

コンパクト ERL における機械学習によるビーム光学の自動調整

AUTOMATIC TUNING OF BEAM OPTICS BY MACHINE LEARNING IN COMPACT ERL

神尾彬^{A)}、加藤政博^{#, A), B), C)}、島田美帆^{B), D)}、宮内洋司^{B), D)}、帯名崇^{D)}

Akira Kano^{A)}, Maahiro Katoh^{#, A), B), C)}, Miho Shimada^{B), D)}, Hiroshi Miyauchi^{B), D)}, Takashi Obina^{D)}

^{A)} Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima Univ.

^{B)} HiSOR, ^{C)} UVSOR, ^{D)} KEK

Abstract

The energy recovery linac (ERL) is a new concept accelerator that recovers energy from the electron beam accelerated by the superconducting linear accelerator and then uses it to accelerate the next beam. At KEK, a compact ERL (cERL) was constructed as a test machine, and researches and developments are being promoted. In cERL, beam optics tuning is important to prevent beam loss and quality deterioration in the arc sections, and the optics tuning is the most time-consuming and requires skill. In this study, aiming at manpower saving and automation of cERL operation, we tried automatic adjustment of beam optics using Bayesian optimization, which is a kind of machine learning. As the objective function, the difference between the electron beam sizes obtained from screen monitors and the design values is evaluated, and the quadrupole strengths are set to minimize it.

1. はじめに

エネルギー回収型リナック(ERL)は、超電導直線加速器で加速した電子ビームを周回させた後、再び超電導加速器を通してそのエネルギーを回収し、これを次のビームを加速するために利用する新しい概念の加速器である。KEK ではその実証機としてコンパクト ERL (cERL) が建設され、研究開発が推進されている[1]。

cERL においては周回部でのビームの損失や品質の劣化を防ぐためにビーム光学調整が重要であり、運転調整において最も時間がかかるとともに熟練も必要とされる。なかでもアーク部の光学調整では、アーク部の四極電磁石は分散関数の調整専用で使用されるためベータatron関数の調整にはアーク部より手前の四極電磁石のみでアーク部全体のビームサイズを調整する必要があり、特に困難な部分である。cERL の光学調整の例を Fig. 1 に示す。

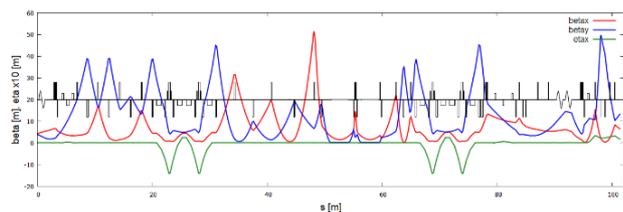


Figure 1: cERL の光学調整例。

そこで、本研究では、機械学習の一種であるベイズ最適化を用いてこのアーク部の光学調整の自動化を試みた。ベイズ最適化は、ガウス過程を用いて少数標本から確率的に未知関数を求める手法である。グリッドサーチと比較して少ない観測点から未知関数の最大値(最小値)を求めることができる。

2. 磁石の応答測定

光学調整の前に励磁電流値に対する磁場強度を精度よくわかっている必要がある。低エネルギー加速器であるため、実際に現場に設置した状態での磁場が重要である。このため、実際の電子ビームの応答を観測することで電磁石の磁場強度を測定した。

2.1 ステアリング

cERL の四極電磁石には、水平垂直方向の軌道調整用にステアリングコイルが設けられている。このコイル電流値に対するスクリーンモニタ上でのビームの位置の変化量を計測し、磁場測定値から予想される変化量からのずれと比較することで磁場精度を確認した。

2.2 四極電磁石

四極電磁石の応答測定は以下の手順で行った。

- ① 四極磁石上流のステアリング電流値を正弦波的に変化
- ② スクリーン上でのビームの重心位置が動かない四極磁石の電流値を探索
- ③ このとき四極電磁石とスクリーン間距離は焦点距離の関数として表すことができるとして K 値を確認

2.3 結果

上記のようにして決定した磁場強度をプローブによる磁場測定結果からのずれをとって表したものを Table 1 にまとめた。これらは想定された値との比であり、1 および -1 に近いほど設計値通りの値であるということになるが、10%に近い誤差が確認された。ステアリングでは本来キック応答が出ないはずの H-V 応答でもわずかにキック力が観測された。スクリーンモニタの計測のタイミング誤

mkatoh@hiroshima-u.ac.jp

差が影響している可能性も考えられるが、計測時のヒステリシスの影響で誤差が生じた可能性が高い。実際、ヒステリシスの影響と思われるビーム形状の変化も観測されており (Fig. 2)、これはオプティクス調整においても無視できないほど大きい。磁場応答の測定やオプティクス調整では、一定のヒステリシスループに沿って電流値を変化させる必要があることがわかった。

Table 1: ビームによる磁場性能評価結果

	Horizontal	Vertical
ステアリング	1.065	-0.918
四極磁石	1.12	1.03

3. ベイズ最適化によるビーム形状最適化

本研究では機械学習の有効性を確認するために、四極電磁石を用いたビーム形状最適化にベイズ最適化の手法を適用してみた。その手順の概略は以下の通り。

- ① 複数の電磁石に指定した電流値を(一定のヒステリシスループに沿って)設定
- ② スクリーンモニタ画像を取得
- ③ 画像からガウスフィットによってビーム幅を計算し、評価関数を算出
- ④ ガウス過程で評価関数の事後分布を更新し、平均と分散を推定
- ⑤ 推定した平均と分散から LCB 獲得関数を計算し、次に入力する電磁石の電流値を決定
- ⑥ ①~⑤を規定回数繰り返し、最も評価関数が低かった電磁石の電流値に設定する。

3.1 四極電磁石2台でのビームサイズ最適化

まず、四極電磁石 2 つを使ってすぐ下流のスクリーンモニタでのビーム形状最適化を試した。あらかじめ計算で設定した設計値から ± 0.1 A の探索範囲で目標のビームサイズを pixel サイズで (3,3) とし 40 回の試行回数でどれだけ近づけられるかを調査した。結果として pixel サイズで (2.98, 2.86) に到達することが確認できた。

3.2 四極電磁石 4 台でのアーク部のビーム形状最適化

次にアーク部前の四台の四極磁石でアーク部の三台のスクリーンモニタを設計値に調整させた。探索範囲は設計値から ± 0.1 A で 40 回の試行回数で目標にどれだけ近づけられるか試した。結果としては Table 2 に示す通り 40 回の試行回数でもそれなりの精度で調整することができた。しかし、実用上は大きな問題がある。スクリーンモニタは約 0.3 秒に一枚の頻度で画像が更新されるが、一度の評価関数の導出にはこれを 5 枚平均して使用したが、この場合、合計 5 秒程度かかった。さらに四極電磁石の電流値を変えるときに、一定のヒステリシスループに沿って電流を設定することからある電流値から別な電流値に変更するのに時間がかかる場合がある。これらの要因で 40 回の試行だけでも全体で 30 分ほどかかった。

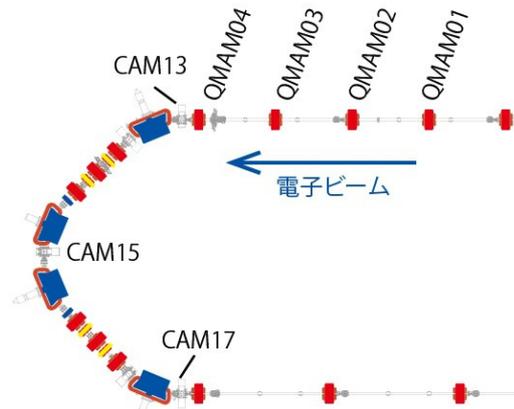


Figure 2: 四台の四極電磁石 (QMAM01~04) とアーク部にあるスクリーンモニタ (CAM13,15,17) の配置の図。

Table 2: ビームサイズ調整結果

	CAM13	CAM15	CAM17
目標	(1.8,9.0)	(10,6)	(19.2,22)
結果	(1.7,8.9)	(11.3,5.5)	(20.0,22.3)

4. まとめと今後の展望

cERL でのベイズ最適化によるビーム形状最適化を行い、ベイズ最適化がオプティクス調整に有効であることを示すことができた。しかし、実用化には、調整時間の短縮が必要である。その原因の一つはヒステリシスループに乗るように電磁石の電流値を変更していたことであった。ヒステリシスを含めた電流と磁場の応答を機械学習により行うことができる可能性が示されており[2]、これを取り入れることを検討している。

謝辞

本研究は KEK 加速器科学総合育成事業の支援のもと実施された。また、学生の派遣においては、KEK の特別共同利用研究員の制度を活用した。cERL における実験では cERL チームの皆さんに様々な形でご指導いただいたことに感謝します。

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, "Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK", Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A, 877, p.197-219 (2018).
- [2] R. Roussel *et al.*, "Differentiable Preisach Modeling for Characterization and Optimization of Accelerator Systems with Hysteresis", Phys. Rev. Lett. 2022, 128, 204801.