

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC BEAM ALIGNMENT FOR THE LEBRA LINAC

Keisuke Nakao^{*A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Isamu Sato^{B)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)},
Takeshi Sakai^{B)}, Kyoko Nogami^{A)}, Manabu Inagaki^{B)}

^{A)}Institute of Quantum Science Nihon Univ.
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

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

Abstract

The automatic beam orbit alignment system is developed in the Laboratory of Electron Beam Research and Application (LEBRA) Nihon University. This system consists of two programs, one is to find the central trajectory of the linac another is the beam orbit feed back program. Beam Position Monitors (BPM) installed in the linac are calibrated using central trajectory search program. The displacement between beam orbit and central trajectory is detected and the beam orbit is corrected by adjusting the exciting current of steering coil by the feed back program. Therefore, the FEL and PXR will be kept stably during experiment. The operator's load will be reduced by using this system.

日本大学電子線利用研究施設における電子ビーム軌道自動調整システムの 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月には FEL 共同利用実験が開始され、2004年4月にパラメトリック X 線 (PXR) の発生に成功した。2005年には加速器の年間利用時間が 1,000 時間に達し、長時間照射実験も行われるようになった^[1]。FEL を長時間、安定に発振させるには高品質なビームを長時間維持しなければならない。それには電子ビームを他の機器の変動による影響を受けにくい。加速器の中心軌道を通すことが望ましい。そこで、加速器の中心軌道に電子ビーム軌道を自動的に調整し、維持するシステムを開発した。

2. LEBRA LINAC 制御システム

LEBRA の Linac は、電子銃、プリバンチャ、バンチャ、4m 加速管 3 本から構成される。加速管及びバンチャの側面にはステアリングコイル、バンチャと加速管の出口には四極トリプレットが設置されている。ステアリングコイルと四極電磁石の励磁電流は、加速器制御プログラムにより制御できる。この加速器制御プログラムは、LAN 経由で外部プログラムからステアリングコイルと四極電磁石の励磁電流を変更することができる。

LEBRA Linac には加速セクション、FEL ビームラインおよび PXR ビームラインに合計 13 台のストリップライン型ビーム位置モニタ (BPM) が設置されている^[2]。BPM で測定されたビーム位置は、BPM サー

バを通じてネットワーク経由で取得することができる^[3]。

3. 中心軌道の探索

3.1 探索アルゴリズム

中心軌道を探すために、加速器に設置されている四極電磁石トリプレットと BPM を用いた。加速セクションに設置されている四極電磁石トリプレットは、FDF の配置で、中心は、加速器の中心軌道と一致するように設置されている。中心軌道を原点とし、水平方向を x 軸、鉛直方向を y 軸、ビームの進行方向を z 軸としたときトリプレットに入射した座標を (x_0, y_0) 、ビーム軌道と中心軌道のなす角の x 成分、 y 成分をそれぞれ θ 、 ϕ 、励磁電流の変化を ΔI 、 a 、 b 、 c 、 d を四極電磁石の特性によって決まる定数とすると四極トリプレットを通過した電子ビームの位置の変化は、次のように書ける。

$$\Delta x = (ax_0 + b\theta_0)\Delta I \quad (1)$$

$$\Delta y = (cy_0 + d\phi_0)\Delta I \quad (2)$$

四極電磁石の中心をビームが通過すると、四極電磁石の励磁電流を変化させてもビーム軌道に変化はないが、ビーム軌道が四極電磁石の中心を通過していないと、励磁電流を変化させると下流のビーム位置が変化する。この性質を利用して中心軌道を探す。

実際には以下の手順で中心軌道を探る。まずトリプレットの 3m ほど上流にあるステアリングコイルで、トリプレットに入射するビーム軌道を決める。その後四極電磁石の励磁電流を変化させながら、

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

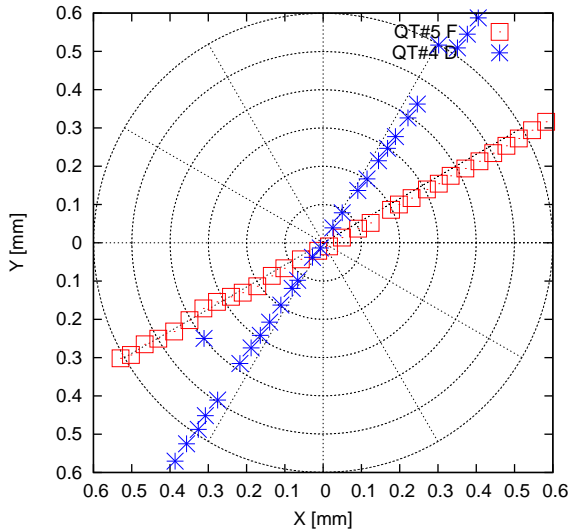


図 1: 四極トリプレット QT#4 の四極電磁石励磁電流を変化させたときの BPM#5 の位置でのビーム位置の変化 (自動軌道調整前)

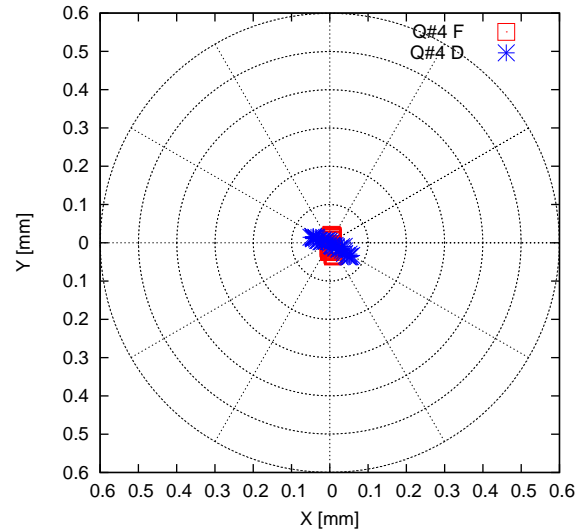


図 2: 四極トリプレット QT#4 の四極電磁石励磁電流を変化させたときの BPM#5 の位置でのビーム位置の変化 (自動軌道調整後)

トリプレットの下流にある BPM でビーム位置の変化を測定し、四極電磁石の励磁電流に対する、ビーム位置の変化の傾きを求める。ステアリングコイルの励磁電流を変え、この傾きが正であるステアリングコイルの励磁電流と、負になるステアリングコイルの励磁電流を探る。傾きが正のものと負のものと、絶対値が最小である組合せを探し、それらのステアリングコイルの励磁電流の中間値を、ステアリングコイルの励磁電流に設定する。これ繰り返し、四極電磁石の励磁電流に対するビーム位置の変化の傾きが、ある閾値以下になればビームが四極電磁石の中心を通ったと判断する。このプロセスを上流のトリプレットから順に行うことで、電子ビーム軌道を中心軌道に一致させることができる。

3.2 中心軌道を探索した結果

前述のプロセスを自動実行するプログラム「中心軌道探索プログラム」を開発した。このプログラムの実行前後における、加速器終端にある四極トリプレット QT#4 の励磁電流を $\pm 10\%$ 変化させた時の QT#4 の下流にある BPM で測定した軌道調整前後のビーム位置の変化を図 1、図 2 に示す。LEBRA の Linac に使用されている四極トリプレットは、水平方向収束 (F)、発散 (D)、収束 (F) で配置されており、F と D の励磁電流は独立に制御することができる。図 1、図 2 で、印は F の四極電磁石の励磁電流を、*印は D の四極電磁石の励磁電流を変化させた時のビーム位置の変化である。

加速器終端にあるトリプレット QT#4 の四極電磁石の励磁電流を 10% 変化させた時、QT#4 のおよそ 4m 下流にある BPM で計測したビーム位置の変化は 0.1mm 以内であった。アンジュレータの入口でのビーム軌道を数値計算した結果、四極電磁石の励磁電流の変化によるビーム位置の変化は約 0.1mm であった。

4. ビーム軌道の維持

前述の中心軌道探索でもとめられた中心軌道で、加速セクションにある 4 台の BPM を較正することができる。これらの BPM によってビーム軌道と中心軌道とのずれを計測し、このずれを打ち消すようにステアリングコイルの励磁電流を変化させるビーム軌道フィードバックプログラムを作成した。このプログラムは、比例制御、積分制御、微分制御を行う PID 制御を行っている。

ビーム軌道フィードバックプログラムは BPM サーバから毎秒 2 回、ビーム位置と中心軌道との差を取得し、過去 10 パルス分の平均が閾値を越えた場合にステアリングコイルの励磁電流を調整する。現在この閾値は $15\mu\text{m}$ である。

現在 LEBRA Linac の加速セクションにある 4 台の BPM を用いて電子ビーム軌道制御を行っている。上流でのビーム軌道の変化は下流のビーム軌道に影響を及ぼすため、4 箇所の BPM で検出したビーム位置のうち、複数の BPM で閾値を越えた場合は上流のビーム軌道の補正を優先している。例えば加速器出口における中心軌道とビーム軌道の差が $15\mu\text{m}$ あっても、加速器入口での中心軌道とビーム軌道の差が $15\mu\text{m}$ あれば、加速器入口での軌道が先に補正される。

加速器出口におけるビーム位置の時間変化を図 3 及び図 4 に、この時のビーム位置の鉛直方向成分の分布を図 5、図 6 に示す。図 3 はフィードバックプログラム停止中のビーム位置の時間変化で、図 4 はフィードバックプログラム動作中のビーム位置の時間変化である。フィードバック停止時、ビーム位置はゆっくりとドリフトしていくことがわかる。このドリフトは電子銃出力電流の変化が原因であることがわっている^[1]が、まだ本質的な対策はとられていない。

一方フィードバックプログラムを動作させると、前述のドリフトは抑えられている。また加速器出口

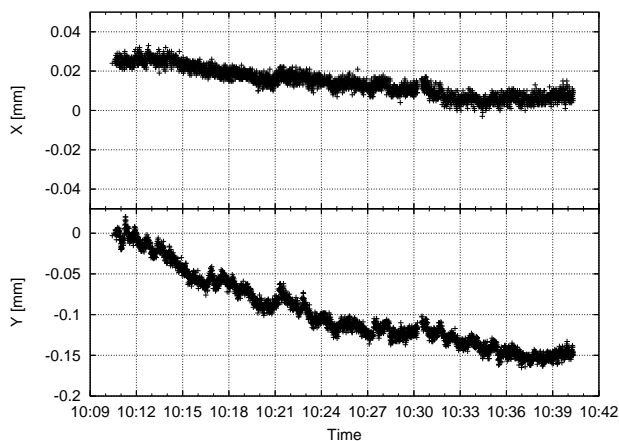


図 3: 加速器出口におけるビーム位置の時間変化 (フィードバックプログラム停止時)

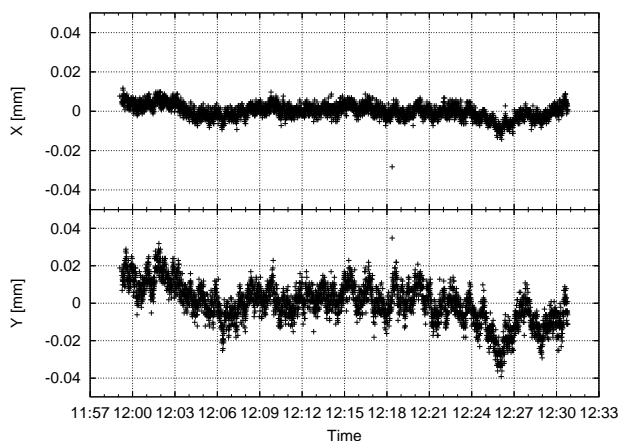


図 4: 加速器出口におけるビーム位置の時間変化 (フィードバックプログラム動作時)

におけるビーム位置の Y 座標の分布の標準偏差は、0.07mm から 0.04mm に改善されている。

5. まとめ

電子ビーム軌道を、中心軌道に長時間維持するために、中心軌道探索プログラムとビーム軌道フィードバックプログラムを作成した。中心軌道探索プログラムによって、加速器セクションに設置されている 4 台 BPM の較正ができる。これらの BPM からビーム位置と中心軌道とのずれを計測し、ステアリングコイルの励磁電流にフィードバックすることで、加速器出口でのビーム軌道と中心軌道の差を $40\mu\text{m}$ 程度に抑えることができた。

参考文献

- [1] T.Tanaka, et al., “日大リアックと光源の利用状況” This Proceedings.
- [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

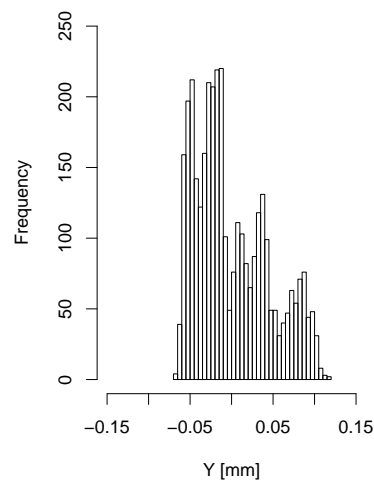


図 5: 加速器出口におけるビーム位置 Y 座標の分布 (フィードバックプログラム停止時) N=3600

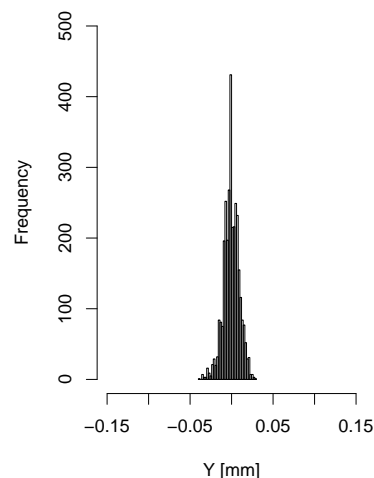


図 6: 加速器出口におけるビーム位置の分布 (フィードバックプログラム動作時) N=3600

Particle Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004

- [3] K.Hayakawa, et al., “LEBRA Linac の運転制御における BPM の活用” This Proceedings.