

A NEW BEAM-BASED ALIGNMENT OF UNDULATOR SEGMENTS FOR X-RAY FREE-ELECTRON LASERS (XFEL)

Hitoshi Tanaka^{#, A)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Toru Hara^{B)}, Ryo Yamamoto^{A)}

^{A)} JASRI/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} RIKEN/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

We propose a novel method on beam-based alignment (BBA) of undulator segments for X-ray free electron lasers. Our idea is based on (1) solving an open-loop system sequentially from the upstream and (2) doubly achromatic condition obtained by cancelling out single and double integrals of dipole error-fields over each correction period having one undulator segment. The proposed method enables the straightforward BBA without an iterative process under non-negligible earth magnetic fields. Simulation results clarify its sufficiently high performance.

X線自由電子レーザー(XFEL)用アンジュレータの新たなビームベースドアライメント法

1. はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)では、高い増幅利得を得るため、100 m を超えるアンジュレータビームラインに渡り、(1)レーザー場と電子ビームの十分な相互作用を確保し、(2)生成されたÅ オーダーの密度変調を維持する必要がある。これらを実現するには、長尺アンジュレータビームラインに渡り、電子ビーム軌道を±4 μm の精度で直線にガイドする必要がある。通常のアライメント技術ではこの精度達成は困難であり、電子ビームを用いた Beam-Based Alignment (BBA) が用いられる。LCLS で初めて成功した XFEL 向けアンジュレータビームラインの BBA では、ビーム軌道に関する情報量の少なさを補うため、非物理的境界条件を導入し、逐次的に計算を収束させる手法が用いられた。LCLS では、アンジュレータには地磁気シールドが施され、電子ビームは直進することが前提とされ、フィッティングパラメータとして途中の4極電磁石のミスアライメントと BPM のオフセットのみが使用されている。このため、LCLS で開発された BBA は、磁気遮蔽が施せない真空封止アンジュレータを用いる SPring-8 に直接適用できないだけでなく、導入する制約条件にも普遍性がなく、一般的に利用可能な BBA 手法とはなり得ない。そこで、収束計算が不要で、かつ、アンジュレータ部の地磁気を前提とした補正ステアリングを用いる BBA 法を新たに考案し、その性能を検討する。

2. LCLS で開発された BBA 法

LCLS では、アンジュレータは固定ギャップでかつ、真空外に設置されており、地磁気シールドを十分に施すことが可能である。固定ギャップのアン

ジュレータは精密に磁場調整が行われており、4極電磁石の設置誤差がない理想的な条件下で、電子ビームはアンジュレータビームラインを直進すると見なすことができる。BBA で評価すべきパラメータはこの場合、BPM のオフセット値と4極電磁石の設置誤差分布となる。

LCLS では、アンジュレータ毎に1つ設置されている BPM の変位情報のみを用いてこの問題を解くアルゴリズムを採用しており、このため各 BPM の角度情報は、さらに下流の BPM 変位情報へ順次繰り込まれる。アンジュレータビームラインの全 BPM の変位を電子ビームの異なるエネルギーに対して測定し、各パラメータの応答関数と制約条件を用いた収束計算により、オフセット値と設置誤差分布を求めるのが LCLS で開発された BBA 方式である¹⁾。

3. 理想とする簡便な BBA 法

線型加速器は Open-Loop System であるから、BBA を上流の補正区間から順次実施し、理論的には収束計算を行わずに全ビームラインのアライメントを行う事が可能である。この場合の理想的な誤差磁場補正とは、補正区間において誤差磁場分布の電子の path に沿った1重、2重積分 Θ_2 , Θ_1 がゼロとなり、補正区間の終端で所謂 Doubly Achromatic Condition (DAC) を満たす事である。そのためには(1)式に示すように最低2つの補正磁場 B_{1cor} と B_{2cor} が必要になる。

$$\begin{aligned}\Theta_1 &= \frac{1}{B_0 \rho_0} \int_0^L dz_1 \int_0^{z_1} dz_2 (B_y + B_{1cor} + B_{2cor}) = 0 \\ \Theta_2 &= \frac{1}{B_0 \rho_0} \int_0^L dz_1 (B_y + B_{1cor} + B_{2cor}) = 0\end{aligned}\quad (1)$$

[#] tanaka@spring8.or.jp

補正区間の終端に BPM が常に位置する条件に於いて、DAC により BPM は電子ビームのエネルギーによらず一直線上に整列する。これらを考慮し、理想とする BBA の条件を以下の様にまとめる事ができる。

- 収束計算不要の straightforward なアライメントアルゴリズム。
- 地磁気も含めた任意の誤差磁場分布の理想的補正による補正区間毎の DAC の実現。
- 全 BPM が基準直線（軌道）上に整列する事による BPM のオフセットと 4 極電磁石設置誤差の抽出。

4. SPring-8 のアプローチ

図 1 に XFEL/SPring-8 のアンジュレータビームラインの構成を模式的に示す。アンジュレータ入口には入射軌道を定義する 2 つの BPM が約 7 m のスパンで設置されている。補正区間は 1 台のアンジュレータとその出入口の 1 組の水平・垂直ステアリング、終端に位置する BPM から構成され、補助的に補正区間直近下流の 4 極電磁石がモジュレータとして利用できる構成になっている。

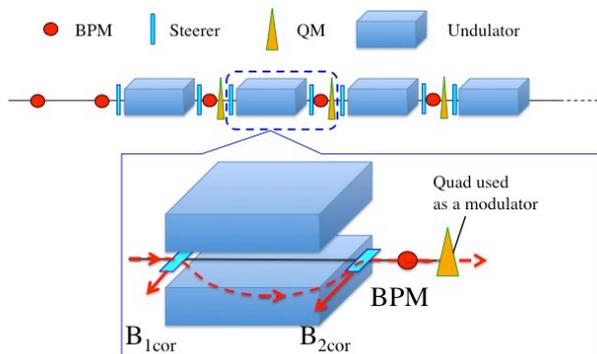


図 1 : XFEL/SPring-8 のアンジュレータビームラインの構成。

4.1 誤差磁場分布の 2 重積分 θ_1 の相殺

電子ビームのエネルギー E を設計エネルギー E_0 から ΔE シフトさせ補正区間終端の BPM で変位を測定すると測定値は $1/(1+\Delta E/E_0)$ に対し図 2 のように線形に変化する。この変化率は誤差磁場の 2 重積分値 θ_1 に対応するから、この値をゼロにするように上流のステアリングの磁場の値 B_{1cor} を決定する。図 2 の直線の傾きがゼロで BPM の変位が水平、垂直でそれぞれ Δx , Δy であれば、その値が BPM の水平、垂直オフセット（基準軌道からの偏差）を与える。

4.2 誤差磁場分布の 1 重積分 θ_2 の相殺

BPM では角度の情報が得られないため、軌道の角度ズレを 33 cm 下流に位置する 4 極電磁石での変位として、次の補正区間の終端に位置する別の BPM で検出する。4 極電磁石の電流値に周期的な変調をかけ、下流のステアリング磁場 B_{2cor} をスキャンしながら 2 つのビームエネルギー、例えば 4 GeV と 8

GeV で変調振幅を測定する。変調振幅は 4 極電磁石位置での変位に比例するので、2 つ異なるエネルギーの変調振幅差分は、1 重積分値 θ_2 がちょうど相殺したところでゼロになる。この演算では変調振幅は設計エネルギー基準に差分を取る前に合わせる事が重要である。この規格化により、図 3 に示すように、変調振幅差分は $\theta_2=0$ において最小値ゼロをとり、プラス側に折り返す直線で表されるデータとして観測される。

4 極電磁石の設置誤差は次のように評価する。変調振幅差分がゼロになった条件で、変調振幅がある有限の値を持てば、それは設置誤差に比例したものになっている。即ち、基準軌道に磁場中心がある場合は、差分がゼロになった条件で変調振幅もゼロとなる。このデータから、4 極電磁石の水平・垂直設置誤差が補正区間毎に得られる。

下流ステアリング磁場をスキャンする際には、同時に磁場の 2 重積分を相殺する条件を維持する事に注意する。

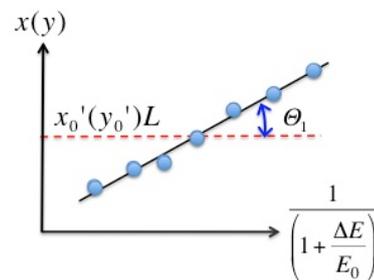


図 2 : BPM で観測する変位のエネルギー依存性

$$\Delta A = A(E_0) - A(E_1)$$

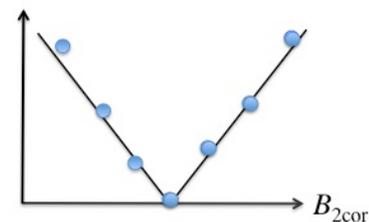


図 3 : 1 つ下流の補正区間終端の BPM で観測される変調振幅差分の下流ステアリング磁場依存性。

4.3 BBA スキームと精度向上に関する留意点

アンジュレータビームラインの上流から、BPM を終端とする補正区間毎に、誤差磁場分布の 1 重、2 重積分を相殺していく。これを順次ビームラインの終端に向かって補正区間の数だけ繰り返せば、基準軌道、それを与える水平・垂直ステアリングペアの強さ、BPM オフセット、4 極電磁石の設置誤差が全て決定できる。

BBA 法において、アライメント精度を左右する因子を以下に列挙する。

- アンジュレータ軌道軸をエネルギーに依らず固定。

- ビームの入射条件変動の補正。
- θ_2 測定時の 4 極電磁石磁場中心シフトに対する配慮。

5. シミュレーションによる性能評価

ここで提案する BBA が X 線自由電子レーザーに要求される精度を満足できるのかを確認するため、計算機シミュレーションを行った。表 1 に主要な条件を示す。BBA はアンジュレータビームラインの基準軌道を与えるので、アンジュレータギャップ全開の条件で測定を行う事を仮定する。この場合、ギャップ値依存の誤差磁場は、BBA で決まった基準軌道に戻すように補正する事になる。

表 1 : シミュレーション条件

項目	位置	大きさ
地磁気	全体一様	0.1~0.4 Gauss
BPM 測定誤差		1 μm (1 σ)
アンジュレータの誤差磁場	両端に局在	0.8 Gauss \cdot m (1 σ)
アンジュレータギャップ		全開 (軌道上に周期磁場なし)

5.1 基準軌道

図 4 に地磁気を 0.2 Gauss とし、10 個の乱数に対して得られたアンジュレータビームラインに渡る電子ビーム軌道を示す。水平は $\pm 5 \mu\text{m}$ 、垂直は $\pm 3 \mu\text{m}$ の範囲に軌道のうねりが収まっている。

地磁気、アンジュレータ誤差磁場、BPM の測定誤差が BPM のアライメント精度にどのように影響するかを調べた。その結果、BPM の測定誤差以外はアライメント精度に殆ど効かない事が分かった。図 5 にアライメント精度の BPM 測定誤差依存性を示す。

5.2 レーザー増幅への影響

BBA で得られる電子ビーム軌道で十分なレーザー増幅が可能かどうかを 3D FEL シミュレータ SIMPLEX^[2]を用いて調べた。電子ビームの軌道は、ランダムに決められた BPM のオフセットを満たすようアンジュレータ入口のステアリングで地磁気による軌道の湾曲を考慮してキックし、出口のステアリングで蹴り戻すことで設定する。図 6 に、各条件について 100 サンプルのモンテカルロ計算を行った中でのレーザー出力最小のケースの値を、理想値からの割合で示す。地磁気が 0.4 Gauss の場合でもレーザー出力として理想値の 80%が得られる。

6. まとめ

シンプルで地磁気環境下でも有効、かつ、収束計算不要の XFEL 用アンジュレータビームラインの BBA 法を提案した。モンテカルロシミュレーションの結果から、今回提案した BBA 法が XFEL 用アンジュレータビームラインのアライメントに十分有効であることが分かった。

参考文献

- [1] H. D. Nuhn, "LCLS Undulator Commissioning, Alignment, and Performance", Proc. FEL 2009, 714-721 (2009).
- [2] T. Tanaka, "FEL Simulation Code for Undulator Performance Estimation", Proc. FEL 2004, 435-438 (2004).

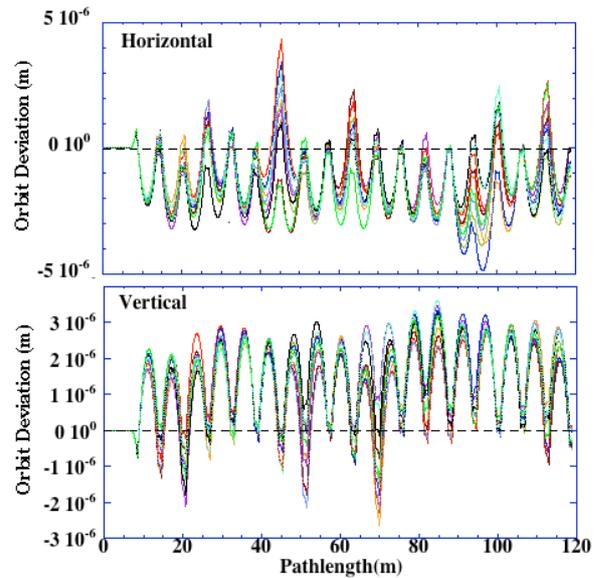


図 4 : アンジュレータビームラインの基準軌道。原点はアンジュレータビームライン入口

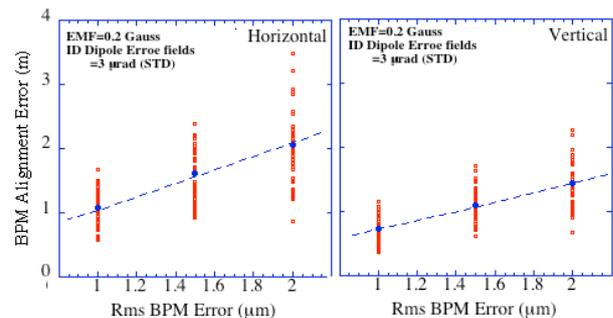


図 5 : BPM のアライメント精度の BPM 測定誤差依存性

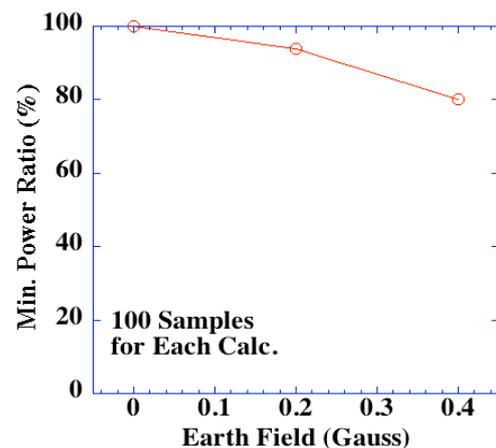


図 6 : BBA 実施後の SASE FEL 出力予想。