率の悪化を避けるため、ブースターリングから SSBT に渡り、主として COD、入射軌道の調整が不可欠であり、限られた調整時間内にて迅速な加速器パラメータ調整を行わなければならないため、目視確認による即応的な判断と定量的な精査を同時に行い、再現性のあるパラメータ調整が必要になる。今回、トリガー同期したビームプロファイルデータ取得が可能なデジタル CCD カメラを用いた、ビームプロファイル画像取得システムの構築を行い、この画像取得システムの構築と CCD カメラ側の光学系の改修を実施したことで、上位サーバーの GUI システムより従来のアナログビデオカメラシステムと同等のリアルタイム性でビーム同期した画像取得が可能になった。

本稿では、カメラリンク形式を用いたビームプロファイルモニターシステムの概要とシステムの運用詳細について報告を行う。

# honiden@spring8.or.jp

#### 2. 画像取得システム

##### 2-1. 機器構成

ブースターリング、及び SSBT に設置されているプロファイルモニターとしては OTR モニターと蛍光板モニターの 2 種類があり、OTR モニターにはビーム位置確認用として 40mm×50mm(t=0.5mm)のデマルケスト社製(アルミナ)蛍光板と、ビーム強度、サイズ確認用として 40mm×60mm(t=0.5mm)の Al 板が組み込まれており、スクリーンの挿入位置によって切替えることが出来る。一方、蛍光板モニターには 30mm×40mm(t=1.0mm)の蛍光板が組み込まれている。ブースターリングに蛍光板モニターが 15 台、OTR モニターが 7 台設置され、SSBT エリアには蛍光板モニターが 17 台、OTR モニターが 9 台設置されている。

本システム構築前に SSBT 上の一部 OTR モニターにはビームプロファイルデータの高精度取得を目指し、OTR 板と CCD カメラを用いたカメラリンク形式によるモニターシステムの構築が試験的に進められていた。このシステムを蛍光板モニターにも拡張することで、試験運用で得られた経験を活かすとともに制御プログラムの応用、統一を行うことができた。

今回、画像取得システムの構築にあたり、加速器の立ち上げ調整時の運用目的を満たすため、従来のアナログビデオカメラを用いたシステムの利便性、即応性を損なうことなく信頼性の高いシステムとすることを課題とした。産業用モニタリングカメラ制

御規格として実績があり、理論上 2.3Gbps の高速画像伝送が可能であるカメラリンク規格 (Base Configuration) を採用し、この規格に準拠する機器を選定した。また、この規格を採用することで、カメラリンクケーブル 1 本で画像データの取得、CCD カメラの制御、画像取得タイミングを決めるトリガー送信を行うことが可能であり、多数のカメラ群を制御する上でのシステムの拡張性、制御の統一性の改善が得られた。

表 1 に SPring-8 で使用している画像取得システムの機器品目を、図 1 に機器接続図を示す。画像取得用 Unix サーバーは、カメラリンク規格を使用した SSBT 上の OTR モニターでの試験運用の際、カメラ側との通信処理に於いてハングアップする事象が見られたことから、高解像画像の高速伝送に対応するため、PCI Express Bus 規格のフレームグラバボードと画像保存のために 64GB 2.5 インチ SSD を備えている。

また、カメラリンクシステムに於いて稀にハングアップし動作しなくなる場合があるため、管理区域内に設置されている機器についてはリブート機能として管理区域外より遠隔での電源の入切をできる様電源ラインを新たに敷設した。

ブースターリング、及び SSBT の各 OTR、蛍光板モニター設置場所は広範囲に及ぶことから、その設置位置によってビーム通過と同期して画像取得を行うためのトリガー遅延量が異なる。また、カメラリンク規格によるデータ伝送距離や機器のカスケード接続の最適化を図るため、ブースターリング、及び SSBT のエリアごとに区分けを行い、CCD カメラを制御する事とした。

画像取得システムでは、ビーム通過と同期して画像取得を行う必要があるため、ブースターリングの電磁石、及び RF のパターン運転スタートシグナルをトリガーに画像取得を行っている。これを基準信号とし、ビームルートにより入射同期のためのトリガー遅延量が異なるため、ブースターリング、及び SSBT1、SSBT2 の 3 区画に分割を行い、各区画に画像取得用 Unix サーバーとタイミング調整用として DG535 を設置することでこれに対応している。

画像取得用 Unix サーバーとカメラセレクターはカメラリンクケーブル、または光ファイバーケーブル

(マルチモード) で接続されており、カメラセレクターの CCD カメラ最大制御台数は 8 台であるが、カメラセレクターをカスケード接続することで制御台数を拡張することが可能である。カメラリンクケーブルの最長データ伝送距離は 10m であるため、これを超える遠地への接続には I/O エクステンダーにより光信号へ変換することで最長 300m まで伝送可能となっており、ブースターリング、及び SSBT に設置されている OTR、及びプロファイルモニターのデジタル CCD カメラへの接続を可能にしている。

画像を撮影するデジタル CCD カメラは、モノクロ、CCD サイズ 1/2inch、解像度 130 万画素の製品を使用した。

Table 1: The list of the devices used in constructed image capturing system

Device	Product name
Unix Server for Image Caputre	SuperMicro SC-825
Image Capture Board	PCI Express Bus Cameralink I/F board APX-3312/1
Camera Selector (8ch)	STAC CLS-900A
Camera Link I/O Extender	STAC CLE-100A TX/RX
Timing Signal Delay	Stanford Research Systems DG535
Digital CCD Camera	JAI TM-1402, TM-1400

### 2-2. 機器制御、及びデータ取得制御

SPring-8 では MADOCA と呼ばれるメッセージング方式を採用し、データベース機能を内包した制御フレームワークを採用しており、この規格に準じ画像取得用 Unix サーバーには Equipment Manager(以下 EM) と呼ばれる機器制御プログラムをインストールし、デジタル CCD カメラの制御、及び画像取得を行い、取得した画像データは BMP 形式ファ

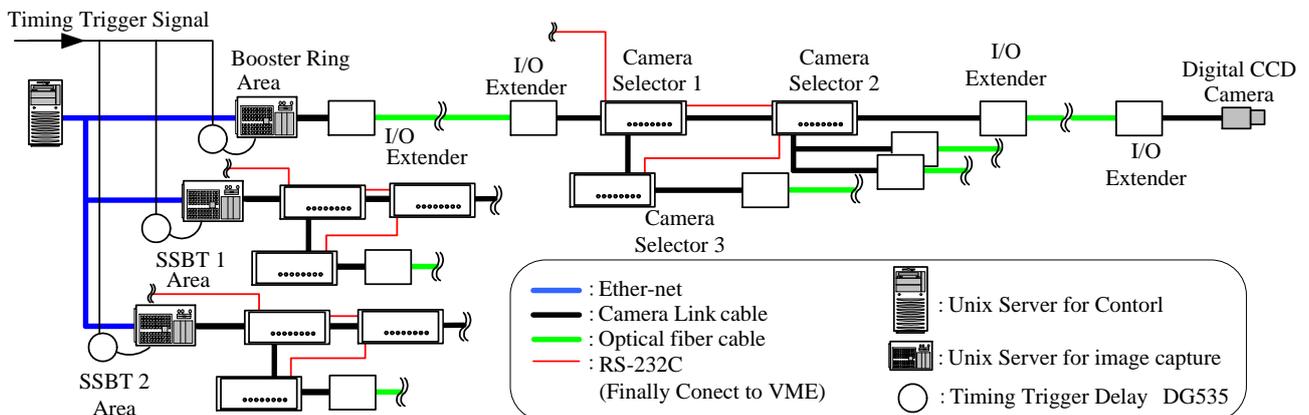


Figure 1: Schematic view of the construction image capturing system

イルと画像解析用 ASCII 形式ファイルとして保存される。

任意の OTR、または蛍光板モニターの画像を取得するためには、上位システムの GUI より画像取得用 Unix サーバー内の EM を使用し、カメラセレクトターへコマンドを送信、カメラセレクトターのチャンネルの切り替えを行い、同時に設置してあるデジタル CCD カメラの機種に合わせてカメラ設定の読み込み・初期化を行っている。

また、各 OTR、及び蛍光板モニターのスクリーンの移動、照明点灯操作については VME 経路による専用のムーバーを通じた制御を行っている。

### 3. 光学系の改修

画像取得システムを構築し、画像取得を試行したが、アナログビデオカメラからデジタル CCD カメラへ交換し、センサーサイズは変わらないものの、CCD が高解像度となり、1 ピクセルあたりの面積は減少したことで、従来から使用していた照明では光量が不足となっており、デジタル CCD カメラ側の設定変更だけでは鮮明な画像を得ることができなかった。このため、デジタル CCD カメラによる画像撮影に適した照明と設置位置の改良を行った。

改良に当たっては、チェンバーの交換などの大幅な変更を行わず、既存の設備を活かすことに努めた。

図 2 及び 3 に光学系機器設置レイアウト図を示す。ブースターリングと SSBT に設置されているプロファイルモニターの光学系機器のレイアウトは異なっており、それぞれに対処する必要があった。

ブースターリングでは、蛍光板モニター用チェンバー側面にスクリーン画像確認用ビューポートが設置されており、この画像を遮光ダクト内のミラー2枚を経由し、デジタル CCD カメラで撮影している。従来のシステムは、撮影用照明として遮光ダクト内のビューポート直近に電球(電源:DC4.8V)が 1 個設置されていたが、集光板が取り付けられていたものの、デジタル CCD カメラにとって十分な光量は得られなかったため、今回、リング型 LED 照明(外形:φ70mm-内径:φ36mm、電源:DC12V)へ置き換えた。リング型 LED 照明はドーナツ状となっており、中空部分からスクリーンの撮影が可能である。リングに取り付けられている LED はリング中心へ向かい角度をつけて配置されているため、リング型 LED 照明から 40mm~70mm の範囲で効率よく輝度が得られ、ビューポート外部からチェンバー内のスクリーンを照らすのに適している。LED 照明を導入するにあたり、照明の色の影響を確認するため青色、白色、赤色 LED を試した。同一条件で撮影した画像を確認すると青色は光量が不足し、白色、赤では鮮明な画像を得ることができた。白色と赤色照明の場合の画像を比較すると、白色の画像はコントラストが強く、赤色照明は中間色が強調される傾向が見られ、スクリーン上のビームは白く写ることから、背景と差がわかりやすい赤色 LED を使用することにした。照明を設置していた遮光ダクトはリング型 LED 照明に適した形状のものに交換した。リング型

LED 照明には調光器が接続されており、LED の長期稼働に最適な出力値に制御している。

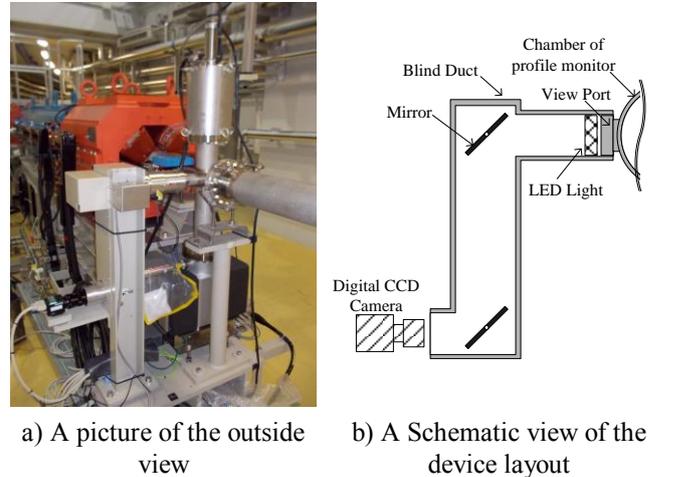


Figure 2: Beam screen monitor using demaruquest plate on booster ring

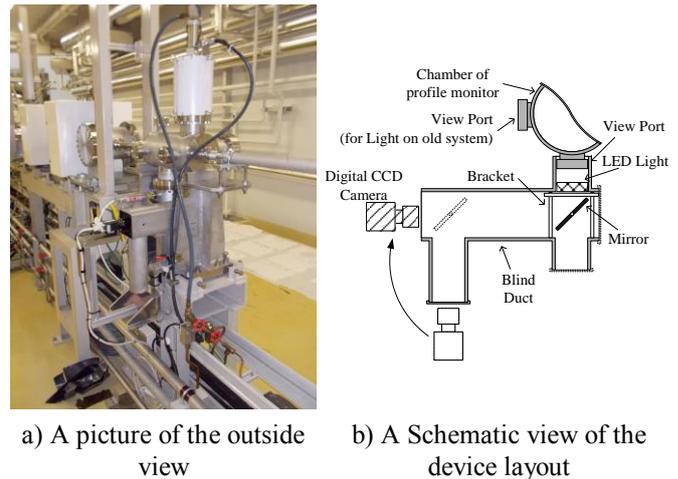


Figure 3: Beam screen monitor using demaruquest plate on SSBT

一方、SSBT に設置されている蛍光板モニターの場合、チェンバー側面に照明用ビューポートが、下面に画像撮影用のビューポートが設置されており、遮光ダクト内の 2 枚のミラーを経て CCD カメラで撮影する構造となっていた。従来の照明用ビューポートから照明でスクリーン上の光量を上げることにも試みたが、スクリーンの側面より照明を当てることになり、デジタル CCD カメラで鮮明な画像が撮影できるほどの光量を得られなかった。このため、ブースターリングの場合と同様に撮影用ビューポートの直近にリング型 LED 照明を設置することで必要な光量を確保することにした。

ビューポート直下にリング型 LED 照明を固定するには、図 4 に示すような画像撮影を妨げることがない専用のブラケットを作製することで対応した。

また、BPM を使った軌道データも取得する事が

可能なブースターリングと異なり、SSBT ラインでは軌道調整時に各スクリーンから得られるデータに依存する部分が多いことから、特に光量を増やし、撮影した画像からの解析によりビーム位置の定量化の精度を向上させるため、スクリーンの撮影面積を拡大する必要があった。このことから、遮光ダクト内のミラーを1枚撤去し、デジタル CCD カメラの設置位置の変更を行った。



a) The ring-type LED light with a bracket      b) LED light in the blind duct

Figure 4: Setup view of the ring-type LED light

#### 4. システム運用について

図 5 に示すような GUI を作成し、各機器の操作と画像取得、画像確認を一括して行っており、画像取得のシーケンスは、以下のように実施している。

1. 現場機器の操作実施  
(スクリーン挿入、照明点灯、カメラ選択)
2. ビーム通過予定時刻の数秒前に CCD カメラをトリガー待機状態にすると同時に、サーバーもカメラからの画像データの転送待ちにする。
3. ビーム通過のタイミングトリガー信号を受け、カメラが画像撮影  
(シャッタースピード 1/60sec.)
4. カメラが撮影した画像データをサーバーへ転送
5. サーバーでは画像データの受信完了後、2 次元配列数値データに展開し、これを BMP 形式画像ファイルと ASCII 形式ファイルとして保存
6. GUI では保存された ASCII 形式ファイルのデータを用いた画像解析から得られたビーム位置、サイズと画像ファイルを表示
7. 画像解析結果は別途 TXT 形式ファイルとして保存され、後に参照する事が可能

図 6 に取得画像の例を示す。今回構築した画像取得システムで撮影した画像には、スクリーン上のスケールも鮮明に撮影できており、アナログビデオにおける目視確認と定量評価を同時に行えるようになっている。スクリーンの画像とともにリング型

LED 照明も写り込んでいるが、撮影した画像データの解析時にデータ処理を行うことで対処し、ビーム位置、サイズの評価を行っている。

なお、ビーム位置、サイズの定量化を行うための画像解析手法の詳細については「SPRING-8 ブースターリング及びビームトランスポートラインにおけるビームプロファイル画像解析」<sup>1)</sup>を参照されたい。

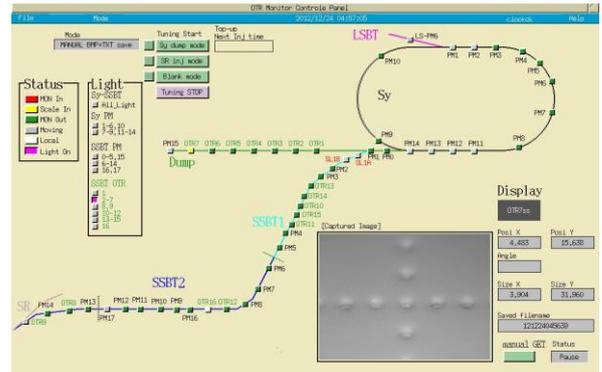
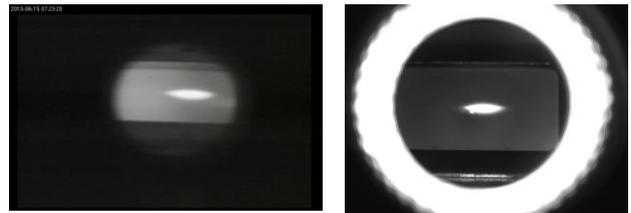


Figure 5: Operation GUI of the beam screen monitor



a) Captured image by the analog video camera system      b) Captured image by the digital CCD camera system

Figure 6: Actually captured image

#### 5. まとめ

画像データの転送速度を考慮した機器選定と光学系の最適化により、従来のアナログビデオカメラシステムと同等の応答性を持ち、視認性を維持したまま、画像解析によるビーム位置の定量化が可能な画像取得システムを構築する事が出来た。

しかし、入射軌道調整に必要なパラメータを取得するためには、各 OTR、蛍光板モニターを操作する必要があり、時間を要する。今後は画像取得シーケンスの見直しを図り、画像取得の時間短縮を進める。その上でプロファイルデータ自動取得、加速器軌道パラメータの自動補正機能の追加を予定している。

#### 参考文献

- [1] K. Kajimoto, et al., “Beam profile analysis using the CCD camera with cameralink in the SPRING-8 booster ring and beam transport line”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013