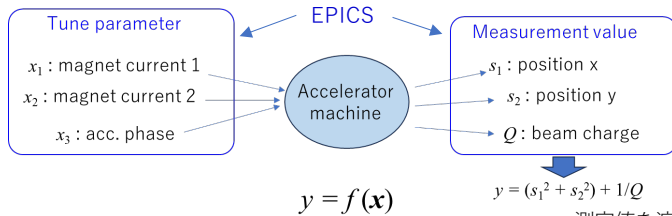


# FRP47 KEK Injector Linacにおけるビーム自動調整試験について

夏井 拓也, 佐藤 政則 (KEK)

KEK Injector Linac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。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法やベイズ最適化を利用して、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。

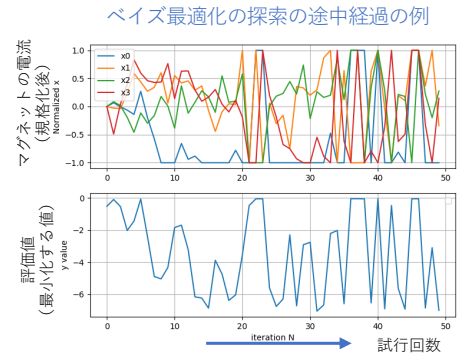
**調整とはなにか?** これは、「機器のパラメータを変化させて理想状態に近づけること」だが、自動的にこれを行うには、そのパラメータと結果の数値を多変数関数とみなすことが重要になる。例えば、マグネットの電流値[A]をxとして、ビーム電荷量Q[nC]の逆数をf(x)としてやれば、f(x)が最小になるxを探すという問題になる。



実際には、調整パラメータは複数存在しておりf(x1, x2, x3, ... xn)という多変数関数の最適化アルゴリズムが必要になる。

この形の最小化問題になればベイズ最適化とDownhill Simplex法(Nelder-Mead法)などが使える (f(x)は未知)

測定値を演算して最小化する数値を定義する必要がある。



## 実装

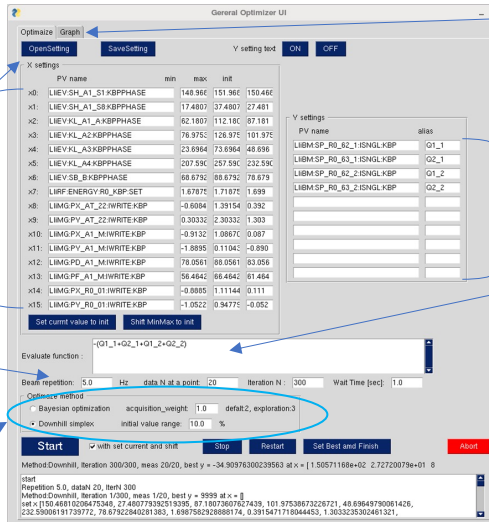
実装はPythonを使った。ベイズ最適化はGPyOptというライブラリを使用。Downhill simplexは使いやすいように自作コードで開発した。UIはPySimpleGUIを使用。

設定ファイルを読み出すだけで誰でも同じような調整ができる。

EPICSレコードから調整パラメータを設定できる。また、最小値と最大値を決めて調整範囲を指定できる。初期値も与える事ができる。

基本的な設定 (何回イテレーションを行うかなど)

ベイズ最適化がDownhill simplexのどちらで最適化するかを選べるようになっている。



最適化途中経過はGraph タブで見られるようになっている。

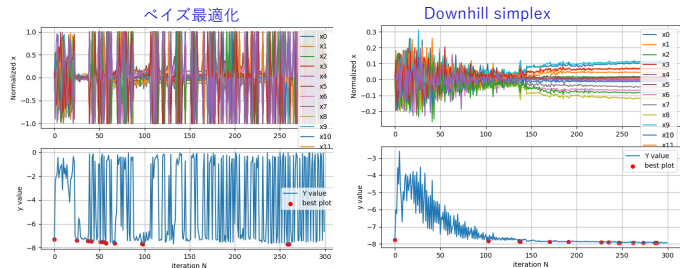
最適化する関数値(x)を作る。まずは、測定する値をEPICSレコードから選ぶ。

次に、最小化を目指す値を定義する。これは、測定値を自由に組み合わせて式で定義することができる。非常に柔軟に目的関数を指定できる。例えば、ビーム軌道を中心を持っていきながら電荷量上げるなどの設定も自由に決められる。

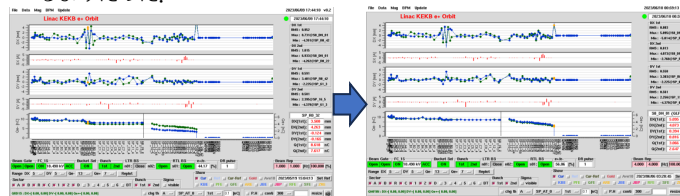
このGUIパネルのみで、EPICSになっている調整パラメータ、測定値であればどのような調整にも使える。一度設定を作りファイルに保存すれば誰でもいつでも同じ調整を再現できる。

## 陽電子生成量増加調整

陽電子生成にはSHB調整によるパンチ圧縮とPulse Q-magnet, Pulse steering magnetの同時調整が必要になる。これらを最大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によるファインチューニングを行った。

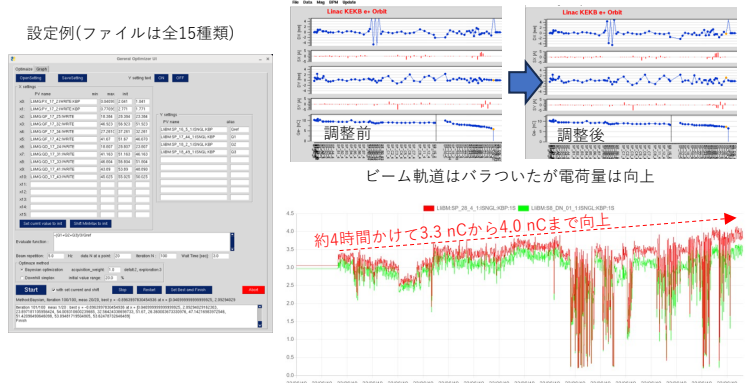


陽電子生成2パンチ同時調整でも効果があった。人が調整する場合は調整の指標さえなかった調整だが、結果しか見ない自動調整がむしろ向いているようだった。



## 陽電子透過量向上調整

Q-magnetとSteering magnetを透過量が増えるように上流から調整していく。すべてのマグネットを調整するように設定ファイルをいくつも作って上流から調整を実行していく。(人の手でやるのは苦行) ビームのTwiss parameterを測定して計算値を入れても透過率が向上しなかった部分が、自動調整で透過量が向上した。(かなり計算値に近づいた)



まとめ KEK入射器では、ビーム調整にベイズ最適化法やDownhill simplex法などのアルゴリズムを使い自動調整を試している。2023年の前半はSuperKEKBへの入射がない期間であったため、この自動調整の試験を多く行うことができた。その結果、日々の微調整などは十分に人に代替できるという結果になった。また、調整が難しい2パンチ同時調整や陽電子透過量増大試験などは、人の行う調整よりも良好な結果を得ている。入射器の制御はEPICSベースで作られており、EPICSで制御できるものであればどのようなパラメータ、目的においても使用できるツールが開発できた。誰でも使いやすいようにUIも整えたのつもりなので、今後の運転で広く活用していきたい。