

## DEVELOPMENT OF AUTOMATIC ALIGNMENT SYSTEM FOR FEL CAVITY MIRROR

Keisuke Nakao<sup>\*A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>B)</sup>, Isamu Sato<sup>C)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>B)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>B)</sup>,  
Takeshi Sakai<sup>C)</sup>, Kyoko Nogami<sup>B)</sup>

A) Graduate School of Science and Tech. Nihon Univ.  
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

B) Institute of Quantum Science Nihon Univ.  
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

C) Advanced Research Institute for the Science and Humanities (ARISH) Nihon Univ.  
12-5 Gobancho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8251

### Abstract

The automatic alignment system for FEL optical cavity mirror is developed in Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) Nihon University. Beam orbit in the undulator is calculated in real time from the signal of the two beam position monitors which are installed at each end of the undulator. By using the automatic alignment system, the optical axis will be able to adjust to the electron beam orbit at any time. Therefore, the FEL will be kept stably during experiment. Using this system, load of operators will be reduced.

### 日本大学電子線利用研究施設における FEL 共振器ミラーオートアライメント システムの開発

#### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2001 年 5 月に自由電子レーザー (FEL) の発振に成功し、2003 年 10 月にユーザ利用実験が開始された<sup>[1]</sup>。24 時間 FEL 利用実験可能な施設をめざし、加速器および実験設備、周辺機器の高度化が進められているが、人員不足のため実現は難しい。さらに FEL を発振させるための運転は、経験に基づいた職人芸的な要素があり、ユーザに運転してもらうことも難しい。そこで職人芸的な要素を減らし、運転者の負荷を減らすために、FEL 光共振器に入る電子軌道を制御し、共振器ミラーをその軌道に最適な状態に自動調整するシステムを開発している。本稿ではこのシステムの概要および進捗状況を述べる。

#### 2. LEBRA の FEL 光共振器

図 1 に、LEBRA の FEL 光共振器の配置図を示す。125MeV 電子線形加速器で加速された電子は、二台の 45 度偏向電磁石から成る無分散 90 度偏向系を通過し、アンジュレータに入射する。LEBRA では、電子ビームの位置を計測するストリップライン型ビーム位置モニター BPM は 13 台稼働している。FEL 共振器付近には、二台の 45 度偏向電磁石の間 (BPM#6,#7)、アンジュレータの入口 (BPM#8)、出口 (BPM#9) に設置されている。BPM#6 から電子ビームエネルギーの変動を、BPM#8 と BPM#9 からアンジュレータ内の電子ビーム軌道を得ることができる。

FEL 光共振器は、曲率半径 5m の 2 枚の球面ミラー

から構成されている。共振器ミラーの間隔は、RF 波長  $\lambda$  の 64 倍、すなわち 6718mm で、アンジュレータ長は 2400mm である。ミラーはミラー表面の中心を通る鉛直方向の軸 (Y) と、水平方向の軸を回転の軸 (X) として、ステッピングモータで回転させることができる。さらに下流ミラーは、ステッピングモータとピエゾ素子で光軸方向にも動かすことができ、結果ミラー間隔を調整することができる。

#### 3. 目論見

FEL は自発放射光を種として、蓄積された光と電子の相互作用によって発振するので、蓄積された光の光軸と電子軌道が一致していなければ発振しない。よって光共振器に入射する電子ビーム軌道を測定し、その軌道に一致する光軸を 2 枚のミラーで作ってやればよい。

アンジュレータ中の電子ビームのベータatron 振動による、水平方向の軌道のずれおよび周期磁場による垂直方向の蛇行運動を無視し、BPM#8、BPM#9 で計測した電子ビームの座標をそれぞれ  $P_u = (x_u, y_u, z_u)$ 、 $P_d = (x_d, y_d, z_d)$  とすると、アンジュレータ内を通るビーム軌道は、 $t$  を媒介変数として

$$\begin{cases} x = t(x_u - x_d) + x_u \\ y = t(y_u - y_d) + y_u \\ z = t(z_u - z_d) + z_u \end{cases} \quad (1)$$

という直線になる。ここでビームの中心軌道を Z 軸、鉛直方向を X 軸、水平方向を Y 軸とする。

一方蓄積光の光軸は球面ミラーの曲率の中心を結ぶ直線上にできるので、曲率の中心が (1) 式で表され

\*E-mail: nakao@lebra.nihon-u.ac.jp

る直線上になければならない。曲率半径を  $R$  とするとミラーの曲率の中心は、

$$\begin{cases} x_o = R \sin Y_\alpha \\ y_o = R \cos Y_\alpha \sin X_\alpha \\ z_o = R \cos Y_\alpha \cos X_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

と書け、 $X_\alpha, Y_\alpha \ll 1$  のとき、(2) 式は

$$\begin{cases} x_o = RY_\alpha \\ y_o = RX_\alpha \\ z_o = R \end{cases} \quad (3)$$

と近似することができる。LEBRA の共振器ミラーの曲率半径は 5m で、ビームダクト径は 30mm なので、(3) 式の近似が使える。

図 1 に示す BPM#8、#9 から  $P_u, P_d$  をリアルタイムに測定し、(1) 式と (3) 式から、鏡の角度  $X_\alpha, Y_\alpha$  を求め、得られた角度をモータコントローラに入力しミラーの角度を自動的に調整する。

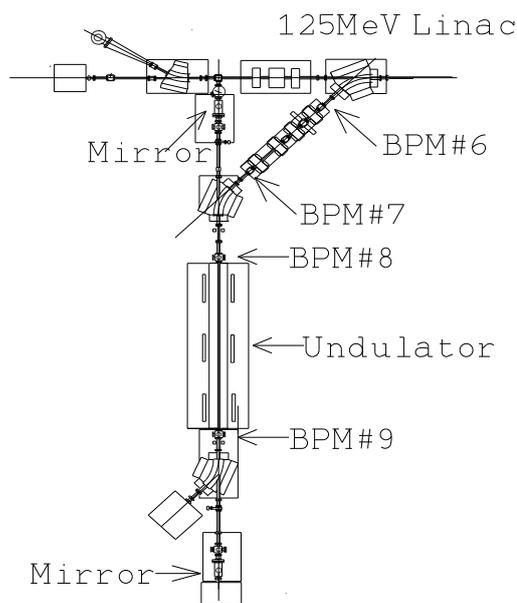


図 1: FEL 光共振器の配置

#### 4. 進捗状況

光共振器ミラーの自動調整を実現するためには、ミラーの位置、角度が PC で制御でき、BPM からの位置情報がリアルタイムに取り込めなければならない。

ミラーの位置、角度については、PC で制御できるインターフェースがなかったため、シリアル通信で PC から制御可能なモータコントローラを導入した。ミラー角度の分解能は  $10\mu\text{rad}$  であったが、短波長での FEL 発振時に、ミラー制御の分解能が不足していたこともあり、モータドライバをマイクロステップ対応のものに変更し、最小動作角を現行の 1/10 にした。

BPM は、アンジュレータの入口、出口をはじめとして、13 箇所に設置されている<sup>[2]</sup>。現在オシロスコープを用いて、アンジュレータの入口、出口のビーム位置を取得することが可能である。しかしエネルギー変動が測定することができる、BPM#6 からの出力はまだ取得できていない。

#### 5. 今後の課題

共振器ミラーの間隔も重要なパラメータであるが、今回は考慮していない。共振器ミラーの間隔は、アンジュレータが設置されている床の内部の温度と強い相関があることがわかっているため、温度変化を共振器長にフィードバックすることを検討している。

BPM および共振器ミラーの設置誤差を測定し、共振器ミラーの向きに補正を加える必要がある。しかし共振器ミラーは真空チェンバ内にあり、銀コートミラーのため大気に曝すことはミラーを損傷する可能性があるため、測定は困難である。そこで、FEL パワー、ミラーの位置、角度、アンジュレータ入口、出口のビーム位置を記録し、FEL のゲインが高い時を電子の軌道と光軸があっているものと仮定し、測定したビーム軌道と向きから推定することを考えている。

#### 6. まとめ

FEL 発振運転時のオペレータの負荷を軽減するため、FEL 共振器ミラーの自動調整システムを開発している。このシステムは、光共振器に入射される電子ビームの軌道をリアルタイムに算出し、光共振器の光軸を電子ビーム軌道に自動的に一致させるものである。

現在 FEL 共振器ミラーを PC から制御でき、アンジュレータの入口と出口のビーム位置を取得できるところまで、開発が進んでいる。

電子ビームエネルギー変動の補償、共振器長の補償、共振器ミラーの設置誤差の推定などが、今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] T.Tanaka, et al., “日大 125MeV リニアックの稼働状況” Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004
- [2] K.Ishiwata, et al., “LEBRA におけるビーム位置計測システムの開発” Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004