

KEK Injector Linac におけるビーム自動調整試験について

BEAM AUTOMATIC TUNING TEST AT THE KEK INJECTOR LINAC

夏井拓也[#], 佐藤政則
Takuya Natsui, Masanori Satoh
KEK

Abstract

In the KEK Injector Linac, four-ring simultaneous injection have been achieved, and beam adjustment is always performed in various beam modes. However manual beam adjustment is a burden for the operator. Therefore, we are trying to automate the beam adjustment. By treating the beam adjustment as a problem of minimizing multivariable functions, existing optimization algorithms can be used. We adopt EPICS as the control system in the Linac so that any control parameter or measurement can be handled with the same interface. Since EPICS is used as the control system in the Linac, arbitrary control parameters and measurements can be handled with the same interface, which is very useful for treating any parameter as a multivariable function. Then, the automatic adjustment is realized by using Bayesian optimization and the Downhill simplex method as the algorithm for minimizing multivariate functions. We have already had good results in testing the automatic adjustment. We will report on the implementation of automatic adjustments and some test results.

1. はじめに

KEK Injector Linac (KEK 入射器) においては、4-ring 同時入射を達成しており、日々様々なビームモードにおけるビーム調整が行われている[1]。ビーム調整は機器のドリフトなどからくる入射率の変化を最適な条件に戻すような調整で、ビーム状態を見ながら運転員が手動でマグネットの電流値などを調整している。入射器ではパルスマグネットによって様々なビームモードを同時に扱うことができるが、その分運転の負担は増えてしまう。本研究はこの調整を自動化するという試みである。多変数関数の最小化問題アルゴリズムの Downhill simplex 法 (Nelder-Mead 法) [2] やベイズ最適化[3]を利用して、多数の調整ノブを同時に調整することにより、人の手を介すること無くビーム状態を最適に保つことを目標としている。この自動調整の試験はすでに始められており入射器の一部調整では実用になりつつあるので、この結果を報告したい。

2. 最適化ツールの実装

調整とは、「機器のパラメータを変化させて理想状態に近づけること」だが、自動的にこれを行うには、そのパラメータと結果の数値を多変数関数とみなすことが重要になる。例えば、マグネットの電流値 $I[A]$ を x として、ビーム電荷量 $Q[nC]$ の逆数を $f(x)$ としてやれば、 $f(x)$ が最小になる x を探すという問題になる。これは、数値計算の分野では様々なアルゴリズムが存在しており(二分法やニュートン法など)、最適なアルゴリズムを選択すれば効率的に最適解を得られるはずである。

実際には、調整すべきパラメータは複数存在しており $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ という多変数関数の最適化アルゴリズムが必要になる。KEK 加速器では EPICS を使って機器を調整している[4]ので、どのような調整パラメータと測

定値でも同様なインターフェイスで取得することができる。これは、パラメータ調整をただの多変数関数 $f(x)$ として扱うのに実用上非常に都合がいい。我々は、どのような調整パラメータと測定データにおいても対応できるインターフェイスを作成し、どんな目的にも使える最適化ツールを作成した。目的を限定しないツールを制作できたのは大きな進歩だと思っている。

実際に、加速器をある種の変数関数 $y = f(x)$ とみなさなければいけないが、ここで変数に当たるベクトル $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ は複数の制御パラメータに当たる。数値 y は測定値から得られる最小化すべき数値である。したがって、 y は複数の測定値に何らかの演算処理を施した値になり、これをどのように定義するかで、自動制御の目標が決まる。よって、我々が決めるべきことは制御パラメータと測定パラメータ、そして最小化するための数値を得るための測定パラメータの演算方法である。一般に x のことを説明変数、 y のことを目的変数と呼ぶ。

例えば、複数のマグネットの電流値を制御して、ある点でのビーム位置 (p_x, p_y) を0付近に持っていき、かつ電荷量 Q を最大とするような制御をしたいとする。制御パラメータは電流値 x_1, x_2, \dots となる。測定値は p_x, p_y, Q となるが、これを使って y を

$$y = (p_x^2 + p_y^2) + \frac{1}{Q} \quad (1)$$

と定義する。このようにすると、加速器の制御が $y = f(x)$ の最小化問題として扱える。あとは、制御パラメータである x を変えつつ、測定値から y を計算して、アルゴリズムにより最適と思われる x を得て、また、その値を加速器に制御パラメータとして与えてやればよい。

実際には、最適化アルゴリズムとしてベイズ最適化法と Downhill Simplex 法のどちらかを使って最適化を行っている。

実装には Python を使用した。ベイズ最適化は GPyOpt [5] というライブラリを使用し、Downhill simplex 法は使いやすいうように自作コードで開発した。GUI 部分は

[#] takuya.natsui@kek.jp

PySimpleGUI を使用している。この GUI パネルのみで、EPICS になっている調整パラメータと測定値であればどのような調整でも行える。一度設定ファイルを作り保存しておけば誰でもいつでも同じ調整を再現できるようになっている。

図 1 に開発したツールのスクリーンショットを示す。

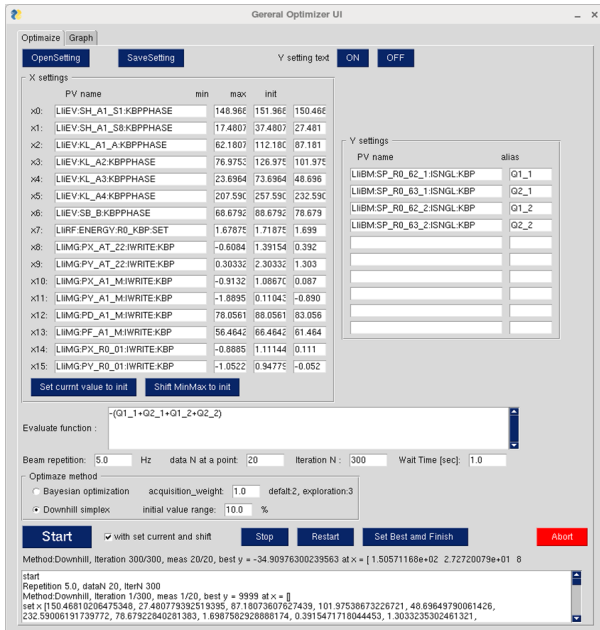


Figure 1: Optimization panel.

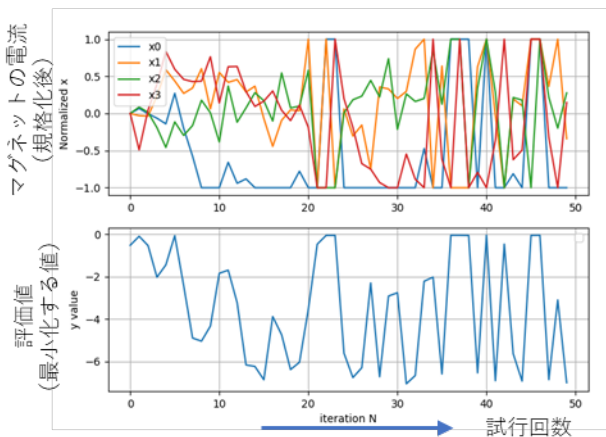


Figure 2: Graph of optimization in progress.

このパネル一つでどのような目的の自動調整もできるよになっている。X setting の部分で制御パラメータの EPICS PV とその範囲を決める。この制御範囲を決めることは実用上非常に大事で、探索範囲を限定することで思わぬ挙動を防いだり、探索の効率を上げたりできる。Y setting の部分は測定値の PV を決めている。Evaluation function の部分では Y setting で読み込んだ値を定義した alias を使って、任意の演算式を定義し、最終的な目的変数 y としている。これらを定義すれば、 y を最小化するように自動制御するためのアルゴリズムをベイズ最適化か Downhill simplex のどちらかを選んで Start ボタンを

押すと自動化が始まる。このように、原理的にはありとあらゆる自動制御が単一パネルで使用可能となっている。

図 2 は最適化の途中経過の例で、上段のグラフは、調整パラメータをどのように動かしたかを表している。この場合は、複数のマグネット電流を最大値と最小値で規格化した値でグラフにプロットしている。下段のグラフは評価値を表しており、試行回数を増すごとにだんだんと良い値になっていくことがわかる。

3. 最適化の実例

開発した最適化ツールはすでに様々な用途での試験を行っており、良好な結果を得ている。いくつかの事例を紹介したい。

3.1 陽電子生成量増加調整

入射器では、10 nC の一次電子ビームを加速しターゲットに当てることで陽電子を発生させるが、10 nC という大電荷を輸送し、ターゲットで集束するように optics を調整するには、通常多大な苦労があった。特に、様々な機器が絡むこの調整は、どこかの機器がドリフトを起こすと、容易に陽電子電荷量は下がってしまう。そこで、この調整に自動調整を導入してみた。

この陽電子生成には SHB 調整によるバンチ圧縮と Pulse Q-magnet、Pulse steering magnet の同時調整が必要になる。これら最大 16 パラメータを一気に調整することで、陽電子生成を向上させた。人の手では現実不可能な多数のパラメータ同時サーチで良いところが見つかった。

ベイズ最適化で広い空間を探索して、ある程度良いところが見つかったところで Downhill simplex によるファインチューニングを行った。この最適化の途中経過を図 3 に示す(図中の赤いプロットはそれまでの最適値を更新したことを表している)。図 3 のようにベイズ最適化ではつねに広い空間を探索していることが分かる。対して Downhill simplex では大きくパラメータを変えることはなく、徐々に良いところに向かっていく様子が見られる。

3.2 陽電子生成量増加 2 バンチ調整

入射器では 2 バンチでのビーム入射を行うこともあり、この場合 96 nsec 離れたバンチのビームを調整する。しかしながら、陽電子生成のための一次電子ビームでは上流から軌道の差異が生じてしまい、どちらのバンチもターゲットに当てることが困難になっている。これがまさに、図 4 の上段の状態、人の手で調整しても短期間ではうまく電荷量を上げられない。この状態から自動調整を行うと、図 4 の下段のようにきれいに電荷量が改善される。これは、軌道を合わせたわけではなく、ターゲットでなんとかして両方のバンチが合流するようにした結果である。このように調整の指標が明確では無い場合、人的調整よりも自動調整のほうが効率が良いことがわかった。

3.3 陽電子透過量調整

陽電子はターゲットで生成されたあとは、非常にエミッタンスが悪いため、ソレノイドマグネットで集束しながら加速したあとに、Q-magnet の FODO セルに入る。しかし、ソレノイドを出たあとのビームの Twiss parameter がうまく測定できておらずマッチングの不十分さからか、ビームの

電荷量が落ちてしまうという問題があった。また、ビームサイズが大きいため、軌道のズレでも電荷量のロスは発生してしまう。そのため、この調整には **Q-magnet** と **Steering magnet** の両方同時の調整が必要になった。ビームロスを低減するように上流から調整すれば良いが、調整するマグネットの数が膨大であり、限られた時間に人が調整するのは難しいところであった。ここでも自動調整を適用させたが、マグネット数が膨大だったため、上流から区間を具切った調整を行った。事前に 15 個の設定ファイルを作成して、調整時は機械的にそれを上流から実行していただくにした。狙い通り上流から徐々にビームの透過量が改善していき、最終的には 20% 程度の電荷量の増加になった。これは、SuperKEKB の性能向上に非常に大きく貢献できると考えられる。

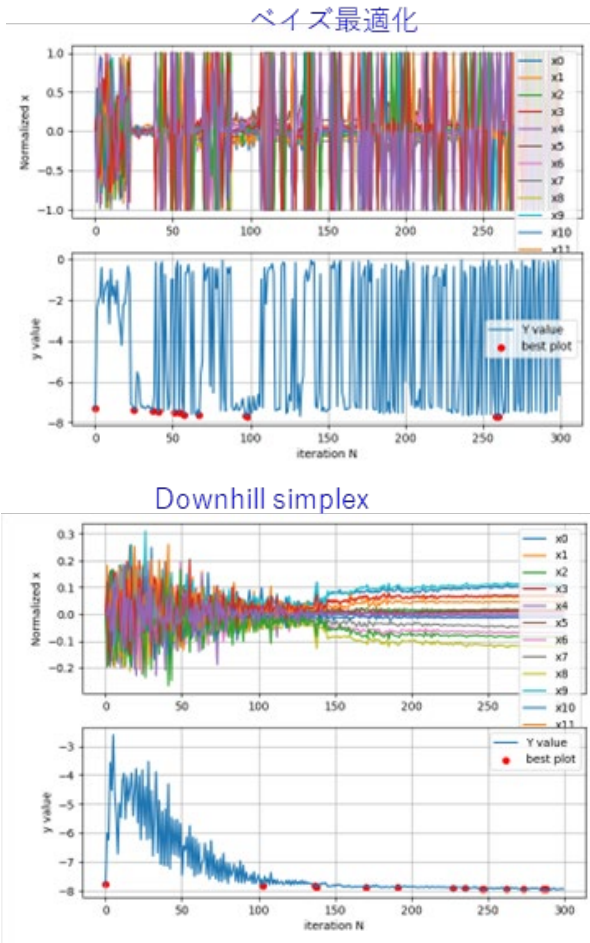


Figure 3: 16-parameter optimization with Bayesian optimization and Downhill simplex method.

4. まとめ

KEK 入射器では、ビーム調整にベイズ最適化と Downhill simplex 法を用いた自動調整の導入を検討している。試験では非常に良好な結果を得ている。入射器では EPICS を制御システムとして使っており、その EPICS 経由で制御と測定を行うような自動制御にしてい

るのでどのような目的の調整についても自動調整が可能になった。当初は時間がかかっても普段人が行うような調整の代替として使えるようになれば良いという程度に考えていたが、複雑な調整においては人の調整を質、速さともに上回るようなこともあった。試験では、予想を上回る成果が出たと思うので、今後 SuperKEKB 入射ビームの調整などで実際に使っていきたいと考えている。

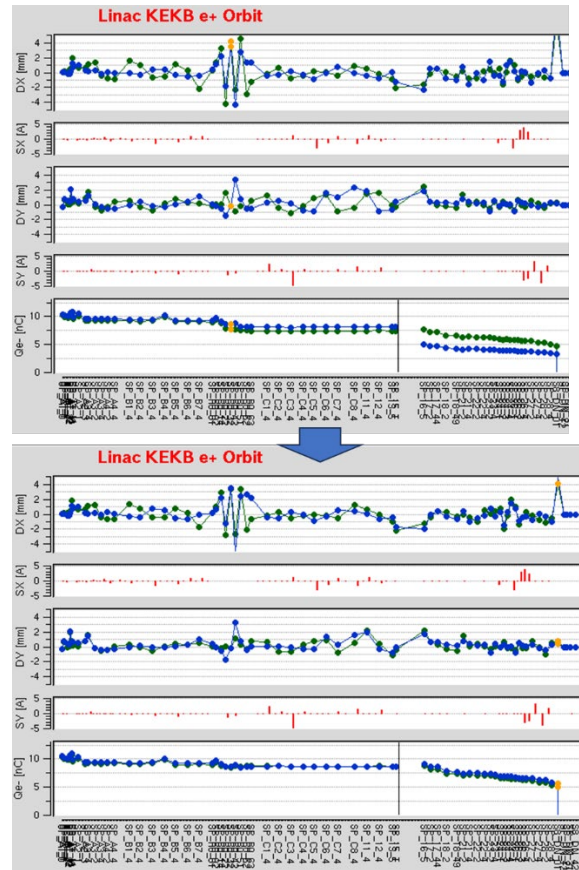


Figure 4: Two bunches adjustment result. (Blue plot: first bunch. Green plot: second bunch.)

参考文献

- [1] Y. Enomoto *et al.*, “Pulse-to-pulse Beam Modulation for 4 Storage Rings with 64 Pulsed Magnets”, in *Proc. LINAC'18*, Beijing, China, Sep. 2018, pp. 609-614.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Nelder%E2%80%93Mead_method
- [3] 持橋大地, 大羽成征 (2019). *ガウス過程と機械学習* 講談社.
- [4] S. Kusano *et al.*, “Control system using epics tools at KEK linac”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, August 1-3, 2007, Wako Japan, pp.369-371.
- [5] <https://sheffieldml.github.io/GPyOpt/>