加速器パラメータ最適化のための GUI ツール開発

DEVELOPMENT OF A ACCELERATOR SIMULATION GUI TOOL FOR THE PARAMETERS OPTIMIZATIONS

永井 良治 *A)、宮島 司 B)
Ryoji Nagai* A), Tsukasa Miyajima B)
A) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)
B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Simulation code of Parmela, GPT, etc. is used for design and development of an accelerator and operation support. The optimization of parameters of accelerator elements using these cords wasn't convenient. For the efficiently parameters optimization, a GUI tool has been developed. We report here on the state of the GUI tool development.

1. はじめに

近年の加速器、例えば、次世代の放射光源用加速器として期待されているエネルギー回収型リニアックでは、従来の蓄積リング型加速器より小さなエミッタンス、非常に短いバンチ長といった特徴を持つ電子ビームの生成が可能である。この様な電子ビームを生成する加速器を実現するには、電子源で発生した低速の電子ビームが光速の電子ビームとなるまでの、バンチング、加速の過程での電子ビームの挙動を十分に理解するが必要である。しかし、この過程には多数の加速器要素パラメータが寄与しており、さらに、空間電荷力の影響で電子ビームの挙動が複雑なものとなる [1]。電子ビームの挙動を客観的に理解するには、最適化された加速器要素パラメータ群をスタート点として、それぞれの要素の役割の理解や着目する要素以外のパラメータを最適化したうえで、その要素の挙動を理化するといったプロセスが必要不可欠である。

加速器の設計・開発・運転サポートには、Parmela [2]、GPT [3] などのシミュレーションコードが用いられている。加速器の設計・開発・運転のそれぞれの場面に応じて、ビーム挙動の理解や運転の最適化のために、各研究者が独自のスクリプトなど用い、Parmela、GPT などのコードを用いてパラメータの探索を行われており、効率的かつ簡便な環境はこれまで、提供されてこなかった。そこで、パラメータの最適化を効率的に行うためのに、最適化のための入力ファイル作成から、パラメータ最適化、結果の表示までを行うツールのとして、開発を進めている GUI ツールについて報告する。

2. GUI ツールの概要

GUI ツールの機能は、Fig. 1 に示すように、Parmela、GPT などの加速器のシミュレーションコードの入力ファイルを作成し、シミュレーションコードを呼び出し実行、シミュレーション結果の表示および、加速器パラメータの最適化である。GUI ツールの作成には GUI の作成が容易で、様々な OS での利用が可能な開発環境として Lazarus [4] を用いた。Lazarus は、クロスプラットフォームのビジュアルプログラミング統合開発環境であり、オープンソースの Pascal コンパイラである Free Pascal 向けに開発されたものである。ただし、Parmela については、その利用環境が MS-Windows であることから、GUI の利用環境も MS-Windows に限定せざるを得ない。現在は、利用する加速器シミュレーションコードを Paramela に限定し、MS-Ｗｉｎｄｏｗｓ環境下での開発を進めている。

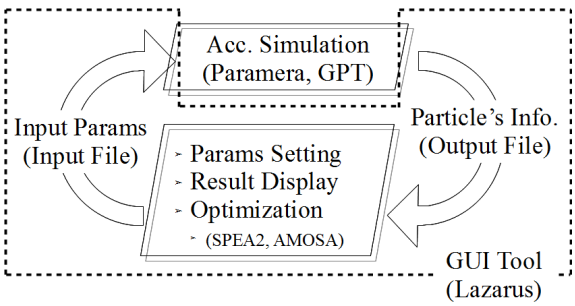

Figure 1: Summary of the accelerator simulation GUI tool.

GUI ツールでは、Fig. 2 に示すように、機能ごとにタブで分けており、入力ファイル作成、ビームエンベロプ表示、エミッタンス（位相空間粒子分布）表示用のタブを備えている。開発の過程で、その他の機能についてのタブが必要となれば、随時追加可能である。作成した入力ファイルを、外部プロセスとして呼び出した Parmela に渡して、電子ビームの計算を行い、Parmela の出力ファイルを読み込んで結果の表示を行う。また、GUI ツールは、

- 単一のパラメータでの計算を行う場合
- パラメータを系統的に変化させた場合の目的関数（エミッタンスなど）の変化を計算する場合
- 目的関数の最小化（最大化）のための最適パラメータの探索の場合

の 3 つの計算タイプから選択し実行する機能を備える。さらに、複数のパラメータで繰り返し Parmela の計算を行う場合に、複数のスレッドで Parmela を起動し、計算時間の短縮を図る機能も備える。パラメータの最適化計算の手法としては、多目的最適化手法である SPEA2 [5] と AMOSA [6] を導入する予定である。

* nagai.ryoji@qst.go.jp

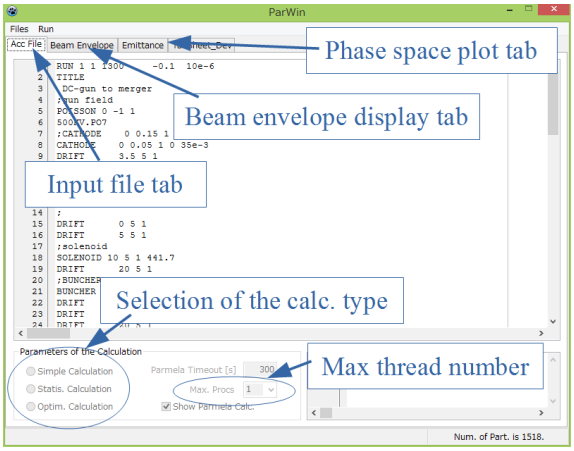

Figure 2: Explanation of the accelerator simulation GUI tool.

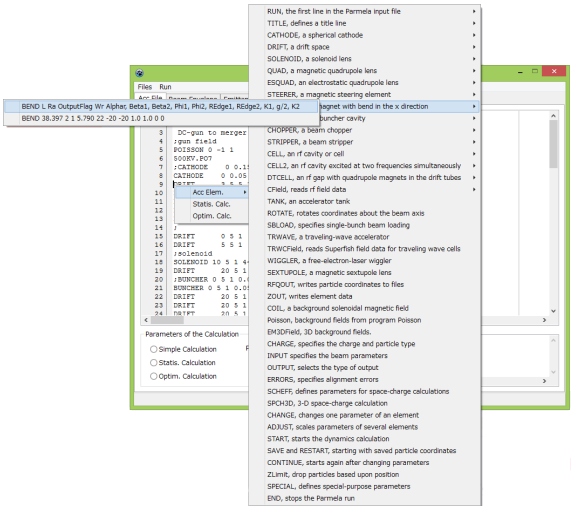

Figure 3: Items of the input file are selectable from a pull-down menu.

3. GUI ツールの使用例

前節で述べた 3 つの計算タイプについて、想定される使用例を以下に示す。

3.1 単一のパラメータでの計算

まず、基本となる単一のパラメータでの計算の使用例を紹介する。入力ファイル作成用のタブを開き、入力ファイルを作成する。この際、Fig. 3 に示すように、Parmela の要素を入力支援するための、プルダウンメニューからの入力機能を設けた。メニューの run をクリックすることで、Parmela を外部プロセスとして呼び出し計算が開始される。計算が終了すると、出力ファイルが読み込まれ、計算結果を表示することが出来る。計算結果の表示例を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。ビームエンベロプ表示タブでは、上下 2 つのグラフにそれぞれ 2 つずつ合計 4 つの値を表示でき、表示する項目（エミッタンス、ビームサイズ、バンチ長など）はプルダウンメニューから選択できるまた、選択した各項目について、プルダウンで選択した要素（z 方向位置）での数値が表示される。エミッタンス（位相空間粒子分布）表示タブでは、プルダウンで選択した要素（z 方向位置）での位相空間での粒子分布やエネルギーのヒストグラムなどが表示される。

3.2 パラメータを系統的に変化させた場合の目的関数の変化

つぎに、パラメータを系統的に変化させた場合の使用例について 2 つの例を紹介する。変化させるパラメータの情報は、先ほどの Parmela の入力ファイルにコメント行として入力するので、同じ入力ファイルを用いて、違う計算タイプでの実行が可能である。この変化させるパラメータの情報の入力文についても、Fig. 3 と同様にプルダウンメニューでの入力支援機能を設ける。1 つの例は、ソレノイドのミスアライメントの位置と角度のパラメータを変化させた際のエミッタンスの変化の様子を示すマップデータの計算である。Fig. 6 に、その結果を示す。光陰極電子銃様に作成したエミッタンス補償用の大口径ソレノイドのミスアライメントの影響 [7] について計算したものである。

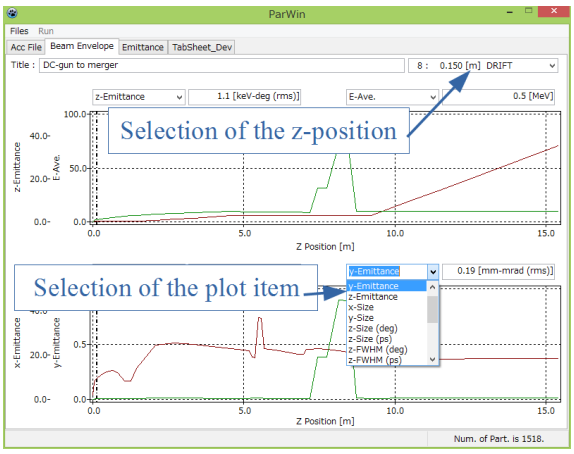

Figure 4: Typical plot of the beam envelope by the accelerator simulation GUI tool.

もう 1 つの例は、いくつかの空洞の RF 位相がガウス分布のジッタを持っている際のバンチ長の分布を計算したものである。Fig. 7 に、その結果を示す。この図は JAER-ERL [8] において、電子銃のタイミングジッタ、SHB、前段加速器 2 台の RF 位相ジッタの影響により、電子バンチ長の分布について計算したものである。電子銃のタイミングジッタは実測値の 16.7 ps を用い、RF 位相ジッタは 0.20 度、0.05 度について計算した。そこから、バンチ長の分散を数パーセント以下に抑えるためには、位相ジッタを 0.1 度以下にする必要があるという結論を得た。

3.3 パラメータの最適化（目的関数の最小化または最大化）

最後に、パラメータ最適化の使用例を紹介する。ここでは、JAERI-ERL の入射部のパラメータ最適化による輝度の最大化 [9] を行った。最適化後の前段加速器後の位相空間の粒子分布を Fig. 8 に示す。最適化により、

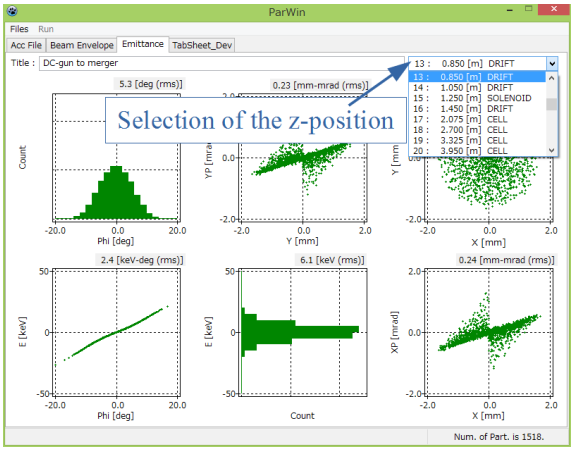

Figure 5: Typical plot of the emttance by the accelerator simulation GUI tool.

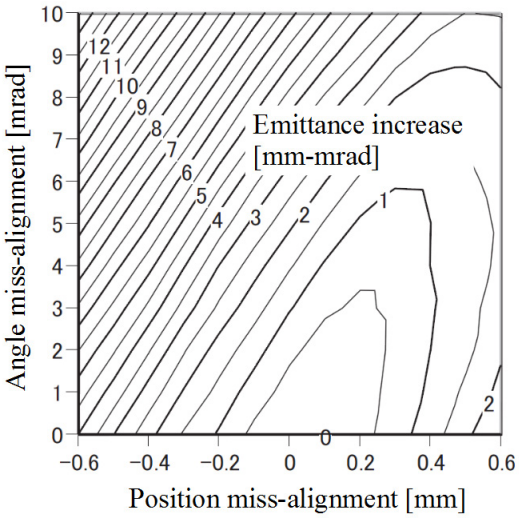

Figure 6: Emittnace increase by the miss-alignment of a solenoid.

粒子の分布が直線状になり、輝度が最大化されている。パラメータの最適化の際には、トレードオフの関係にある目的関数があるので、複数の目的関数に対する最適解群（パレートフロント）を算出し、その中から目的に応じたパラメータを選択すべきである。ここで示した例においては、ピーク電流とエミッタンスがトレードオフの関係にあったが、用いた最適化手法が通常のシミュレーテッドアニーリングであり、単一の目的関数に対する最適化であったので、輝度を目的関数として最適化を行った。今後は、パラメータの最適化計算の手法として、多目的最適化手法である SPEA2 や AMOSA を導入していく予定である。

4. まとめ

加速器の設計・開発・運転サポートに用いる加速器のシミュレーションコードを用いた加速器パラメータ最適化の環境を提供するために、GUI ツールに開発を進めた。開発中の GUI ツールの概要といくつかの使用

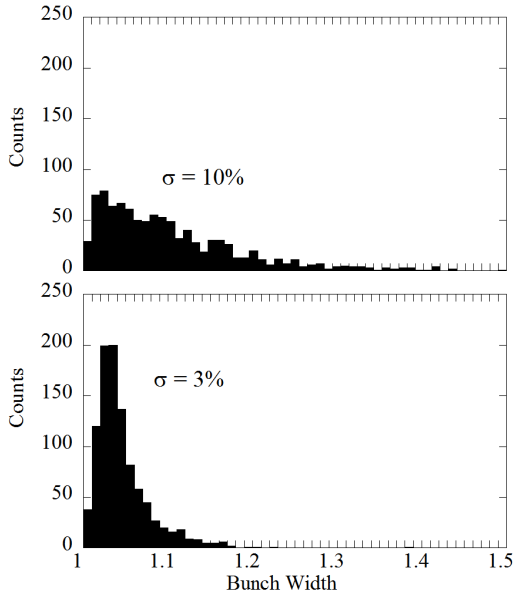

Figure 7: Bunch length dispersion due to the RF cavity phase jitter.

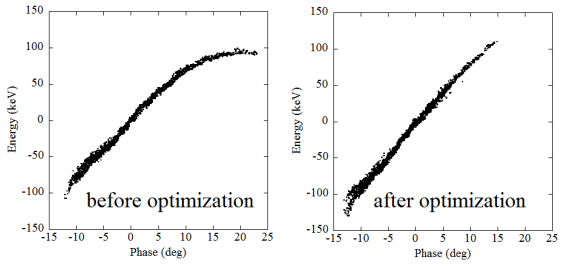

Figure 8: Phase space particle distribution after the pre-accelerator.

例を示した。今後は、多目的最適化手法の導入や GPT など他のシミュレーションコードへの対応を進めていく予定である。

本研究の一部は、JSPS 科研費 15K04740 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] R. Hajima and R. Nagai, Nucl. Instr. and Meth. A 557, 103–105 (2006).
[2] http://laacg.lanl.gov/laacg/services/serv_codes.phtml
[3] http://www.pulsar.nl/gpt/
[4] http://www.lazarus-ide.org
[5] E. Zitzler *et al.*, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Technical Report No. 103, (2001).
[6] S. Bandyopadhyay *et al.*, IEEE Trans. on Evol. Comp., 12, 269–283 (2008).
[7] R. Nagai *et al.*, Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2007, 673–675.
[8] R. Hajima *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 507, 115–119 (2003).
[9] R. Nagai *et al.*, Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2004, 420–422.