

機械学習を用いた高強度一次ビームのイオン光学系の自動調整の開発 DEVELOPMENT OF AUTO TUNING SYSTEM OF ION OPTICS FOR HIGH INTENSITY PRIMARY BEAM USING MACHINE LEARNING

西 隆博^{*A)}, 岩井 瑛人^{B, C)}, 内山 暁仁^{A)}, 清水 陽平^{A)}, 杉本 崇^{B, C)}, 鈴木 宏^{A)},
竹田 浩之^{A)}, 福田 直樹^{A)}, 福西 暢尚^{A)}, 藤井 洋樹^{A)}, 前坂 比呂和^{C)}, 吉本 雅浩^{A)}

Takahiro Nishi^{*A)}, Eito Iwai^{B, C)}, Akito Uchiyama^{A)}, Yohei Shimizu^{A)}, Takashi Sugimoto^{B, C)}, Hiroshi Suzuki^{A)},
Hiroyuki Takeda^{A)}, Naoki Fukuda^{A)}, Nobuhisa Fukunisi^{A)}, Hiroki Fujii^{A)}, Hirokazu Maesaka^{C)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}
^{A)} RIKEN Nishina Center, ^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute, ^{C)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

At RI Beam Factory, RIKEN, we are developing an auto tuning system of ion optics of primary beam line using Gaussian process regression. We have conducted test experiments using low-intensity (~ 0.001 enA) beams, and succeeded in improving the transmission efficiency by a few percent keeping a small beam spot using a fluorescent target. We also tested a new tuning method using uranium ions with different charge states for a high-intensity beam.

1. はじめに

理化学研究所の RI Beam Factory (RIBF) [1, 2] は 2006 年より運転を開始した多段サイクロトロンシステムによる重イオン加速器施設である。現在では 100 pnA を超えるウランを始めとした多様な重イオンビームによって世界の原子核物理学を牽引している。将来的には 1 ~ 2 pμA を目指しているが、そのような大強度ビームを制御する時に重要になるのが高度なパラメータ制御である。RIBF では四重極磁石やステアラー、リバンチャー、RF 電圧、位相など 600 を超えるパラメータを手動で調整している。10 年以上の経験からそれらのパラメータを最適化することで現在のビーム損失は局所的にはおよそ数 % まで改善しているが、将来的な目標である 1 pμA を超えるビームを制御するにはその時々々のビーム状態に合わせてさらなるパラメータ調整を行い、0.1 % 程度のビーム損失に抑える必要がある。そこで我々はパラメータの高精度かつ常時最適化システムの構築を目指し、機械学習を用いたパラメータ自動最適化を RIBF に導入するための研究を行なうことにした。

2. 手法

本研究で我々が採用したのは SPring-8 の SACLA で開発されたガウス過程回帰を用いた逐次学習による自動調整プログラム [3] である。このプログラムでは学習データからガウス過程回帰によって未知のパラメータに対する評価関数の値を誤差と共に推定する。その結果を元に、よりガウス過程回帰による推定を高精度化する可能性の高いパラメータを計算し、適用する。その結果得られた評価関数の値からさらに学習し、次のパラメータを計算するということを繰り返す逐次学習プログラムである。SACLA では既に XFEL の強度を指標として RF 位相や磁気レンズなどの最大 15 パラメータの同時最適化に成功しており、通常オペレーションに組み込まれている。我々はこの自動調整プログラムを RIBF に応用し、一次ビームのイオン光学系の自動調整システムを開発することにした。

3. 理研 RIBF における機械学習の導入

SACLA で開発されたガウス過程回帰による最適化プログラムは外部の検出器などと応答する部分と機械学習によってパラメータを最適化する部分で別れている。そこで外部と応答する部分を書き換え、RIBF において機器のコントロールに用いられている EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [4] と通信できるようにした。想定されるフローは以下ようになる。(a) プログラムが指定したパラメータを EPICS により電磁石などに適用する、(b) 検出器などで測定したビーム強度やビーム幅などを EPICS を通してプログラムに渡す、(c) 検出器などから渡された値から評価関数を計算し、最適化プログラムによって次のパラメータ候補を選定する。これらをビームを照射し続けた状態でを行い、一次ビーム光学系を最適化する (Fig. 1)。

RIBF への自動調整システム導入の第一歩として、一次ビームライン最下流の光学系の最適化を試みた (Fig. 2)。このビームラインは多段サイクロトロンの最下段である Superconducting Ring cyclotron (SRC) から供給される重イオンビームを二次ビーム生成標的まで輸送するビームラインであり、17 の四重極磁石などで構成されている。このビームラインはすぐ下流に Fragment

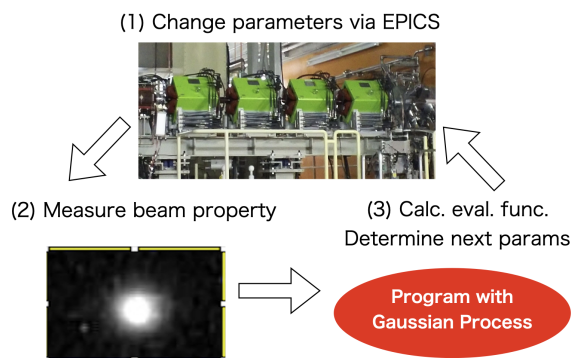


Figure 1: Schematic of auto tuning system for primary beamline using EPICS and Gaussian process regression.

* takahiro.nishi@riken.jp

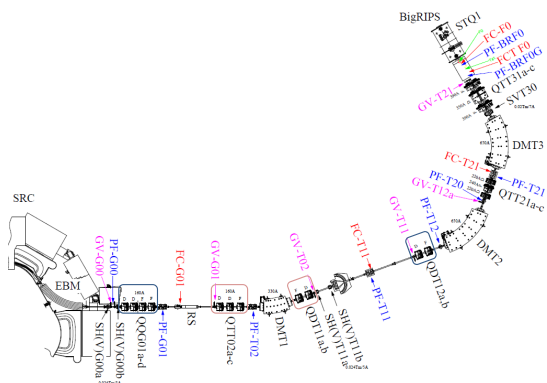


Figure 2: Top view of a beamline from SRC to a target. The beam line contains 3 dipoles, 17 quadrupoles and 5 steerers. FC, PF and GV denote Faraday Cup, ProFile monitor or wire scanner, Gate Valve, respectively. QQ, QT and QD represent quadrupole quintet, triplet and doublet.

Separator である BigRIPS [5] があり、BigRIPS 中の飛行検出器やシンチレータから得られる情報を利用出来るという点で新システムの導入テストに適していると考えられた。

またこのビームラインの光学系は将来的には改善する必要がある。現在の通常オペレーションでは最もビーム損失の大きいウランビームの場合通過効率が 90% 程度であると見積もられている。この値は現在の強度であれば特に問題のない値だが、将来的な目標である $1 \mu\text{A}$ を超えるウランビームに対しては不十分であり、ビーム損失を現在の $1/10 \sim 1/100$ にする必要がある。同時に、質の良い二次ビーム生成のためには標的上でのビームの像幅も小さくしなければならない。このため、複数の指標を同時に最適化するという複雑な調整となり、機械学習による自動調整に適した課題となっている。

本研究はこれまで、(1) 蛍光標的を用いた低強度ビーム用の自動調整システムの開発、(2) 荷電変換粒子を用いた高強度ビーム用の自動調整システムの開発、という 2 段階で行われてきた。RIBF では強度を下げるのにアテネータを使用しており、空間電荷効果などにより強度によってビームの質が変わってしまうことが知られている。そこで最終的には大強度ビームでも使える自動調整システムを構築することを目標にしている。以後、これらの自動調整システム実現のためにビームを用いて行われたテストについて報告する。

4. 低強度ビーム用自動最適化テスト: 蛍光標的を用いた調整

まず低強度ビーム用の自動最適化のテストを 2020 年 10 月に行った。この時一次ビームは 325 MeV/u に加速された U^{86+} であり、最大強度は $117 \mu\text{A}$ を記録している。実験はアテネータによって 0.001 nA 程度に抑えられた faint ビームを用い 12 時間程度行われた。低強度ビーム用のモニターとしては、通常の手動調整時にも用

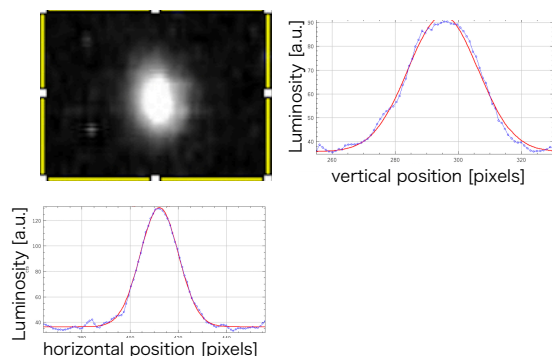


Figure 3: Example picture of the beam on the viewer by a CCD camera. The picture is projected to horizontal and vertical axes. The projected histograms are fit by Gaussian using ImageJ. These fit results are utilized to calculate evaluation function as shown in Eq. (1).

いられるアルミナ製の蛍光標的を用いた。通常の手動調整では二次粒子生成標的の代わりに蛍光標的を挿入し、その画像を CCD カメラによってリアルタイムに見ながら四重極磁石の電流値を調整している。この二次元画像データを ImageJ を用いて画像解析を行い、水平方向と垂直方向に射影した上でガウス分布でフィットし光の強度と像幅を測定した (Fig. 3)。このようにして得られた値を EPICS を通してプログラムに取り込み、評価関数に取り入れた。評価関数としては、通過効率の向上と標的での像幅の減少を目指し

$$f_{\text{eval}} = \frac{(\sigma_H - 0.5 \cdot \sigma_H^0)^2 + (\sigma_V - 0.5 \cdot \sigma_V^0)^2}{0.5^2} - 2 \cdot (N_H * \sigma_H + N_V * \sigma_V) \quad (1)$$

というものを採用した。この値がより小さくなるようにパラメータを最適化した。ここで σ はフィットしたガウス分布の標準偏差を表し、 N は規格化定数を表す。 H 、 V はそれぞれ水平、垂直方向に対応する。さらに右肩の 0 の添字は最適化前の値を表す。像の幅についてはある程度細かいほうが二次ビームのエミッタンスを小さくすることが出来るため好ましいが、際限なく細くなることを防ぐために初期値の半分を目標値とすることになっている。像幅と光の強度の評価関数に対する相対的な寄与は実際に実験を行う中で決めているが、まだ最適化の余地が残されている可能性はある。

この実験で用いたプログラムでは一組のパラメータを適用し評価関数を見積もるまでのプロセスを 1 ~ 2 秒で完了していた。評価関数がある程度収束し最適化が完了するまでの時間は 100 ~ 150 試行程度、すなわち 5 分弱であった。実験ではまず、標的直前の三連四重極磁石 (QTT31 / Fig. 2 参照) の電流値を手動最適化後の値から大きく ($\sim 20\%$) 変えて評価関数を悪化させてから最適化プログラムを適用し、評価関数を元の水準に戻すテストを行った。その結果、最適化プログラムによって評価関数が電流値の変更前と同程度かそれ以上に改善されることが確認された。この際、必ずしもそれぞれの電流値

が変更前の値に戻ったわけではなく、手動最適化とは異なる解を見つけていたことが分かっている。次にコントロールする電磁石やコントロールする数を変えて最適化のテストを行った。その結果、標的直前の三連四重極磁石及びビームライン中程の三連四重極磁石 (QTT31 及び QTT02 / Fig. 2 参照) の 6 つの四重極磁石を最適化したときに最も評価関数を改善することに成功した。なお、コントロールする磁石を 10 まで増やした場合にも問題なく最適化プログラムが動作することは確認できたが、時間の制約上十分に最適化出来なかったため、この実験では参考データに留めている。

この 6 つの電磁石を最適化して得られた光学系が実際に通過効率及び像幅を向上させていることを確認するため、一次ビームの強度を上げ、上流ファラデーカップ及び下流ビームダンプによって通過効率を確認した。同時にワイヤースキャナーを用いて標的直前の像幅も測定した (Table 1)。表に示されるように、自動最適化プログラムによる導入によって通過効率は手動最適化後の光学系から 2 % 増加、像幅は 13 % 減少した。すなわち通過効率と像幅の同時改善に成功したと言える。しかしながら、蛍光標的を用いた本手法は蛍光標的が焼きつくのを防ぐため 0.001 enA 程度のビームにしか適用できないという本質的な問題を抱えている。そこで我々は次に解説する高強度ビーム用の自動調整システムの開発をすすめることにした。

Table 1: Transmission efficiency and beam size. The values are evaluated for manually optimized parameters and for parameters optimized by the automatic tuning program with Gaussian process regression. Due to imperfect calibration, the downstream current is larger than the upstream current, and only the relative values are reliable.

	Manual Optimization	GP Optimization
I_{upstream} [e μ A]	7.20	7.8
$I_{\text{downstream}}$ [e μ A]	7.25	8.0
$I_{\text{down}} / I_{\text{up}}$	1.01	1.03
σ_{H} [mm]	0.77	0.67

5. 高強度ビーム用自動最適化テスト:荷電変換粒子を用いた調整

大強度ビームにも使える指標として、我々は荷電変換粒子を用いた手法を考案した。これはウランビームを 1 mm の Be 標的に当てることで荷電変換粒子を生成し、その粒子の像幅及び強度を一次ビームの光学系調整の指標にする手法である。荷電変換粒子の生成後二重極磁石を通過した後の位置にスリットを配置することで特定の電荷の粒子を選別し、下流検出器で測定する。Figure 4a は 1 mm の Be を入射した際の粒子のスリット位置での分布を表す。この図に示されるように、荷電変換によって生成された粒子はその電荷によってその生成率が大きく変わる [6]。そこでビームラインの $B\rho$ を適切な値に調整することで、一次ビームの強度が 0.001 enA から 10 enA まで変化しても常に下流では 4 kcps 程度の粒子を

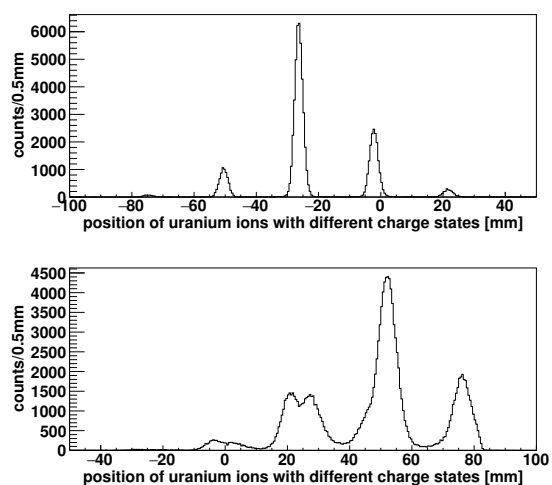


Figure 4: Position distribution of uranium ions with different charge states at slit position. The dispersion at the place is about 20 mm/%. (a) With 1 mm-thick Be target. The peaks correspond to U^{92+} , U^{91+} , U^{90+} , U^{89+} and U^{88+} from right side, respectively. (b) With 1 mm-thick Be and fluorescent target. The peaks correspond to U^{91+} , U^{90+} , U^{89+} and U^{88+} from right side, respectively. U^{92+} particles are cut by slit.

選択し、event-by-event での測定が可能となる (Table 2)。

この手法実現のための第一歩として、2020 年 12 月及び 2021 年 5 月にそれぞれ 6 時間、12 時間のテスト実験を行った。これらのテストでは蛍光標的を併用しつつ、蛍光標的の裏に貼り付けた 1 mm の Be によって生成された荷電変換粒子の強度を標的下流のプラスチックシンチレータで測定し、指標とする方法を採用した。

まず 12 月に行なったテストでは亜鉛ビームを用いて手法の検証を行ったが、このときには 2 つの要因からパラメータの最適化が収束しなかった。要因の 1 つはビーム強度の長期シフトである。シンチレータで粒子数を計測する関係上、評価関数の見積もりには 5 秒程度必要であった。その結果収束までの時間も長くなり、ビーム強度のシフトが無視できなくなったと考えられる。この時、10 分で 5% 程度の変動が見えている。もう一つの要因はサイクロトロン EDC などの放電によると思われるビーム強度の瞬間的な急落である。このビーム強度の急落は瞬間的に復帰するものの、そのタイミングで適用していた電流値に対し評価関数を見誤ることで学習を妨

Table 2: Expected rate and rigidity of uranium ions with different charge states. The primary beam is U^{86+} and the target is 1 mm-thick Be. The particle rates are estimated as values at a downstream scintillator.

	U^{89+}	U^{88+}	U^{87+}
Primary beam current [enA]	0.001	0.03	10
$B\rho$ [T·m]	7.55	7.63	7.72
Particle rate [count per seconds]	4k	4k	3k

げることになったと考えられる。

そこでこれらの問題を解決するために、最適化プログラムに対して以下の2点の改良を行った:

(1) ビーム強度の長期シフト対策

評価関数を見積もる際に新しいパラメータと初期パラメータを交互に適用し、それぞれの評価関数の値の比率を新しい評価関数として自動調整プログラムに用いる。

(2) ビーム強度の急落対策

シンチレータによるカウント数を複数回測定し、その標準偏差が統計的に予測される値に比べ著しく大きいときには再測定する。

これらの改良プログラムを適用し、改めて2021年5月に実験を行った。この実験では2020年10月と同じく325 MeV/uに加速された U^{86+} を用いた。プログラムの改良によって一つの電流値の組み合わせに対する評価関数の見積もりにおよそ20秒、一度の最適化には20分以上の時間が必要となったが、最大で7つの電磁石に対しての同時最適化を安定して行えることを確認した。

次に大強度ビームによる通過効率の確認を行った。その結果、手動最適化による光学系では上流/下流の電流値が6.00/6.25 e μ Aであったのに対し、自動最適化による光学系では6.00/5.65 e μ Aという値が得られた。すなわち自動最適化プログラムによって通過効率が悪化しており、評価関数が正しく通過効率の指標となっていなかったことを意味する。

この原因を探るため、スリット位置での荷電粒子分布を位置検出器によって測定した結果がFig. 4bである。Figure 4aと比較すると、各価数の粒子の位置広がり1 mmのBeのみを標的として使用した場合に比べ倍以上広がっていることが分かる。これは蛍光標的の厚さが非一様であり、運動量広がりが大きくなったことに由来する。その結果、光学系の変化によるスリットの通過率の影響が無視できなくなり、下流シンチレータのカウント数が一次ビーム強度の良い指標ではなくなったと考えられる。この問題を解決するため、今後は標的を1 mmのBe単独とすることでスリットに十分な余裕をもたせて粒子を選別し、下流飛程検出器であるPPAC [7]を用いて像幅を推定する手法を採用していきたいと考えている。

6. まとめと今後の展望

我々は理研RIBFにおいて、より高度なパラメータ最適化を目指し機械学習を用いたパラメータ調整の研究を行っている。その第一歩として一次ビームラインの最下流に対し、SPring-8 SACLAにおいて開発されたガス過程回帰を利用した逐次学習プログラムを利用し自動最適化システムの構築を試みた。蛍光標的を用いた低強度ビーム用の自動最適化システムでは像幅を細く保ちつつ2%の通過効率の向上に成功している。荷電変換粒子を用いた高強度ビーム用の自動最適化システムでは安定した最適化プログラムを作成できた一方で、指標としている荷電変換粒子の測定システムに未だ問題があり、次回以降のテスト実験で解決を目指していく。今後は最下流ビームライン以外にもこのシステムを適用し、汎用的な自動ビーム調整システムを構築していきたいと考えて

いる。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B 261, 1009 (2007).
- [2] H. Okuno, N. Fukunisi and O. Kamigaito, Prog. Theor. Exp. Phys. 03C002 (2012).
- [3] E. Iwai, T. Sugimoto, Y. Joti, K. Kubota, Y. Tajiri, H. Maesaka, T. Inagaki, T. Hara and H. Tanaka, PASJ2021, paper WEOB02 (2021).
- [4] <https://epics.anl.gov/>
- [5] T. Kubo, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 204, 97 (2003).
- [6] D.S. Ahn, H. Suzuki, N. Fukuda, Y. Shimizu, H. Takeda, K. Yoshida, Y. Yanagisawa, N. Inabe and T. Kubo, RIKEN Accel. Prog. Rep. 52, 133 (2019).
- [7] H. Kumagai, A. Ozawa, N. Fukuda, K. Sümmerer and I. Tanihata, Nucl. Instrum. Methods A 470, 562 - 570 (2001).