

SACLA における線形加速器模型に基づく電子ビーム軌道の自動補正

ORBIT CORRECTION OF THE ELECTRON BEAM USING THE LINEAR ACCELERATOR MODEL AT SACLA

長谷川太一^{#A)}, 田尻泰之^{A)}, 渡川和晃^{B)}, 原徹^{B)}, 田中均^{B)}

Taichi Hasegawa^{#A)}, Yasuyuki Tajiri^{A)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Toru Hara^{B)}, Hitoshi Tanaka^{B)}

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

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

In the X-ray free-electron laser facility SACLA, 24 hours continuous operation for the user experiments has been started from March 2012. To achieve stable XFEL operation, the stability of the electron beam orbit is one of important issues. We have introduced two orbit feedback systems. One is installed at the entrance of the undulator-beamline to maintain the beam orbit through the undulator beamline, which contributes to the laser axis stability. The other is a global orbit correction system over the whole linear accelerator to mainly keep the projected beam emittance, which contributes to the laser intensity stability. Since the previous accelerator model using linear transfer matrices does not reproduce observed beam orbit responses in SACLA, response functions for each steering magnet had been measured and used for the orbit correction. Recently we found that the disagreement of the previous model is due to the quadrupole components existing in the accelerator structures. In this report, we present the results of the beam orbit correction using the modified accelerator model including the quadrupole components.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA では、2012年3月よりユーザー利用実験への供用が開始され、24時間連続で加速器を運転している。XFEL光を安定に供給する為、電子ビーム軌道のドリフトは自動フィードバックプログラムによる補正が行われ、ユーザー実験時のビーム軌道を最適な状態に保っている。SACLAのビーム軌道補正は、加速器部とアンジュレータ部の2つのセクションに分けて行っている。アンジュレータ部では、レーザー光と電子ビームのオーバーラップを保つため、電子ビーム軌道を直線にする必要がある。SACLA BL3には現在19台のアンジュレータが設置されているが、各アンジュレータからの放射光プロファイルの中心を下流のビームラインスクリーン上で一致させることにより、電子ビーム軌道を直線にアライメントしている。アンジュレータへの入射軌道がこの条件からずれると、電子ビーム軌道の直線性が崩れ、レーザー増幅に悪影響を与えてしまう。実際にはアライメント後、レーザー出力が最大となるよう入射軌道を更に最適化し、この最適な入射軌道を保つよう軌道フィードバックを行っている。

アンジュレータ入射部の模式図を Figure 1 に示す。アンジュレータへの電子ビーム入射軌道は、地磁気シールドを施した 7.8 m のドリフト空間を挟んだ 2 台の BPM を用いて測定し、ドリフト空間上流にある水平と垂直方向各 2 台のステアリング電磁石を用

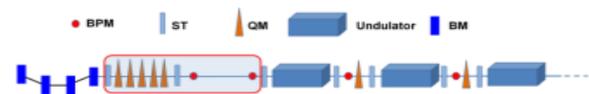


Figure 1: Schematic view of the injection orbit correction to the undulators.

いて、軌道を補正する。ステアリングと BPM の間には四極電磁石があるが、線形転送行列を用いた単純な連立方程式を解くことによって、入射軌道の位置と角度の補正を行っている。

S-band 下流からアンジュレータ入口迄の広範囲にわたる加速器部分の軌道補正は、その時々々の軌道変位に応じた軌道エラーの発生箇所を特定し、エラー箇所に近いステアリングを用いて適切な補正を行わなければならない。メインライナック部の模式図を

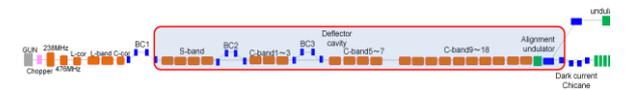


Figure 2: Schematic view of the SACLA accelerator section.

Figure 2 に示す。

エラー発生箇所の特定と最適なステアリングの選択は、最小二乗法をベースとしたベストコレクタ法を用いて決定している。これまでステアリングのビーム応答関数は、実際のステアリング励磁により発生

[#] hasegawa-t@spring8.or.jp

した軌道変位を測定し求めていた。この場合、軌道補正はうまく動作するものの、RF や四極電磁石のパラメータを変更する度に応答関数の再測定が必要で、加速器調整の効率が悪い。当初、線形転送行列を用いた加速器模型で計算した応答関数を使って軌道補正を試みたが、加速管部における実際の電子ビームの振る舞いが全く異なったため、軌道補正を行うことができなかつた。今回、加速管端部四極成分を修正した加速器模型を用いて電子ビーム軌道の補正を行ったので、その結果を報告する。

2. ベストコレクタ法

加速器部の軌道は、加速器にわたり設置された多数の BPM の測定データにより、再構築される軌道と基準軌道との偏差を定期的にステアリングにより補正することで、長期間にわたって安定運転に支障のない状態（十分基準軌道の近傍）に維持されている。SACLA では、この軌道補正にシングレットで補正効率の高い順にステアリングを N 台選択して補正する、所謂ベストコレクタのアルゴリズムを採用している。

$\mathbf{b}=(b_1, b_2, \dots, b_m)^T$: m 個の BPM の基準位置からの偏差、 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$: n 個のステアリングのキック角、 $\mathbf{A}_{m \times n}$: n 個のステアリングの m 個の BPM に対する感度行列とすれば、補正に対する残差ベクトル $\mathbf{r}=(r_1, r_2, \dots, r_m)^T$ は次のように表される。

$$\vec{r} = \vec{b} + \mathbf{A}\vec{x} \quad (1)$$

ここで、残差ベクトル \mathbf{r} に対し、ノルムが保存する以下のハウスホルダー変換（直交変換） \mathbf{P} を(1)式の両辺に施せば、取扱易い形に変形することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^T \mathbf{P} &= \mathbf{I} \\ \mathbf{P}\vec{a} &= (-\text{sgn}(a_1)|\vec{a}|, 0, \dots, 0)^T \\ \mathbf{P} &= \mathbf{I} - \gamma \vec{u} \vec{u}^T \\ \gamma &= \frac{1}{|\vec{a}|[|\vec{a}| + \text{sgn}(a_1)|a_1|]} \\ \vec{u} &= \vec{a} + \text{sgn}(a_1)|\vec{a}|\vec{e}_1 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで \mathbf{a} は $\mathbf{A}_{m \times n}$ の補正に用いるステアリングの k 列ベクトル $(a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk})^T$ であり、 a_1 はベクトル \mathbf{a} の第一要素、 \mathbf{e}_1 は第一要素を 1 とする単位ベクトル $\mathbf{e}_1=(1, 0, \dots, 0)^T$ である。ハウスホルダー変換により、係数行列 $\mathbf{A}_{m \times n}$ の選択した列ベクトルを、行列第一要素を除いてゼロにできるので、選択したステアリングによる残差ベクトルのノルム最小条件が容易に計算可能となる^[1]。必要個数を満たすまで、補正効率の高い順に、ステアリングの列ベクトルに(2)式のハウスホルダー変換を繰り返し施せば、使用するステアリングの組に対し、感度行列 $\mathbf{A}_{m \times n}$ を実効的に三角行列化できる。故に、後退代入で容易に解が得

られ、少数のステアリングによる効率的な補正が実現できる。ステアリングの補正効率の高さは

$$\frac{(\vec{a}^T \vec{b})^2}{|\vec{a}|^2} \quad (3)$$

の値で評価でき、(3)式の値の大きい順にステアリングを必要個数まで選び出すことができる。

3. 修正した加速器模型を用いたビーム軌道補正

3.1 パラメータデータベース

四極電磁石やドリフト空間、偏向電磁石など、電子ビーム軌道補正で用いる線形転送行列は、既に蓄積リング等で広く用いられている。加速管については、電子の運動方程式を解くことで得られた転送行列を用いる^[2]。また、加速管端部の収束発散効果についても、薄肉近似で取り入れている。

$$\begin{aligned} M_{TWA-in} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{eE}{2\beta^2 \bar{\gamma}_0 m_e c^2} \cos \theta & 1 \end{pmatrix} \\ M_{TWA-out} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{eE}{2\beta^2 \bar{\gamma}_0 m_e c^2} \cos \theta & 1 \end{pmatrix} \\ M_{TWA} &= \begin{pmatrix} 1 & \frac{\bar{\beta}_0 \bar{\gamma}_0}{\bar{\gamma}'} \ln \frac{\bar{\gamma}_1 + \bar{\beta}_1 \bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_0 + \bar{\beta}_0 \bar{\gamma}_0} \\ 0 & \frac{\bar{\beta}_0 \bar{\gamma}_0}{\bar{\beta}_1 \bar{\gamma}_1} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

これら転送行列の各要素を求めるために必要な加速器パラメータは、パラメータデータベースに常時保存されており、制御 GUI から加速器のビームパラメータを変更する度に、データベースのパラメータも同時に更新されるようになっている。

軌道補正プログラムでは、リアルタイムで更新されるデータベースのパラメータを用いて、ステアリング-BPM 間の転送行列を計算し、その(1,2)成分から応答関数を求め、軌道補正を行う。補正対象となる BPM で測定したビーム軌道は、電子ビームパルス毎に全て同期収集データベースに保存され、数秒から数十秒の間隔でビーム軌道のドリフトを補正する。

3.2 BC3 下流メインライナックにおける軌道補正

BC3 下流にあるメインライナック部において、ステアリングで与えたキックに対するビーム軌道の実応答と、転送行列による計算結果を Figure 3 に示す。

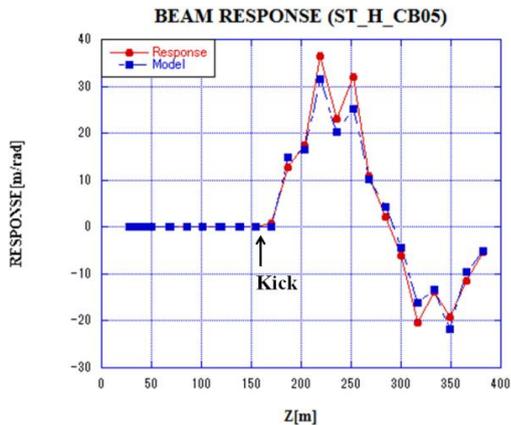


Figure 3: Comparison of observed beam response and calculated orbit by the accelerator model for the crest acceleration section.

メインライナックは、加速電界が最大となるクレスト位相で電子ビームを加速しており、この条件下ではモデルの応答が実応答と良く一致している。また、メインライナック下流のビームエネルギーが一定であるアンジュレータ部においても、転送行列を用いた軌道補正は問題なく機能している。

3.3 BC3 上流オフクレスト加速セクションにおける軌道補正

BC1 と BC3 の間の加速管は、バンチ圧縮に必要なエネルギーチャープを電子バンチに与えるため、BC1 と BC2 の間は S-band 加速管、BC2 と BC3 の間は C-band 加速管を各々用いて、オフクレストで電子ビームを加速している。

Figure 4 は、BC1 下流にあるステアリングでビームをキックした時の実測したビーム応答と転送行列計算結果の比較である。バンチ圧縮の為、位相がクレストから-48deg と深く設定されている C-band 加速管部 (z~100m 付近) で、実際に測定されたビーム応答と転送行列で計算した応答に大きな差がある

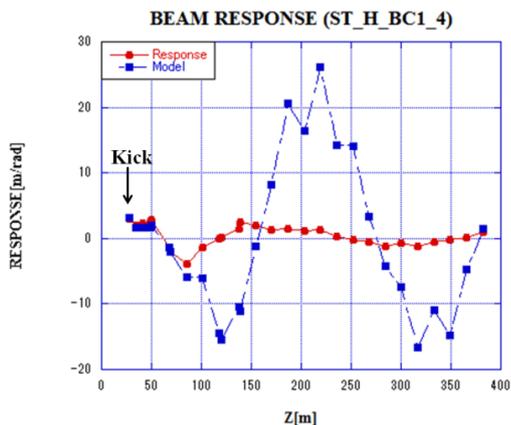


Figure 4: Comparison of observed beam response and calculated orbit by the accelerator model for the off-crest acceleration section.

ことが分かる。

この原因はオフクレスト加速セクションにおいて、加速管端部カプラーセルに四極成分が存在し、当初のモデルにその効果が考慮されていなかったためである。実際のビーム応答から四極成分を測定した結果、四極成分は加速管の位相に依存し、クレスト付近ではゼロになるため、メインライナックの軌道補正では問題にならなかったと考えられる。

この効果を、新たに加速管転送行列の端部収束効果に乗ずる係数として組みこみ、ビームの実応答から係数を定め、モデルを修正した^[3]。四極成分は RF の位相に依存して変化する為、パラメータデータベースを介して常に正しい応答関数を利用できるようにしている。

Figure 5 に、修正前後の加速器模型および実測したビーム応答を用いてビーム軌道を補正した例を示す。横軸は電子銃カソードからの距離、縦軸は各 BPM における軌道の変位である。BC1 下流のステアリングで与えた軌道変位 (白抜き橙) に対し、赤: 実測したビーム応答 (Response)、青: 修正後の模型 (Model)、緑: 修正前の模型 (Old Model) の 3 つのビーム応答関数を使用して補正した結果を示している

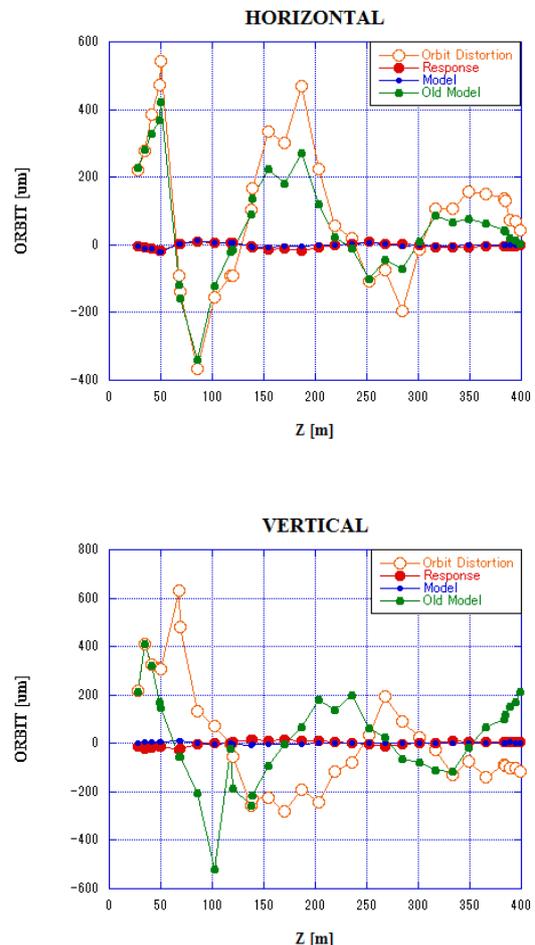


Figure 5: Beam orbit correction using measured response, modified model and old model.

る。水平垂直共に模型を修正することで、オフクレスト加速セクションにおけるビーム軌道補正の精度が劇的に改善されている。

加速器模型の修正により、パラメータ変更毎に行っていたビーム応答測定が必要なくなり、転送行列で計算したビーム応答を用いた軌道補正が可能になった。トラブル等で RF ユニットのスイッチする際の、ダウンタイムの短縮にもつながっている。

ユーザー運転中の自動軌道補正は、軌道ドリフトを抑制するため、現状 1 回の補正で 2 個のステアリングを用いて 1 分毎の周期で行い、3~5 秒の周期で行われているアンジュレータ入射軌道補正と干渉しないようにしている。

5. まとめ

SACLA では、アンジュレータ部入射ビーム軌道の自動補正に加え、加速器全体にわたる自動軌道補正を行っている。加速器部の軌道補正プログラムのルーチンにはベストコレクタ法を用い、感度の高い電磁石を自動的に選び出す。軌道補正にはステアリングのビーム応答関数が必要であるが、加速器模型

で計算したビーム応答は、これまでオフクレスト位相の加速管において実際のビーム応答と一致せず、軌道補正に用いることができなかった。今回、RF 位相に依存した加速管端部の四極成分を、模型に取り入れ修正することにより、加速器模型を用いたビーム軌道補正が可能になった。これにより、ユーザー運転中の長期的軌道変動抑制だけでなく、加速器パラメータ変更毎のビーム応答関数の測定が不要になったため、RF ユニットのスイッチ時のビーム調整時間の短縮につながっている。

参考文献

- [1] B. Autin, Y. Marti, "Closed orbit correction of A.G. machines using a small number of magnets" Mar 1973 - 18pages CERN-ISR-MA-73-17
- [2] T. Hara et al., "Transvers Envelope Analysis for Accelerating Relativistic Electron Beams in a Linear Accelerator as a Photon Source" NUCL INSTRUM METH A, vol.624, p.65 (2010).
- [3] Y. Taiiri et al., "Modification of the beam transfer model of travelling wave accelerator structures at SACLA", in these proceedings.