

# SPRING-8 線型加速器プロファイルモニタ画像システムの更新 UPDATE OF THE IMAGE SYSTEM USED FOR BEAM PROFILE MONITORING IN THE SPRING-8 LINAC

竹中寿行 \*<sup>A)</sup>、鍛冶本和幸 <sup>A)</sup>、柳田謙一 <sup>B)</sup>、馬込保 <sup>B)</sup>、出羽英紀 <sup>B)</sup>、  
清道明男 <sup>B)</sup>、増田剛正 <sup>B)</sup>、石塚規友紀 <sup>B)</sup>、鈴木伸介 <sup>B)</sup>

Toshiyuki Takenaka\*<sup>A)</sup>, Kazuyuki Kajimoto<sup>A)</sup>, Kenichi Yanagida<sup>B)</sup>, Tamotsu Magome<sup>B)</sup>, Hideki Dewa<sup>B)</sup>,  
Akio Kiyomichi<sup>B)</sup>, Takemasa Masuda<sup>B)</sup>, Miyuki Ishizuka<sup>B)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>SPRING-8 Service Co. Ltd

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

## Abstract

The image system used for beam profile monitoring in the SPRING-8 linear accelerator was upgraded for improvements in camera control, image processing, graphical user interface and image transferring along with the replacement of old analog cameras with NTSC (National Television System Committee) interface. Charge-coupled device cameras with Cameralink interface were adopted for digital image transferring. A MicroTCA (Telecommunications Computing Architecture)-based image processing unit was designed and equipped following the systems of the two-dimensional synchrotron radiation interferometer and the optical transition radiation monitor at the SPRING-8 storage ring. A graphical user interface was developed for camera control, displaying and analyzing image signals. All softwares have been working on the MADOCA II (Message And Database Oriented Control Architecture II) control framework.

## 1. はじめに

SPRING-8 線型加速器に於いて、ビームの形状やサイズ (広がり) を測定するためにビームプロファイルモニタを使用している。1996 年の線型加速器建設時や 1998 年の NewSUBARU 方向へビームを輸送する L4 ビーム輸送系建設時は、プロファイルモニタカメラに非同期の CCD カメラ (NTSC 規格) を導入した。

しかし、非同期ではビーム形状の定量的な観測が困難であるため、1999 年頃に線型加速器上流部やシンクロトロン方向へビームを輸送する LS ビーム輸送系及び L4 ビーム輸送系のプロファイルモニタカメラを、外部トリガに同期するシャッターカメラ (竹中システム社製 FC300M[1]、NTSC 規格) に交換した (Fig. 1 参照)。

昨年度、これら 15 年以上使用して老朽化したシャッターカメラを更新するにあたり、アナログ信号転送 (NTSC 規格) からデジタル信号転送 (カメラリンク規格) へ画像システムを移行する事とした。

カメラリンク規格カメラを採用した理由は、SACLA のスクリーンモニタ [2] や蓄積リングの二次元放射光干渉計 [3]、入射部 OTR モニタにて、安定的に使用されている実績があるからである。

画像システムを移行する目的は、線型加速器で混在している画像システムの管理を統一する事である。

現在、線型加速器 1GeV シケイン直後に於いて、エミッタンスを測定する目的で設置された OTR (Optical Transition Radiation) モニタの画像を処理する画像処理装置 [1] や、L3 ビーム輸送系 (Fig. 1 参照) に於いて、Bunch-by-Bunch 入射キッカーの性能を評価する目的で設置されたプロファイルモニタの画像を処理する画像処理装置が存在している。これらの異なる仕様の画像処理装置は運用する上で維持管理等が煩雑になる事から、今回線型加速器全体を統一した画像システムを新規に構築する事とした。

画像システムを移行する他の目的は、制御用端末からのカメラ遠隔制御を可能にする事である。これは新しい画像システムを MADOCAII (Message And Database Oriented Control Architecture II) [4] の制御フ

\* ttakenaka@spring8.or.jp

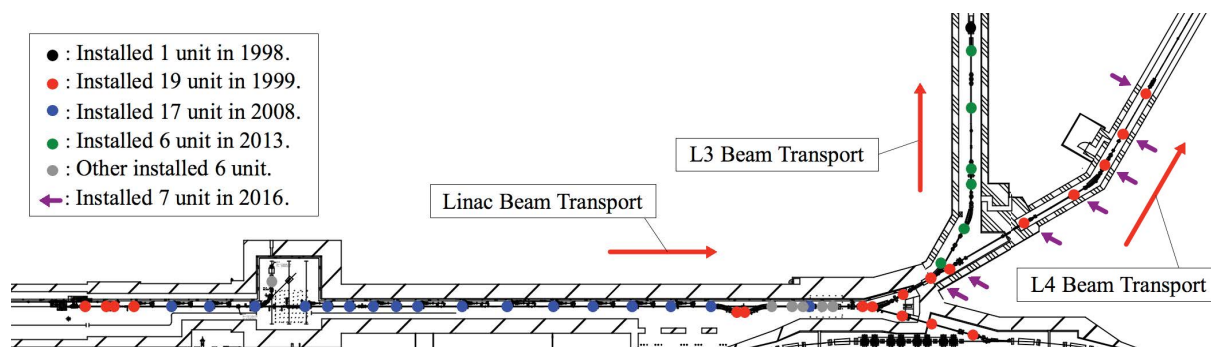


Figure 1: Location of profile monitors in the SPRING-8 linac.

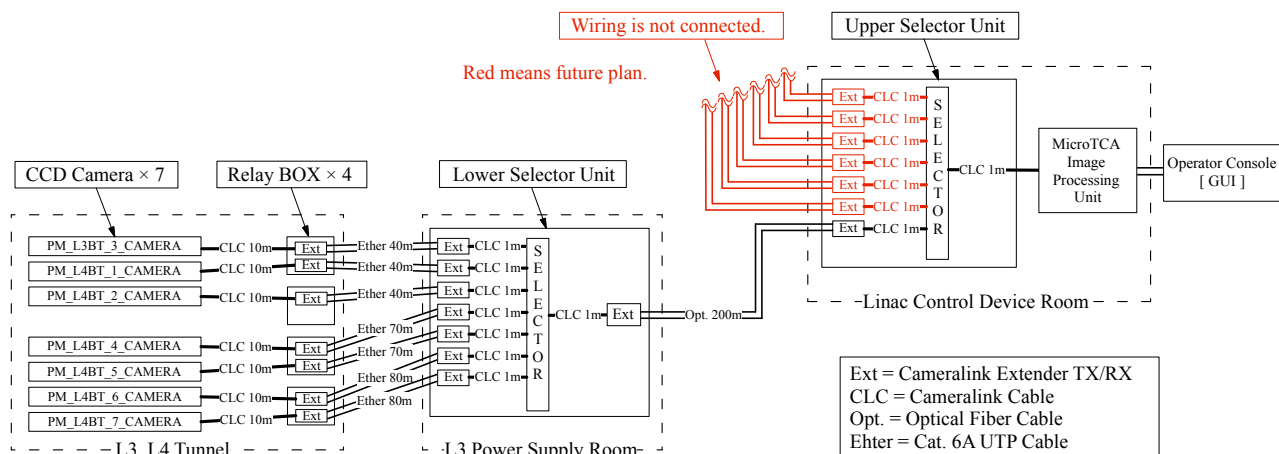


Figure 2: Connection schematic of an image processing system for linac beam profile monitor.

フレームワークに準拠させる事により、カメラの画像転送やゲイン設定、露光時間設定等が容易に行えるようになる。

MADOCALII のフレームワークに準拠させる利点は、抽象化された SVOC コマンドを使用する事により、グラフィカルユーザーインターフェース (GUI) 等の制御プログラムを容易に作成する事 [5] や、画像や波形等可変長データの転送が可能となる点である。

今回の更新では、MicroTCA 画像処理ユニット [6] を採用している。採用理由は、蓄積リングの二次元放射光干渉計や入射部 OTR モニタで安定的に使用されている実績があるからである。他の採用理由として MicroTCA 画像処理ユニット内の Cameralink FMC ボードへ外部トリガを入力する事により、全てのカメラに対してトリガを分配する事ができるからである。これを利用する事により、個々のカメラへのトリガケーブルの配線が不要となる。

本報告では、更新したカメラ及びカメラリンク機器の構成や、MicroTCA 画像処理ユニットの構成及び作成した GUI の機能等について報告する。

## 2. カメラ及びカメラリンク機器

今回のシステム更新で採用されたカメラは、SACLA のスクリーンモニタで安定的に運用されているプログレッシブスキャンシャッターカメラ (Jai 社製 CV-A10CL) を採用した。このカメラの主な仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specification of the Cameralink Camera

Type	Jai, CV-A10CL
Number of pixels	768 px × 576 px
Pixel size	8.3 μm × 8.3 μm
Tone	10 bit grayscale
Dimensions (H×W×D)	35 mm × 44 mm × 80 mm
Frame rate	60 fps

カメラリンク関連の機器接続系統図を Fig. 2 に示す。カメラリンク関連機器はカメラ、中継ボックス、上位

セクタユニット、下位セクタユニット、MicroTCA 画像処理ユニット、カメラリンクケーブル、カテゴリ 6A UTP ケーブル及び光ファイバーケーブルから成る。

Figure 2 は、今回の更新で機器の設置及び配線の接続を実施した箇所であり、赤色部は未設置箇所である。この未設置箇所は、平成 28 年度以降に設置を予定している。

L3 及び L4 トンネル内設置のカメラから出された映像信号は、カメラリンクケーブルを経由してトンネル内の中継ボックス (Fig. 3 参照) へ入る。中継ボックス内には、カメラリンク延長器送信機 (スタック社製 CLE-300LC TX) が設置されている。

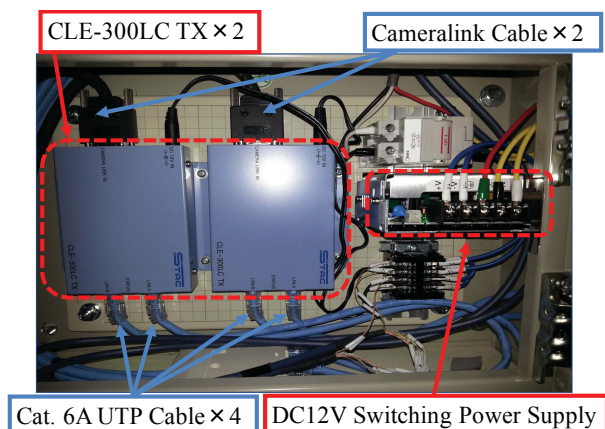


Figure 3: Inside of the relay box.

カメラリンク延長器は中間媒体 (UTP ケーブル、光ファイバーケーブル等) を介して送信機 (TX) から受信機 (RX) へ画像データを転送する装置である。

CLE-300LC TX に入力された映像信号は、カテゴリ 6A UTP ケーブルを介して L3 電源室の下位セクタユニット (Fig. 4 参照) 内のカメラリンク延長器受信機 (スタック社製 CLE-300LC RX) へ送られる。

中継ボックスをトンネル内に設置した理由は、カメラへ接続するカメラリンクケーブルのケーブル長

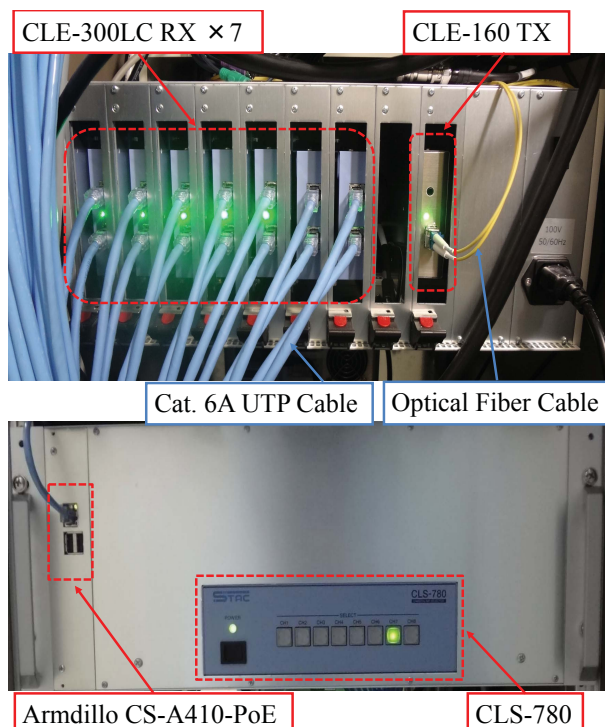


Figure 4: The back and front view of the lower selector unit in the L3 power supply room.

が最長 10m であるためトンネル外へ配線する事ができないからである。また中継ボックスを設置したトンネル内は、放射線の線量が高いので中継ボックスは厚さ 1.6mm の鉄箱とし、必要に応じて鉛シートで追加の遮蔽を施せるようにしている。

中継ボックス内には、DC12V を発生させるスイッチング電源が設置されており、CLE-300LC TX×2 台及びカメラ 2 台へ電力供給を行っている。このスイッチング電源は、L3 電源室の電源（高砂製作所社製 IPPower IP-P/8）から AC100V を給電され DC12V に変換している。

IPPower IP-P/8 の設置目的は、ネットワーク経由により遠隔でスイッチング電源を OFF/ON 制御する事である。遠隔で OFF/ON 制御する理由は、ハンガアップ等の問題発生時に制御用端末から CLE-300LC TX 及びカメラを再起動するためである。

UTP ケーブルは CLE-300LC TX から RX までの中間媒体として使用されており、ケーブル長は最長で 60m までとされている。しかしながら今回は高周波特性の良いカテゴリ 6A UTP ケーブルを使用しているため、60m を超えて 80m 弱までケーブル長を延長して使用している。

L3 電源室の下位セクタユニット内には、CLE-300LC RX が 7 台（最大 8 台）格納されている。この 7 台の出力はカメラリンクセクタ（スタック社製 CLS-780、8 入力 1 出力）へ接続され、CLS-780 によっていずれか 1 つのチャンネルが選択される（Fig. 4 参照）。

上位及び下位セクタユニット内には組み込みボードコンピュータ（コアスタッフ社製 Armdillo CS-A410-

PoE）が内蔵されている。Armdillo CS-A410-PoE は、ネットワーク経由により遠隔で指令を受け、CLS-780 の接続先の切替制御やステータス情報の読み出しを行う。

CLS-780 によって選択された映像信号は、同下位セクタユニット内のカメラリンク延長器送信機（スタック社製 CLE-160 TX）へ入力され、映像信号を光ファイバーケーブルを介して制御機器室の上位セクタユニット内のカメラリンク延長器受信機（スタック社製 CLE-160 RX）へ送る。

上位セクタユニットは下位セクタユニットと同じ構造であり、CLS-780 の出力は MicroTCA 画像処理ユニット（Fig. 5 参照）へ入り、そこからネットワークスイッチを経由して制御用端末へ接続される。

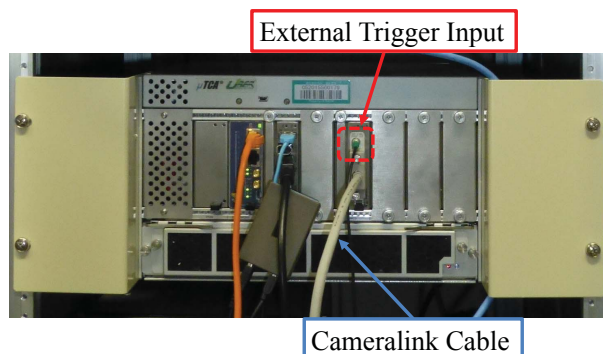


Figure 5: Picture of MicroTCA image processing unit installed in the linac control device room.

上位及び下位セクタユニットを二段のツリー状に接続する事によって最大 64 台までのカメラを切り替える事が可能である。現状では 7 台のカメラを切り替えるのみであるが、将来的には下位セクタユニットを追加して 49 台のカメラを切り替える予定である。

### 3. MicroTCA 画像処理ユニット

MicroTCA 画像処理ユニットの構成を Fig. 6 に示す。

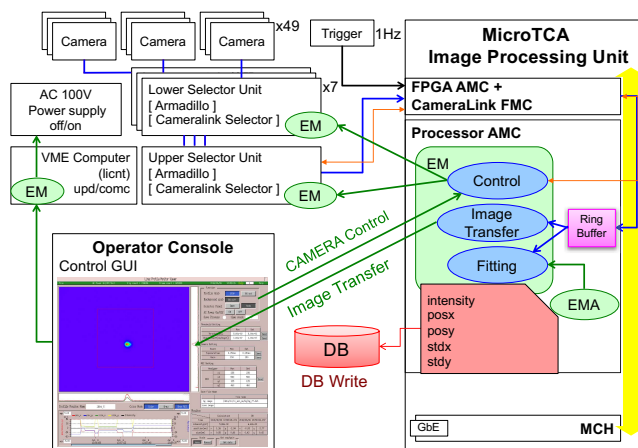


Figure 6: Schematic diagram of the image processing unit.

MicroTCA 画像処理ユニットは、Cameralink FMC (FPGA Mezzanine Card) と FMC スロット付き FPGA AMC (Advance Mezzanine Card) を組み合わせた Cameralink FMC 用の FPGA IP コア及びプロセッサ AMC から成り、OS は CentOS である。

プロセッサ AMC 内では、フロントエンド制御プログラムである EM (Equipment Manager) が動作し制御を行っている。この EM は上位及び下位セクタユニットの切替制御を独占的に管理する事により、接続されているカメラ ID の監視を行う。具体的にカメラ ID は、上位セクタユニットの接続先チャンネルナンバー (1~8) 及び下位セクタユニットの接続先チャンネルナンバー (1~8) の 2 つの数字を組み合わせでカメラ ID (75 等) としている。

カメラ ID によって接続されているカメラの個別属性 (プロパティ) が得られる。それは使用すべきバックグラウンド画像データ、カメラゲイン、露光時間、ROI (Region of Interest)、スクリーンの中心位置 (ピクセル数)、ピクセル当たりの長さ、光強度 1 デジット当たりの電荷量等の情報である。

以下に MicroTCA 画像処理ユニット内で動作する EM の機能について説明する。

- 上位及び下位セクタユニットを独占的に切替制御する。
- 外部トリガのタイミングで取得した画像データをリングバッファに蓄え、制御用端末上で動作する制御プログラム (GUI 等) からの指令を受けて最新の画像データを返送する。
- Cameralink FMC を経由して、カメラに対するカメラゲインや露光時間の設定を行う。
- フロントエンド制御プログラムである EMA (Equipment Manager Agent) がバックグラウンドを差し引いた画像データに於いて、ROI 内の光強度 (Digit) × 電荷係数 (Charge Coefficient) を計算し、これが閾値を超えた場合に EM へ解析実行のイベントトリガを発行する。
- EM は EMA が発行するイベントトリガに反応して、バックグラウンドを差し引いた画像データの ROI 内に於いて、ビーム位置や広がり (標準偏差) 及び電荷量を計算しデータベースへ書き込む。

以下に上位及び下位セクタユニット内の Armadillo CS-A410-PoE 上で動作する EM の機能について説明する。

- MicroTCA 画像処理ユニット内の EM が発行する SVOC コマンドを受け、CLS-780 とシリアル (RS-232C) で通信し、CLS-780 のチャンネル切替設定及びステータスマニタを行う。

以下に制御機器室の VME コンピュータ (licnt) 上で動作する EM の機能について説明する。

- UPD (Universal Pseudo Device) 経由で IPPower IP-P/8 の OFF/ON 設定及びステータスマニタを行う。IPPower IP-P/8 の通信プロトコルは TCP/IP のソケット通信で、EM では MADOCA 用に開発

された ComC (Communication Client) のプログラムを介して制御を行う。

## 4. グラフィカルユーザインタフェース

### 4.1 GUI の構成

GUI (Fig. 7 参照) は、生画像データ及びバックグラウンド差し引き画像データの表示、一次元へ射影した水平・垂直方向の光強度分布図の表示、バックグラウンド画像データの取得、カメラ切替、画像解析開始の閾値設定、カメラのゲインや露光時間設定、ROI の設定、画像データ解析及びその解析結果をトレンドグラフに表示する等の機能がある。

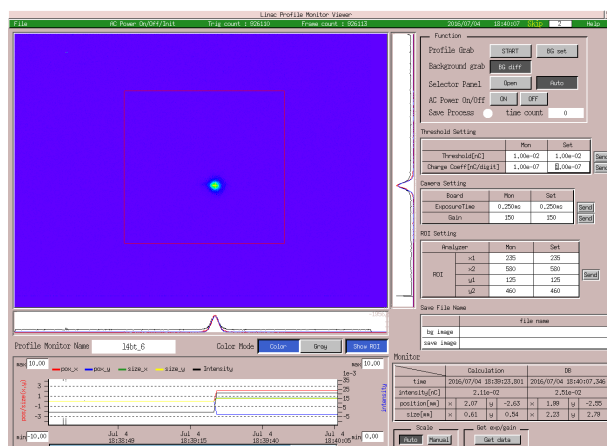


Figure 7: Graphical user interface on operator console.

GUI の作成は、GUI 構築ツール X-Mate を用いて C 言語でプログラミングを行っている。X-Mate を使用する理由は、SPring-8 の加速器制御用インターフェースに多く使用されており C 言語によるプログラミングが容易であるからである。

### 4.2 GUI の機能

以下に GUI の機能について説明する。

- 使用するカメラの画素数は最大でも、SVGA (800 px × 600 px) のフレームサイズとする。今回使用するカメラの画素数は、768 px × 576 px であり表示に使われない外側の領域は非表示にしている。このフレームサイズ (768 px × 576 px) に固定しない理由は、今後残り 42 台のカメラ更新時に異なる画素数のカメラを設置する可能性があるからである。
- バックグラウンド画像データは、カメラごとに設定したディレクトリへ保存し、カメラの切り替え時に指定されたバックグラウンド画像データを読み込み画像解析に使用している。
- 画像データの表示は、生画像データ及びバックグラウンド差し引き画像データの 2 種類が選べ、階調は 8 ビットのグレースケール若しくは、RGB データに変換した疑似カラーが選べる。疑似カラーを使用する理由は、ビーム輝度が飽和している事を容易に確認するためである。

- カメラゲインは、-3 dB ~ +12 dB の設定幅があり、カメラに対して -50 ~ +150 の整数設定値をカメラへ送信する。
- 露光時間は、+3.3  $\mu$ s ~ +16.7 ms の設定幅があり、カメラに対して 15 段階 (0 ~ 14) のいずれかの整数番号をカメラへ送信するが、GUI では秒単位 (1.0E-3 [s] 等) の実数設定値入力としている。これは、整数番号入力では、整数番号と実数設定値の関係が分かり難いため、入力された実数設定値を近傍の整数番号に変換して送信している。これにより、整数番号を意識する事なく操作を行う事ができる。
- ROI の設定は、プロフィールモニタのスクリーン (Fig. 8 参照) に対して事前に範囲指定を行いパラメータ保存をしている。これは ROI の設定操作時間を短縮する事と、スクリーンの範囲を明確にするためである。同様にスクリーン画像の穴の位置から、スクリーンの中心座標 (ピクセル数) と 1 ピクセルあたりの長さ (換算係数) を算出し、画像解析の計算に用いている。今回算出した換算係数は、光学系の倍率によって異なるが 1 ピクセルあたり 0.07 ~ 0.13 mm である。

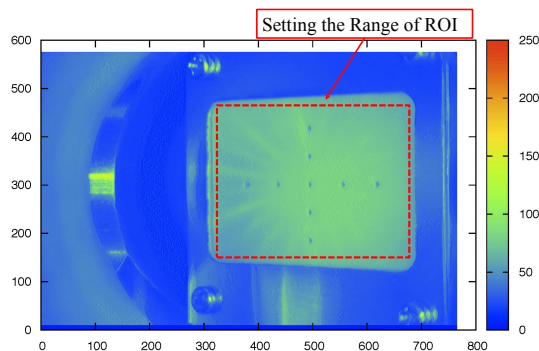


Figure 8: Range of ROI of linac profile monitor screen.

- 画像データを取得する際に発行する SVOC コマンドの発行間隔は、最短で 0.5 秒としているが、コマンド発行を任意の回数でスキップする事ができる。例えば、0 回スキップではコマンド発行間隔は 0.5 秒、1 回スキップではコマンド発行間隔は 1.0 秒、2 回スキップではコマンド発行間隔は 1.5 秒となる。

#### 4.3 GUI の画像解析

画像データの解析では、ROI 内に於いて生画像データからバックグラウンド画像データを差し引き、水平・垂直方向に射影した一次元光強度分布を作成する。この一次元光強度分布のデータから、統計処理の計算により重心及び標準偏差を求める。

これより得られた重心及び標準偏差を初期値とし、一次元光強度分布が正規分布であると仮定したフィッティングにより重心位置、標準偏差、オフセット及び光強度を求めた算出結果を GUI 上に表示している。

## 5. まとめ

従来の線型加速器プロフィールモニタは、モノクロ画像より目視でビーム位置や形状を定量的に確認していたが、今回の画像システムの移行により画像解析が可能となり重心位置及び標準偏差を求める事ができるようになった。また制御用端末よりカメラのゲイン、露光時間等を調整する事やデータベースへビーム情報を書き込む事が可能となった。これにより今後のビーム調整に対して、時間の短縮化や高精度且つ効率的なビーム調整が期待できる。

今後の計画として線型加速器では残り 42 台のカメラ更新を予定しており、更なる機器の設置や EM、GUI の拡張修正が行われる。これに関連して GUI の問題点であるカメラの切替処理の高速化、ゲインや露光時間の調整自動化について修正を行い効率的な運用を目指す必要がある。

## 参考文献

- [1] T. Watanabe *et al.*, “Development of Emittance Monitor System at the SPring-8 Linac”, Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Wako, Aug. 2007, pp. 351-353; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj4\\_lam32/PASJ4-LAM32\(D\)/contents/PDF/WP/WP49.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32(D)/contents/PDF/WP/WP49.pdf)
- [2] T. Matsumoto *et al.*, “Beam Profile Monitoring System for XFEL/SPring-8”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Himeji, Aug. 2010, pp. 297-300; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj7/proceedings/SH\\_6AM\\_2/FRSH05.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/SH_6AM_2/FRSH05.pdf)
- [3] A. Kiyomichi *et al.*, “Development of New Control Framework MADOCA II at SPring-8”, Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Nagoya, Aug. 2013, pp. 14-17; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAOT/SAOTP4.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAOT/SAOTP4.pdf)
- [4] M. Kago *et al.*, “Implementation of MADOCA II Data Acquisition and Storage System at SPring-8”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Tsuruga, Aug. 2015, pp. 1259-1262; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP095.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP095.pdf)
- [5] H. Sumitomo *et al.*, “Development of Real-Time Beam Emittance Observation System Based on X-Ray Pin-hole Camera”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Tsuruga, Aug. 2015, pp. 1240-1242; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP090.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP090.pdf)
- [6] A. Kiyomichi *et al.*, “Improvement of MicroTCA-Based Image Processing System at SPring-8”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Tsuruga, Aug. 2015, pp. 1303-1307; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP106.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP106.pdf)