

X線ピンホールカメラを用いたビームエミッタンス監視システムの構築 DEVELOPMENT OF REAL-TIME BEAM EMITTANCE OBSERVATION SYSTEM BASED ON X-RAY PINHOLE CAMERA

住友 博史^{*A)}、竹内 裕嗣^{A)}、宇野 充博^{A)}、高野 史郎^{B)}
Hiroshi Sumitomo^{*A)}, Hiroshi Takeuchi^{A)}, Mitsuhiro Uno^{A)}, Shiro Takano^{B)}

^{A)}SPring-8 Service Co.,Ltd.(SES)

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute(JASRI/SPring-8)

Abstract

A Real-time observation system based on an X-ray pinhole camera has been developed for user operation of SPring-8 to monitor the variation of beam emittance and emittance coupling ratio depending on the operation conditions of the insertion devices. The system is composed of a pinhole which makes an X-ray image of the electron beam, a camera which measures the beam image visualized by the scintillator, and a server computer which controls the camera. Acquired X-ray image of the beam is displayed in pseudo-color in real-time at the central control room. We have developed an image analysis routine which derives periodically at an interval of one second the beam size and the beam tilt. They are stored in the control database of the accelerator. The system has been operating since September 2014, and has proven to be useful not only for continuous monitoring during the user operation but also for machine start-up tuning.

1. はじめに

SPring-8では、2013年度から2.4nm-rad低エミッタンスオプティクス^[1]でのユーザー運転を開始した。輝度およびフラックス密度向上のためには、水平方向のビームエミッタンスとともに、垂直方向のビーム拡がりの水平方向の拡がりに対する比(エミッタンスカップリング比)が、重要なパラメータとなる。エミッタンスカップリング比を調整するためには、微小な垂直ビームサイズを測定可能な高分解能のモニターが必要であり、既に稼働しているX線プロファイルモニター^[2]と2次元放射光干渉計^[3]に加えて、2013年度末の点検調整期間にX線ピンホールカメラが設置された。X線ピンホールカメラは、ビームのプロファイルを観測し、ビームのサイズと傾きを測定する事が可能である。

X線ピンホールカメラを用いてユーザータイム中のビームエミッタンスとエミッタンスカップリング比の変動を常時監視するシステムを構築したので報告する。

2. システムの概要

今回新たに構築したビームエミッタンス監視システムは、電子ビームのX線像を観測するX線ピンホールカメラと、これを制御するサーバー及び制御・解析プログラムからなる。X線ピンホールカメラは、電子ビームのX線像を作るピンホール、ビームのX線像を可視化して測定するためのシンチレータとカメラから構成される。これらの機器は、全て蓄積リングのマシン収納部内の大気中に設置されている。光源となる偏向電磁石からのX線は、アルミニウムの取り出し窓を通して大気中に取り出される。光源点から、X線取り出し窓、ピンホール、シンチレータまでの距離はそれぞれ6.2m、11.4m、34.3mである。X線ピンホールカメラの主な仕様を、Table1に示す。

カメラを制御するサーバーは、蓄積リングマシン収納部の外で内周側にある保守通路に設置されており、中

Table 1: Specifications of the X-ray Pinhole Camera

Light source	Bending magnet (29B2)	
Pinhole	Distance from the light source	11.4m
	Aperture	20 μ m \times 20 μ m
Scintillator	Distance from the light source	34.3m
	Material	CdWO ₄
Camera	Basler piA2400-17gm	
	Number of pixels	2448 \times 2050
	Pixel size	3.45 μ m \times 3.45 μ m
Magnification	$\times 4$ (Pinhole: $\times 2$, Lens: $\times 2$)	
Resolution(r.m.s)	7.4 μ m	

央制御室からVNCを使ってサーバー上のカメラ制御・解析プログラムを起動する。

カメラ制御・解析プログラムは取得した画像をリアルタイムで中央制御室の大型ディスプレイ上に表示するとともに、ビーム画像を解析してビームサイズや傾きなどを求め、結果をデータベースへ保存する。データベースへ保存されたビームサイズなどのデータは、大型ディスプレイで起動している別のプログラムが2次元干渉計のデータとともにトレンドグラフに表示し、ビームエミッタンスやエミッタンスカップリング比の変化を直ちに知る事が出来る。

ビーム像を測定するカメラはBasler社製のGigabit Ethernetカメラ(piA2400-17gm)を使用している。このカメラは、メーカーが提供するC++もしくはC#で記述されたAPIを用いて制御する事ができる。カメラを制御するサーバーはDell PowerEdge T110 IIで、OSは64bitのSuse Linux Enterprise Server 11を使用している。開発用のフレームワークとしてSPring-8で使用実績のあるQtを使用し、C++を用いてカメラ制御・解析プログラムを作成した。

*sumitomo@spring8.or.jp

3. カメラ制御・解析プログラム

以下の機能をもった、カメラ制御・解析プログラム等を作成した。

- 中央制御室にリアルタイムでビーム像を表示する
- ゲインや露光時間等、カメラの設定変更ができる
- 画像解析を行い、ビームサイズや傾きを求める
- 画像解析の結果をデータベースへ保存する
- トレンドグラフにてビームサイズや傾きの変化を表示する

作成したカメラ制御・解析プログラムのパネルを Figure 1 に、トレンドグラフを Figure 2 示す。

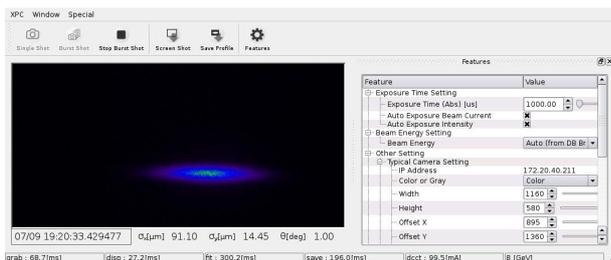


Figure 1: The display panel of the camera control and analysis program.

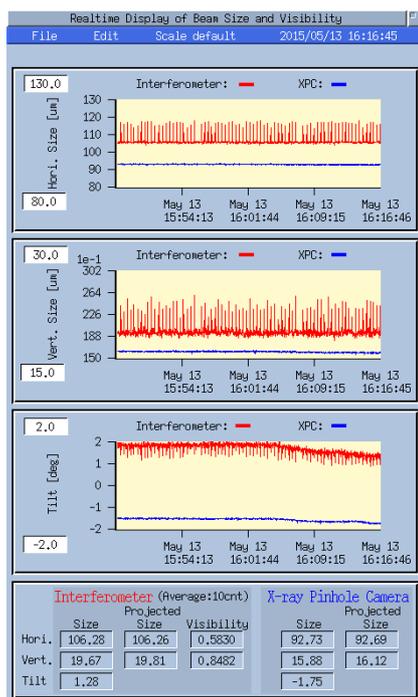


Figure 2: The display panel of the time series plots for the X-ray pinhole camera(Blue) and the 2D-interferometer(Red).

カメラから読み出す画像サイズは、最大で 2448×2050 が可能であるが、データの転送を高速で行うためにビーム像のない不必要な領域を省いた水平方向 1mm× 垂直方向 0.5mm に相当する 1160×580 に設定した。プログラムがカメラに最新画像を要求し、ウィンドウ上に表示

するまで 60msec 程度要する。この周期で画像の更新を行い、リアルタイムのビーム像として表示している。カメラから取得する画像データはモノクロデータだが、強度に対応する RGB のデータに変換する事で疑似カラー表示し、輝度分布を視覚的にわかりやすくした。

測定用カメラから取得されるビーム像の輝度は蓄積ビーム電流やビームサイズに応じて変動する。最適な輝度でビーム像を表示するため、プログラムからカメラのゲインや露光時間をマニュアルで設定できるようにした。

蓄積リングへのビーム入射中やビーム調整中などは、ビーム像の輝度が大きく変わるため、逐次露光時間の調整が必要となる。そこで、プログラムに自動露光時間調整機能を持たせた。この自動調整は、まず蓄積ビーム電流に応じた露光時間調整を行い、その後、ビーム像の輝度に応じた露光時間調整を行う。蓄積ビーム電流に応じた露光時間調整は、むやみに露光時間を変える事がないように、蓄積ビーム電流の変化、約 10 % 毎に露光時間の設定が変わるようにした。ビーム像の輝度に応じた露光時間調整は、後述の画像解析結果を反映し、輝度が設定した下限値以下の場合には露光時間を 2 倍に、上限値以上の場合には露光時間を 1/2 にし、最適な露光時間となるまでこれを繰り返す。

カメラ制御・解析プログラムは、カメラから取得した画像をリアルタイム表示すると同時に、1 秒周期のビーム画像解析ルーチンを走らせる。ビーム画像解析ルーチンは、ビーム像に対して傾きを持った 2 次元のガウス分布をあてはめ、ビームサイズや傾きを求める。具体的には以下の式でフィッティングした。

$$P(x, y) = N \exp\left(-\frac{X_c^2 + Y_s^2}{2\sigma_x^2} - \frac{-X_s^2 + Y_c^2}{2\sigma_y^2}\right) + B(x, y)$$

$$X_c = (x - \mu_x) \cos\theta$$

$$X_s = (x - \mu_x) \sin\theta$$

$$Y_c = (y - \mu_y) \cos\theta$$

$$Y_s = (y - \mu_y) \sin\theta$$

$$B(x, y) = B_x x + B_y y + B$$

ここで、 N はピーク輝度、 μ_x と μ_y は水平方向と垂直方向のビーム位置、 σ_x と σ_y は長軸と短軸に沿ったビームサイズ、 θ はビームの傾きであり、 $B(x, y)$ はバックグラウンドを模している。

通常、画像サイズは 1160×580 でカメラから読み出しを行なっているが、1160×580 の配列データに対する反復計算は比較的多くの時間を要する。解析処理時間の短縮のため、以下の工夫をした。

- 2 次元フィッティングの初期値の最適化
短い計算時間で解を求めることは、いかに反復計算の回数を減らせるかという問題に帰着する。これにはフィッティングに用いる各パラメータの初期値が大きく関わり、適切な初期値を与える事が重要である。カメラから取得されるビーム画像がどのような画像であろうと、短い計算時間で安定に解を得る事が出来るよう、初期値を 1 次元化したビームプロファイルから求めることとした。まず 2 次元の画像を長軸、短軸方向に射影し、1 次元

のプロファイルを作成し、その両端のバックグラウンドの領域を1次関数でフィッティングする。1次元化したビームプロファイルから1次関数でフィットしたバックグラウンドを引いたものは1次元のガウス分布で近似される。この対数を取り、2次関数をフィッティングして得られた値から、2次元のガウス分布のフィッティング・パラメータであるサイズ σ_x , σ_y やポジション μ_x , μ_y の初期値を決定した。その他、 N の初期値は2次元画像の最大輝度、 θ の初期値はゼロとし、 $B(x, y)$ の初期値は各方向の1次元プロファイルのバックグラウンドをフィットした1次関数の係数から換算した。

こうした初期値の最適化によって、2次元フィッティングは3~4回程度の反復計算で必要な精度に収束する。

- ROI の再定義
1次元ビームプロファイルのフィッティングから得られたビームの中心位置とサイズから、2次元のガウス分布フィッティングに使う解析範囲 (ROI) を制限する。ビーム中心から、GUI が指定する範囲のみを2次元フィッティングに用いるようにした。通常、解析範囲は、ビーム中心から 5σ 以内としている。
- 並列処理化
マルチスレッドを用いて反復計算を行い、解析速度を上げた。スレッド数は最も計算時間が短くなった4スレッドとした。
- 三角関数の使用回数の最小化
反復計算における計算量を減らすため、三角関数の使用回数が最小となるよう、フィッティングに使う式を最適化した。

これらの工夫の結果、解析に要する時間は300~400msec程度となっている。

4. X線ピンホールカメラを用いたエミッタンス監視

ユーザー運転中は、このシステムを使ってエミッタンスやエミッタンスカップリング比の監視を行なっている。ビームのサイズや傾きの変動が検出された場合、挿入光源 (ID) の磁極ギャップ等のデータとの相関を調べることで、変動の原因となったIDが特定され、近傍のスキュー4極電磁石を用いてエミッタンスカップリング比を補正することが可能となる。

一例として、Figure 3に、X線ピンホールカメラで観測されたID25の磁極ギャップ変更時のビームの傾きの変化を示す。ID25は、2台のヘリカルアンジュレーターで構成されるツインヘリカルアンジュレーターであり、各々が右回りと左回りの円偏光軟X線を生成している。このヘリカルアンジュレーターの誤差磁場がもたらしたスキュー4極成分の変化がエミッタンスカップリング比を変化させたと考えられる。また、Figure 4にエミッタンスカップリング比をスキュー4極電磁石を使って補正した時の垂直ビームサイズの変化を示す。

このようにX線ピンホールカメラを用いたビーム監視システムはユーザー運転中のエミッタンスカップリング比等の常時監視に有用であるが、加速器立ち上げ時に

行うビーム調整や、ユーザー運転中のエミッタンスカップリング比の増大が観測された場合の調整等においても、必要不可欠なモニターとして活用されている。

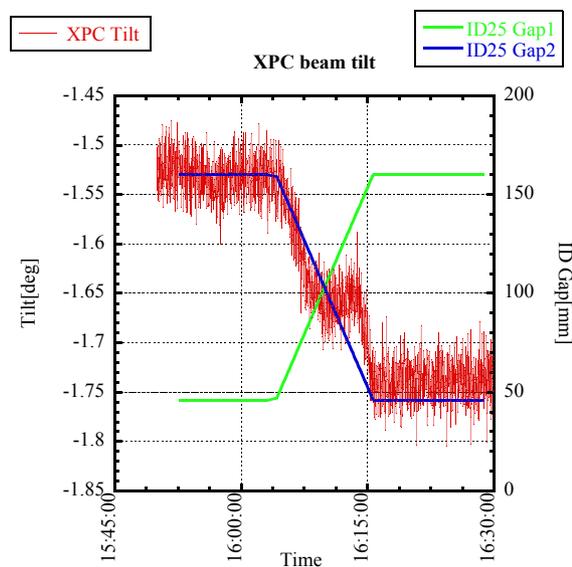


Figure 3: An example of time variation of the beam tilt angle observed by the X-ray pinhole camera depending on the magnet gaps of ID25.

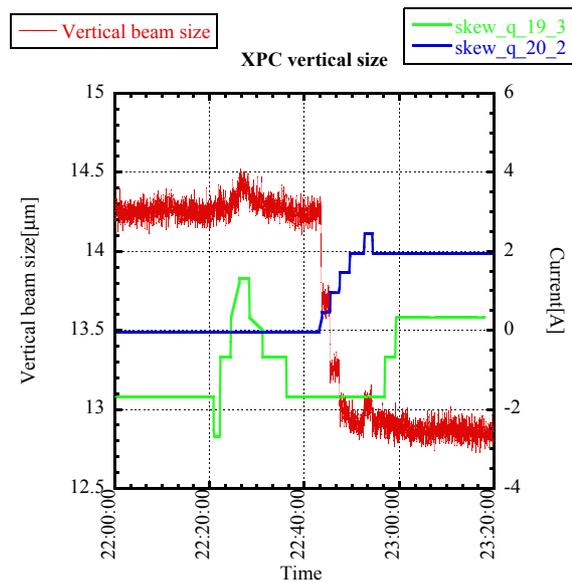


Figure 4: An example of observed variation of the vertical beam size during emittance-coupling correction by the skew quadrupole magnets.

参考文献

- [1] Y.Shimosaki et al.: Proc. of IPAC2013, MOPEA027 133.
- [2] S.Takano, et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 556, p. 357 (2006).
- [3] M.Masaki, et al.: J. Synchrotron Rad., 10, p.295 (2003).