

## 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 CCD カメラを用いたビームプロファイル画像解析

### BEAM PROFILE ANALYSIS USING THE CCD CAMERA WITH CAMERALINK IN THE SPRING-8 BOOSTER RING AND BEAM TRANSPORT LINE

鍛冶本 和幸<sup>A)</sup>、満田 史織<sup>B)</sup>、青木 毅<sup>B)</sup>、植田 倉六<sup>B)</sup>、佐々木 茂樹<sup>B)</sup>、深見 健司<sup>B)</sup>

本井傳 晃央<sup>A)</sup>、松本 崇博<sup>A)</sup>、矢幡 洋<sup>A)</sup>

Kazuyuki Kajimoto<sup>A)</sup>, Chikaori Mitsuda<sup>B)</sup>, Tsuyoshi Aoki<sup>B)</sup>, Souroku Ueda<sup>B)</sup>, Shigeki Sasaki<sup>B)</sup>, Kenji Fukami<sup>B)</sup>

Teruo Honiden<sup>A)</sup>, Takahiro Matsumoto<sup>B)</sup>, Hiroshi Yahata<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>SPRING-8 Service Co., Ltd. <sup>B)</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

#### Abstract

We had measured a beam position and beam size by the analog video camera system with the fluorescence plate in the SPRING-8 booster ring and beam transport line.

It was difficult to estimate the seasonal change of the beam position and size quantitatively. We started building up the digital beam profile acquisition system which used a digital CCD camera with the external trigger synchronous capturing function in 2007. In the accelerator parameter tuning between operation cycles, it is necessary to understand the change of a beam orbit and shape from latest cycle quickly in limited tuning time. Thus, we need both information of real-time picture images for visual confirmation and computing real-time analysis results of beam position and size. In this case, the LED light for reading the scale on the fluorescence plate becomes a background noise for a calculation of the beam profile analysis. We improved the analysis program of beam position and size in order to separate the LED light and beam light from a captured image.

By this improvement, the reproducibility and adjustment accuracy of orbital steering have been improved. We will report the program flow and the details from an image capture to a beam profile analysis.

#### 1. はじめに

SPRING-8 入射系の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でのビーム軌道とビーム形状のデータ取得には、SPRING-8 建設当時からデマルケスト社製(アルミナ)蛍光板にアナログビデオカメラを組み合わせたスクリーンモニタシステムを使用し、計測していた。運転用加速器パラメータ調整においては取得したアナログビデオ画像を目視にて確認し、蛍光板上のスケールを参考にビーム中心位置、ビーム形状、サイズを割り出していた。しかしながら、この方法によるビームプロファイルの獲得は、調整者の主観に頼らざるを得ず、定量性、再現性に欠けており問題であった。また、年間を通じて定量的なデータを蓄積することができないため、蓄積リングへの入射効率を左右するビーム軌道及びビームプロファイルの再現性のある調整を確保すること、長期間の変動を調査することが困難であった。ビームプロファイルデータを定量化し精密測定を可能にするために、2007年よりビームのスクリーンモニター通過時のタイミングと同期したデジタル CCD カメラ画像取得システムの導入の検討に着手した。検討から試験運用をへて 2010 年よりカメラリンク規格によるデジタル CCD カメラによるモニターシステムの構築をすすめてきている。本件発表では、この画像取得から画像解析までの流れとその詳細について機器構成の概要とともに報告する。

#kajimoto@spring8.or.jp

#### 2. プロファイルモニターの機器構成

ブースターリングのビーム周回部、ブースターリングのビームダンプリン部、蓄積リングへのビームトランスポートライン部の3つのエリアに分け、計 50 組のビームプロファイルスクリーンと CCD デジタルカメラが設置されている。スクリーンは蛍光板が 32 台とアルミ製 OTR 板が 16 台配置されている。その他にビームスリット部に OTR モニターが 2 台ある。ビーム画像を収集するために、エリア毎にカメラリンクシステムの中継局、カメラセクタ、カメラ制御用サーバーコンピュータを設置し、中央 Linux ホストサーバーからの GUI 制御により OTR 板及び蛍光板ビームプロファイルモニターの画像取得と、VME 経由でのビームプロファイルモニターの駆動などを可能にしている。カメラと機器は各エリア内にてカメラリンクケーブルまたは、光ファイバーケーブルで接続され、エリア毎のサーバーコンピュータにはエリア内で統一された遅延時間を持つガントリガーモジュールを擁し、ビームと同期した画像取得が出来る。機器構成の詳細は参考文献[1]にゆずる。

#### 3. ビームプロファイル画像解析

##### 3.1 画像解析の目標と分解能

画像解析の分解能はカメラ位置とレンズ、カメラ分解能に左右されるが、季節変動による電源出力変

動、ビームエネルギー変動を踏まえておおよそ水平方向ビームサイズの 1%レベル、 $5\mu\text{m}$  以下を目標とした。

### 3.2 ビームプロファイル画像解析の課題

運転用加速器パラメータ調整には、調整の迅速性を確保するためここで取得された画像の目視によるビーム位置・形状の判断（蛍光板に刻印された目盛を参考にしながら行う）と画像解析による定量的なビーム位置の算出を同時にリアルタイムで行う必要があるが、蛍光板の目盛を読むためにリング状 LED 照明の点灯が必要なため、ビーム位置を算出する画像処理の過程では目視用照明の光が解析上の大きなバックグラウンドとなり、妨げになる。

### 3.3 ビームプロファイル画像解析のフロー

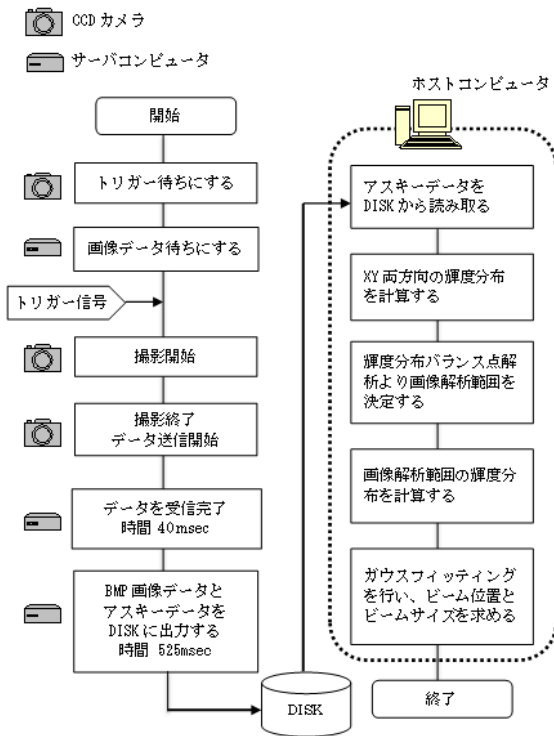


Figure 1: Data flowchart from an image capturing to image data analysis.

画像データの保存をする場合には、通常の蓄積リングへの 1Hz 入射時に対しては、0.5Hz 動作になる。データ保存をせず画像取得だけであれば 1Hz 動作を確認している。

### 3.4 ビームプロファイル画像

図 2 に示すようにビームプロファイル画像には目視測定用の照明光が含まれている。図 3 はその X 方向の輝度分布で、照明光の輝度が高く、また照明画像が全面に広がっているためビーム画像部分を輝度分布から検出することは困難である。

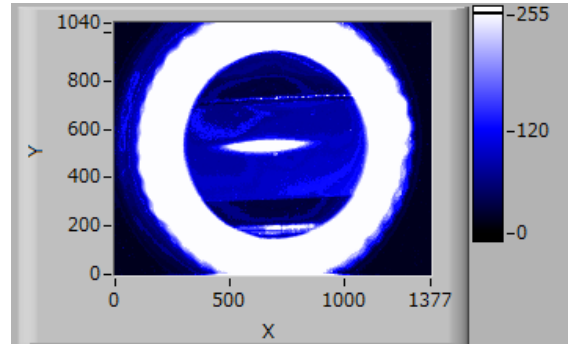


Figure 2: Actual image data captured by the desmarquest screen monitor with a light.

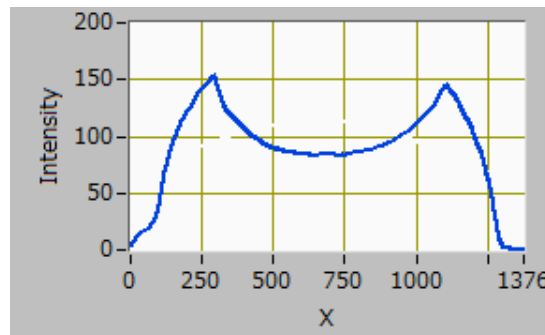


Figure 3: The intensity distribution of the light-on image data.

そこで、照明部分を除去するために、照明だけでビームが無い画像データとの差分をとることとする。差分をとった画像を図 4 に示す。これによって、照明が消去され図 5 に示すように輝度分布にはビームの形状が現れるが、照明跡のリング状の境界面にビームの輝度に比べて無視できない輝度分布の高い部分が残っている。このため、ガウス関数でフィッティングする場合に精度が落ちてしまう。また、照明の散乱光の影響は差分後も画像全面に残っている。

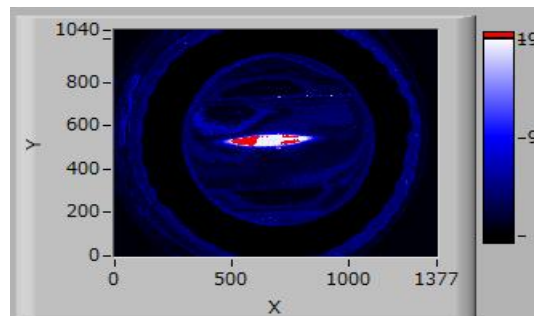


Figure 4: The differential image data between light-on and light-off image data.

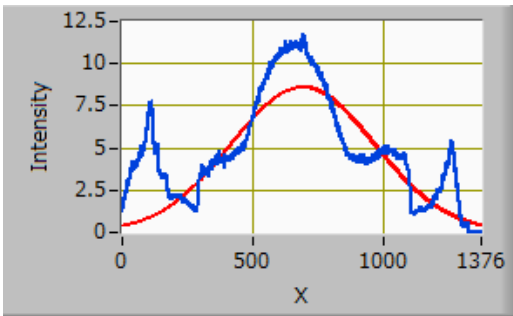


Figure 5: The intensity distribution of the differential image data on x axis.

### 3.5 ビームプロファイル画像からのビーム検出

ガウス関数でさらに精度よくフィッティングさせるために、ビーム部分の画像を最適な範囲で全体から抜き出すことで、照明跡周辺の輝度が高い部分を除去し、背景の散乱光の影響を最小にする方法を検討した。適正な画像解析の計算範囲を決める方法として、照明を消去した画像から仮のビーム中心を求め、そのビーム中心から上下左右対称に範囲を広げて、照明に妨げられないスクリーンの有効範囲の端までを適正な画像解析範囲とする事を考えた。(以後、ビーム検出法と呼ぶ) (1)式による輝度分布のバランス点(重心)に着目して、ビーム中心付近から徐々に範囲を広げて輝度分布からバランス点の計算を繰り返し、図 6 に示すバランス点の計算範囲とバランス点の関係から照明の境界面により生ずる変化を抽出する条件を探した。輝度分布のバランス点(重心)の計算式を式(1)に示す。X 方向の輝度分布で Xn 点での輝度合計を Yn とする。また、仮のビーム中心を Xp とする。バランス点の計算範囲を、Xp-m から Xp+m とする。

$$\text{バランス点 } X_b = \frac{\sum_{n=p-m}^{p+m} X_n Y_n}{\sum_{n=p-m}^{p+m} X_n} \quad (1)$$

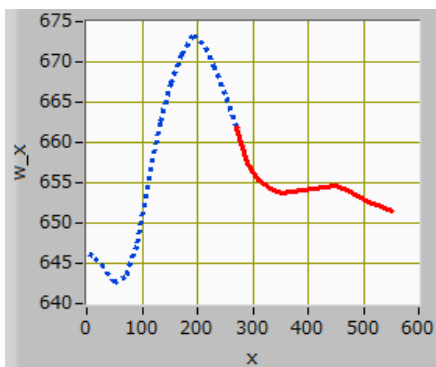


Figure 6: The data of intensity displacement point on x axis.

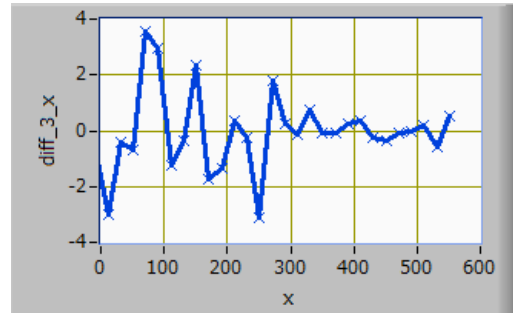


Figure 7: The third orders differential results to the upper figure.

図 6 に示す実線から破線に変化している箇所が、照明光消去跡の端部なのでその変化点の特徴を抽出する方法を検討した。図 6 の曲線を 3 階微分した図 7 のグラフで変化点の特徴を見つけることができた。その条件を満たすバランス点の変化箇所を画像解析範囲の端とした。

ここまで表示している図それぞれは LabVIEW ソフトウェアによりプロットさせたもので、ビーム画像に応じて最適な抜き取り範囲を決定するためのパラメータの最適化を、LabVIEW ソフトウェアの画像表示機能とグラフ表示機能を利用することで実現した。

### 3.6 ビーム位置及びサイズの計算

XY 両方向の画像解析範囲を決定し、その輝度分布をガウス関数でフィッティングすることで、ビーム位置とビームサイズを精度よく求めることができた。

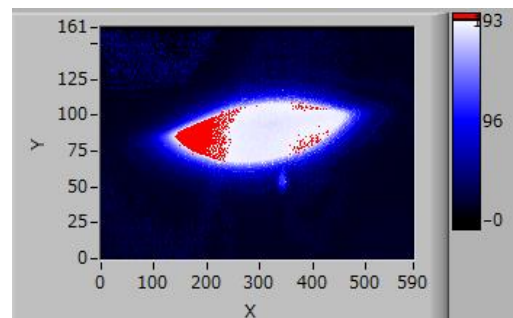


Figure 8: The image data after optimum analysis area extracting.

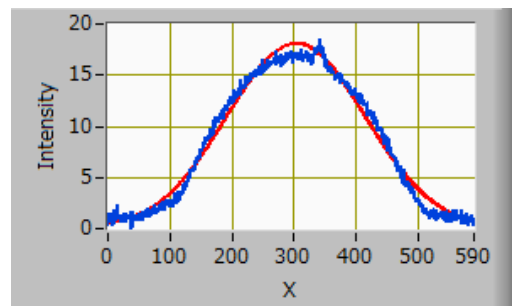


Figure 9: The intensity distribution on x axis after optimum area extracting.

### 3.7 LabVIEW を用いた計算プロセス開発の利点

LabVIEW では配列データの可視化（画像表示およびグラフ表示）がパーツの接続だけででき、また配列計算機能が充実しているため、配列データ（画像データ）の計算が主になる画像処理シーケンスの検討ツールとして最適である。画像処理シーケンスの検討を LabVIEW で繰り返し行い、その最終結果を C 言語に置換えて加速器制御プログラムに組み込む手法を採ることによってソフト開発の大幅な時間短縮ができた。特に LabVIEW の利点を発揮できた点が 2 点ある。1 点は、1 つの操作でビームがある画像とビームが無い画像との差分計算を行い、結果の画像と輝度分布のグラフを検討できることである。2 点目は、画像解析範囲をビーム中心付近から徐々に広げながら輝度分布のバランス点の変化を観察する際に、対象となる範囲の画像表示と輝度分布表示、輝度分布のバランス点の位置表示とその微分係数の変化を可視化して同時に比較しながら観察ができるので、画像解析範囲を決定するルーチンの最適化条件を探索する処理の検討が容易になることである。

### 3.8 ビーム検出法によるフィッティングの精度

1. 取得画像から照明を除いた図 4 の画像とビーム画像を切り出した図 8 の画像でガウスフィッティングの計算結果を比較する。

Table 1: The comparison of the beam parameter calculation results in the case of using optimum area extraction scheme and it in the case of not using the scheme.

|                        | Full area   | Selected area |
|------------------------|-------------|---------------|
| Image data             | Figure 4    | Figure 8      |
| Intensity distribution | Figure 5    | Figure 9      |
| Beam position X        | 693.6 pixel | 659.7 pixel   |
| Beam position Y        | 551.4 pixel | 529.6 pixel   |
| Beam size X            | 275.7 pixel | 223.8 pixel   |
| Beam size Y            | 47.4 pixel  | 33.0 pixel    |

Conversion factor x=22.4 pixel/mm y=21.8 pixel/mm

取得画像全面の輝度分布では、照明跡周辺の輝度の高い部分がビームの輝度に比べて無視できないためガウスフィッティング計算に影響し、ビーム検出法による解析とそれを用いない場合では、X 方向でのビーム中心位置に 33.9pixel(1.51mm)ずれが生じ、 $\sigma$  値の 2 倍をビームサイズ値として比較すると、ビームサイズは 51.9pixel(2.32mm)の差が生じた。ビーム検出法により解析精度が 20%以上改善された。

### 2. ガウスフィッティング計算の比較

ガウスフィッティングに利用した関数は、LabVIEW ソフトウェア上では、LabVIEW 数学関数そのまま利用したが、C 言語制御用プログラム内では GNU Scientific Library (GSL)を組み入れた。

Table 2: Comparison of Gaussian function

|                 | LabVIEW     | GSL (C)     |
|-----------------|-------------|-------------|
| Beam position X | 659.7 pixel | 656.8 pixel |
| Beam position Y | 529.6 pixel | 529.7 pixel |
| Beam size X     | 223.8 pixel | 243.6 pixel |
| Beam size Y     | 33.0 pixel  | 34.0 pixel  |

Conversion factor x=22.4 pixel/mm y=21.8 pixel/mm

両者を比較すると、X 方向でビーム中心 2.9pixel (0.12mm)、ビームサイズで 19.8pixel(0.88mm)ずれた。一方、Y 方向ではビーム中心位置、ビームサイズとも 1 pixel の範囲で一致した。目標としたビームサイズの 1%の精度に対して、計算方法により X 方向ではビーム中心位置がビームサイズの 1.2%差があり、サイズでは 8.1%の差が生じた。一方 Y 方向では、1 pixel の範囲で一致したので精度が確保できたと考える。X 方向のビームサイズの差が大きいため、目標の精度 1%には達していないが、両者の関数の計算パラメータや計算手法の違いを追求することで精度の向上をめざす予定である。

## 4. まとめ

LabVIEW ソフトウェアの機能を利用することで、最適な画像解析範囲を求めるシーケンスの試行を早く多く繰り返すことができ、シーケンスの確立が効率的に進めることができた。

さらに、その確立されたシーケンスとガウス関数フィッティングを C 言語の加速器制御ソフトの中に組み込みビーム軌道とビーム形状を測定するシステムを構築できた。これによりまだ目標の精度には達していないが、軌道調整の再現性と調整精度が改善できた。

今後は、図 10 に示す蛍光板とカメラとの位置関係により発生する画像の台形ゆがみを補正し測定精度の向上を図るとともに、ビームトランスポートでのビームの回転状態を求めることを予定している。また、アスキーデータ保存をバイナリデータ保存に変更して時間短縮を行い、1 Hz 入射に対応するシステムの構築を目指すとともに、ガウスフィッティング関数の最適化を含めた画像解析の精度向上を目指す。

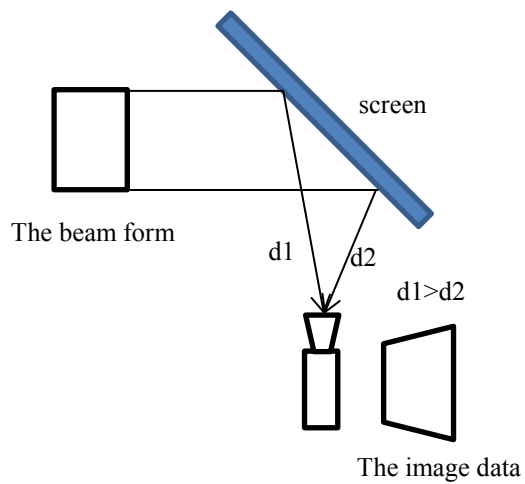


Figure 10: The image distortion by the set-up angle of the desmarquest plate.

#### 参考文献

- [1] T. Honiden. et al., Construction of the beam profile monitor system 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. 2013