

AUTOMATIC ORBIT CORRECTION OF ELECTRON BEAM AT SACLA

Shinichiro Tanaka ^{#,A)}, Taichi Hasegawa^{A)}, Yasuyuki Tajiri^{A)}, Takuya Morinaga^{A)}, Yutaka Kano^{A)},
Ryo Yamamoto^{A)}, Toru Hara^{B)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Hitoshi Tanaka^{B)},

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

1-20-5 Kouto, Shingu, Tatsuno, Hyogo 679-5165, Japan

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 671-5148, Japan

Abstract

In order to produce a stable x-ray free electron laser (XFEL) light, drift of an electron beam orbit must be suppressed from the electron gun to the undulator line over a long period of time. We have developed automatic orbit correction systems for the XFEL facility “SACLA” at SPring-8. At the high energy accelerator section, a best correction method has been adopted. At the undulator section, an injection beam orbit is precisely fixed using two beam position monitors in order to achieve stable lasing. In this paper, we report automatic orbit correction methods at SACLA.

SACLA における電子ビーム軌道の自動補正

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron Laser) は、2011 年 4 月から X 線レーザー発振に向けたビーム調整を行い、6 月 7 日に波長 1.2Å の X 線レーザー発振を確認した。その後、加速器の安定化とレーザー出力増強に向けた調整が行なわれている^[1]。

加速器の基本構成は、低エミッタンス電子ビームを生成する電子銃、速度変調バンチングを行なう入射部及び、磁気バンチ圧縮を行なう 3 段のシケイン、8 GeV まで加速を行なう高エネルギー加速管部で構成される。また、加速器の下流には X 線レーザーを発振させる 18 台の真空封止アンジュレータとレーザーを実験棟へ導くビームラインで構成されている。

電子銃から出射された電子ビームは、エミッタンスを悪化させることなく高密度に圧縮され、長さ 100 m のアンジュレータラインに輸送されるのであるが、安定で高性能な X 線レーザーを実現するためには、常に最適な軌道に電子ビームを通すことが非常に重要である。SACLA では、入射部、高エネルギー加速管部、アンジュレータ入射部でそれぞれ区間毎に精密な軌道補正を行っている。

2. 軌道補正スキーム

入射部には、BPM が設置されていないので、スクリーンモニターにより直接ビームを観測して、軌道の

補正を行っている。入射部より下流の高エネルギー加速管部とアンジュレータラインには RF 空洞型 BPM が設置されている。特に精度が要求されるアンジュレータラインでは、隣接する四極電磁石の磁場中心と BPM の電気中心が合うように、ワイヤーアライメントによって ±50 μm の精度で据え付けられている。信号の読み出しは IQ 検出器で検波し VME 上の 12bit または 16bit A/D ボードで波形データとして取得している。試験で位置分解能は 0.2 μm と測定されている^[2]。BPM で検出した位置情報は高速同期データ収集システムで収集され、全ショットのデータがデータベース (MySQL) に蓄積される。

以下に、入射部、高エネルギー加速管部、アンジュレータ入射部の軌道補正方法について説明する。

2.1 入射部

入射部は、速度変調バンチングを行う RF 空洞、ビームを収束する磁気レンズと四極電磁石、ビームを成形するコリメータ等で構成される。RF 空洞に対しては RF 位相の変調を、磁気レンズと四極電磁石に対しては磁場強度の変調をかけて、スクリーンモニターで観測したビームプロファイルの重心が不動となるよう、軌道補正電磁石の設定を行った。設定後は、定期的にスクリーンモニターでビームを観測し、最適な位置を通過するよう手動で軌道補正を行なっている。

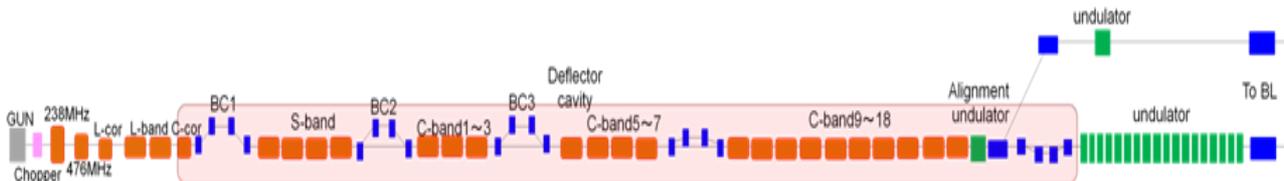


図 1: X 線自由電子レーザー SACLA の基本構成

[#] tanakas@spring8.or.jp

2.2 高エネルギー加速管部

BPM は、直近の四極電磁石と加速管に対して精度良く設置されているため、BPM の中心にビームを導けば、各コンポーネントの中心付近をビームが通ることになる。

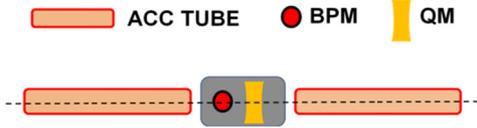


図 2: 高エネルギー加速管部配置図

各 BPM でビームの軌道を測定し、基準軌道からの変位を

$$\Delta x = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n)$$

とすると、これに対し図 3 に示すようなカウンターを当てることで補正を行うことができる。カウンター軌道は、

$$-\Delta x = (-\Delta x_1, -\Delta x_2, -\Delta x_3, \dots, -\Delta x_n)$$

で表される。カウンター軌道 $-\Delta x$ は、ビーム感度行列を C 、補正電磁石のキック角を θ とすると、以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} -\Delta x_1 \\ -\Delta x_2 \\ \vdots \\ -\Delta x_n \end{pmatrix} = C \cdot \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix}$$

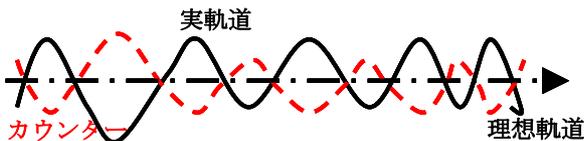


図 3: 軌道補正原理

軌道補正において、全ての補正電磁石を使用せずに最も効果的な補正電磁石を選び出すことができれば、比較的少数の補正電磁石で滑らかに補正することが可能である。補正電磁石のキック角は最小二乗法により求め、この補正を繰り返し行うことで理想軌道に近づけることができる。このような方法はベストコレクタ法と呼ばれ、SPring-8 のようなリング加速器の COD 補正で広く採用されている。

加速によって大きくエネルギーが変わる線型加速器においても、補正電磁石に対する BPM の感度係数が正しければベストコレクタ法により補正できる。SACLA では、高エネルギー加速管部の軌道補正にベストコレクタ法を用いて補正した。現状、ビーム感度係数は、補正電磁石で電子ビームにキックを与え、この補正電磁石より下流の全ての BPM で変位

を観測し、線形フィットするといった方法で求めている。感度係数は、加速エネルギーや四極電磁石の強度等の加速器パラメータに依存するため、自動測定が可能となるよう GUI を整備した。

現状、定常的な軌道ドリフト補正は行っておらず、必要に応じて補正を行っている。今後、感度係数を線型加速器模型の転送行列から算出できるプログラムの開発を行い、補正パラメータの最適化を行って、定常的に軌道を補正するシステムを導入する予定である。

2.3 アンジュレータ入射部

アンジュレータ入射部の軌道補正については、特に注意が必要である。アンジュレータラインの軌道は Beam Based Alignment で決定されているため^[3]、アンジュレータへの入射条件が崩れると、アンジュレータ内の軌道が大きく乱れて、レーザー増幅に影響を与えてしまう。常時、最適軌道に電子ビームを通すには、アンジュレータに入射する電子ビームの軌道を正確に固定する必要がある。

入射軌道の測定は、アンジュレータラインの入口に 7 m 間隔で設置した 2 台の BPM を用いた (図 4)。

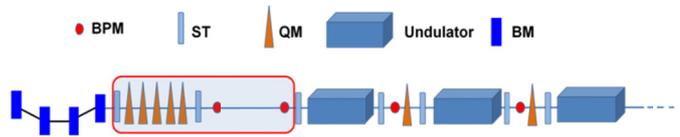


図 4: アンジュレータライン補正区間

これらの BPM の間は理想的なドリフト空間にしなければならないため、嚴重な磁気シールドが施されている。アンジュレータ入射軌道の補正には、2 台の補正電磁石を使用する。暗電流除去シケイン下流の補正電磁石で入射軌道入口の変位を補正し、直上流の補正電磁石で角度を補正する。このアルゴリズムは、SCSS 試験加速器におけるアンジュレータ部の軌道補正で既に導入している^{[4], [5]}。

SCALA では、電子ビームの空間分布の情報をアンジュレータまで転送する線型加速器模型が導入された^[6]。データベースを介して加速器の模型情報が取得できるように制御システムが整備されている。補正電磁石に対する BPM の感度係数の算出は、補正電磁石から BPM までの転送行列を、模型情報をもとに計算することによって算出している。BPM で観測される変位 Δ は、転送行列を用い以下のように記述でき、変位 Δ を常にゼロになるように kick 量を算出することで補正を行う。

$$\begin{pmatrix} \Delta \\ \Delta' \end{pmatrix}_{bpm} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ kick \end{pmatrix}$$

$$\Delta = m_{12} \cdot kick$$

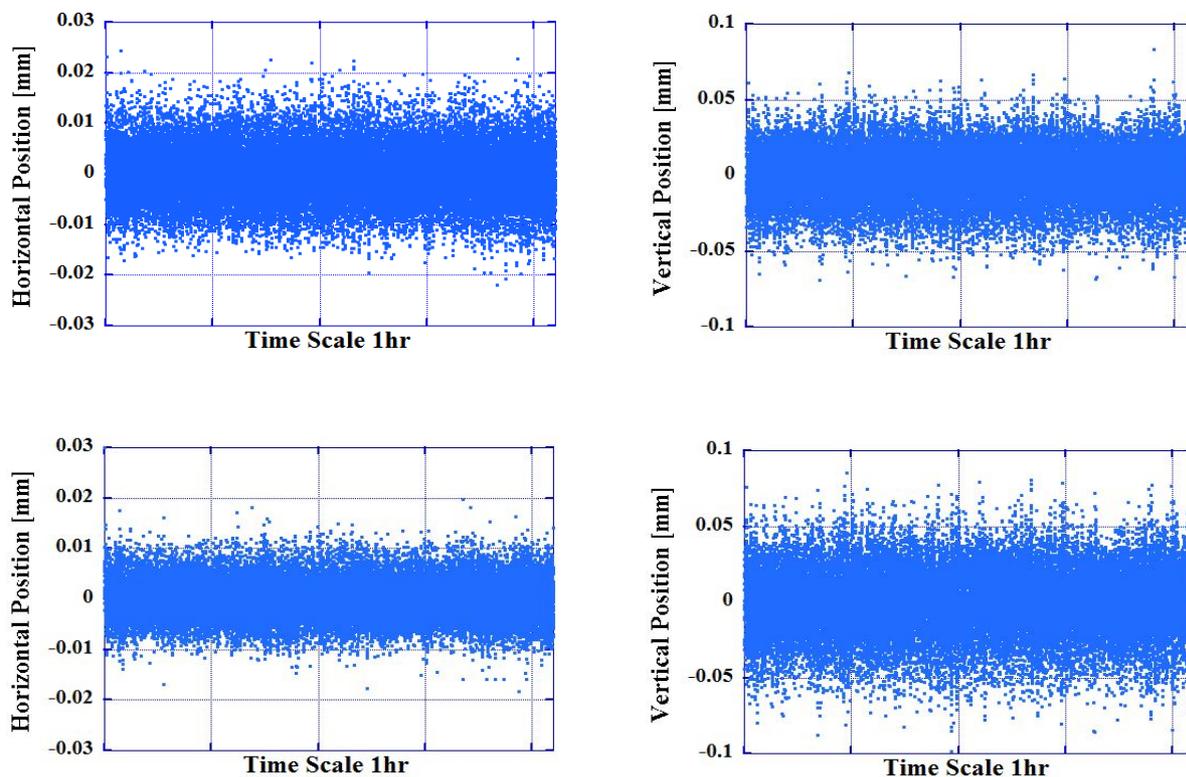


図 5: アンジュレータ入射軌道の長時間変化

使用する BPM は、全ショットの測定が可能であり、十分な分解能を有する。10 ショットのアンサンブル平均を軌道変位とみなして 5 秒周期で補正を行っている。また、ビームエネルギーや加速器パラメータの変更を行った場合においても、加速器モデルを導入しているため、速やかに軌道補正を開始することが可能となっている。

図 5 にアンジュレータ入射軌道の長時間 (1 時間) における shot-by-shot のデータを示す。水平垂直共に早い成分の変動があるものの、軌道ドリフトは抑制できているのがわかる。しかし、補正精度はまだ十分とは言えず、今後加速器の安定化と共に補正精度の向上が望まれる。

3. 今後の課題とまとめ

高エネルギー加速管部の軌道補正に関しては、まだ周期的な補正を導入していないため、長時間の運転において軌道のドリフトが見られる。今後、感度係数の算出を、加速器パラメータ変更に対応できるように、SACLA で導入された加速器モデルの転送行列から算出するようにプログラム開発を行い、周期補正を導入してゆく予定である。

アンジュレータ部の軌道については、上流のエネルギーフィードバックと軌道フィードバックを併用することで、長時間にわたり軌道ドリフトを抑制することができた。しかしながら、このスキームでは補正不可能な早い成分の軌道変動が抑制できていない。軌道変動要因の特定と更なる軌道の安定化を行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”, 本学会口頭発表
- [2] 前坂比呂和、他、“XFEL/SPring-8 におけるビーム診断システムの建設状況”, 第 7 回本学会プロシーディングス p.155
- [3] 山本龍、他、“SACLA アンジュレータセクションにおける Beam Based Alignment 法について”, 本学会ポスター発表
- [4] 田中信一郎、他、“SCSS 試験加速器におけるレーザー安定化のための軌道ドリフト制御”, 第 5 回本学会プロシーディングス p.524
- [5] 田中信一郎、他、“SCSS 試験加速器におけるアンジュレータ部での軌道補正性能の改善”, 第 6 回本学会プロシーディングス p.641
- [6] 田尻泰之、他、“SACLA における線形加速器モデルに基づくビームエンベロープ制御”, 本学会ポスター発表