

KEK LUCX 加速器インテリジェント制御システムの現状

STATUS OF KEK LUCX ACCELERATOR INTELLIGENT CONTROL SYSTEM

アリセフ アレクサンダー *^{A,B}、荒木 栄^A、福田 将史^{A,B}、大森 恒彦^B、ポポフ コンスタンチン *^B
照沼 信浩^{A,B}、浦川 順治^A

Aryshev Alexander*^{A,B}, Araki Sakae^A, Fukuda Masafumi^{A,B}, Omori Tsunehiko^A, Popov Konstantin^{†B}
Terunuma Nobuhiro^{A,B}, Urakawa Junji^A

^A)KEK: High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki, Japan

^B)SOKENDAI: The Graduate University for Advanced Studies, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Abstract

電子ビームとレーザービームのレーザーコンプトン散乱 (LCS) によって生成されるエネルギーと偏光の可変性を備えた高品質の X 線/ガンマ線準単色光子ビームは、医療および産業分野で多くの研究に利用できる。散乱 X 線の輝度を上げる為に、安定した高出力レーザーとマルチバンチ電子ビーム生成を検討している。電子ビームの安定化には、KEK LUCX 施設で積極的に開発している加速器診断および制御システムが必須である。さらに、利用可能な計算リソースと我々の開発する人工ニューラルネットワーク (ANN) アルゴリズムにより、リアルタイムの最適化ルーチンを確立し、LCS 相互作用点でのビーム特性の安定化とともに、ビーム負荷と空間電荷効果の補正を強化できる。ここでは、ANN と統合された新しい小型線形加速器制御システムの開発の現状と将来の展望について報告する。

1. はじめに

機械学習技術は、性能の最適化、機器の故障予測、実際の診断と仮想診断を含む、粒子加速器のさまざまな側面での利用において注目されている。ビームダイナミクスを正確に表現し、さまざまな欠陥のある実際の装置補正及び、空間電荷やビーム負荷のような複雑な効果を取り込み、さらに訓練や調整可能なビームライン光学モデルを構築・利用することは、多くの加速器応用研究に有用である。複雑な効果補正は、通常光源や衝突型加速器のビーム入射器として使用する小型加速器にとって重要である。機械学習手法と人工ニューラルネットワーク (ANN) は、このようなモデルを構築するための有望な技術である。主な懸念は、モデルが訓練データセットを超える結果を生成しない可能性があり、予測能力が低下することである。その故、物理の定義に従った ANN 能力とその訓練パフォーマンスの最も明白な改善に基づいて、ANN アーキテクチャや訓練過程を制限することになる。現在、ANN はいくつかの加速器システム [1] において試みられた例があり、物理的モデルに基づいたニューラルネットワークの導入により、ANN に現実的な加速器診断と制御を組み込み、追加の制限関数を定義して一貫した予測を実現できる。これを行うためのいくつかの一般的なアプローチがある：ANN への常微分方程式の数値積分、ANN を含む方程式のパラメータ化、および加速器要素のテイラーマップから導かれる ANN アーキテクチャを導入することによる加速器内の単一粒子ビームダイナミクスへの物理的制限の組み込み [2-4] である。

さらに、最適なビームパラメータを維持するために、ANN 統合システムの一部として、RF 電子銃の光電カソードでのレーザースポットサイズやレーザートランスポートラインと関連するレーザー制御を考慮することも重要である。

2. 実験施設

ANN の実装は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の LUCX 施設で計画している (図 1)。LUCX-多目的線形電子加速器では、2つのクライストロン (Toshiba E3729 および Toshiba E3712) を使用して、常伝導 RF ガンと加速管 [5,6] に別々に RF パワーを供給している。電子ビームパラメータを表 1 に示す。

Table 1: LUCX Beam Parameters

Beam energy, typ.	23 MeV
Bunch charge Q , stability	0.9 nC, 6 %
Number of bunches,	1000
Beam size at IP,	33 μm
Bunch length (FWHM),	10 ps
Bunch spacing,	2.8 ns
Energy spread,	0.12 %
Energy difference,	0.06 %
Norm. emittance, $\epsilon_x \times \epsilon_y$	$10 \times 7 \pi \text{mm mrad}$

マルチバンチの高品質電子ビームは、266 nm の $10 \mu\text{J}$ /パルスのレーザー光で Cs_2Te フォトカソードを照射することによって生成する。その後、定在波、3.6 セルのモード分離型高 Q 値 RF ガンによって加速する。後続のビームラインでの空間電荷によるエミッタンスの増加を抑制するために、ソレノイド磁石の磁場調整により、次の 12 セルの S バンド定在波

* alar@post.kek.jp

† 以前はトムスク工科大学に在籍。2020 年 10 月から大学院総合研究科に在籍。

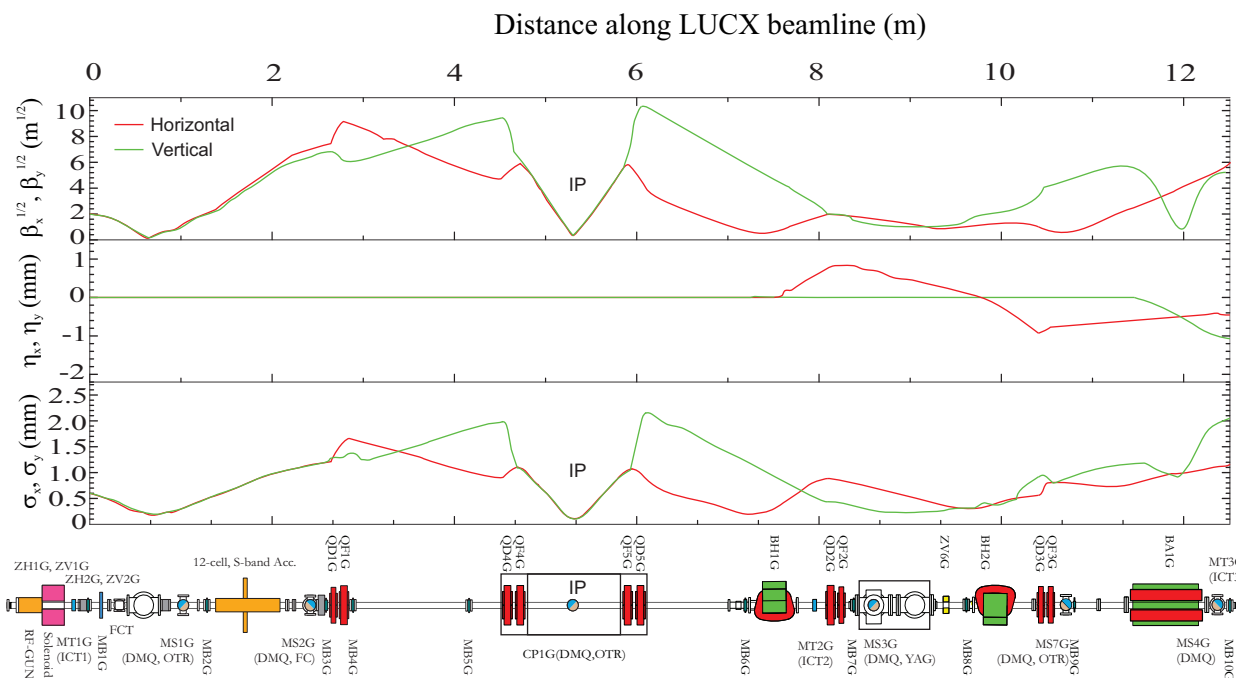


Figure 1: From top to bottom: SAD simulated electron beam optics: beta function, dispersion and beam size along the beam line (red line - horizontal and blue line - vertical coordinates respectively); schematic of the LUCX beam line.

加速管への最適ビームプロファイルに合わせる。加速管は、最大 23 MeV までビームを加速できる。その後、レーザーコンプトン散乱 (LCS) 相互作用点に入り、X 線生成に使用する [7,8]。次に、電子ビームは偏向磁石 (BH1) によって偏向され、ビームエネルギー診断セクションに入る。ビーム負荷補償は、経験的に見出された振幅および周波数変調関数を RF ガンおよび加速管の RF パルスに適用することで実現している。図 1 は、LCS 実験研究に使用している LUCX ビームラインと加速器設計コード SAD [9] で計算した電子ビーム光学設計の概略図である。

LUCX 電子ビーム診断は、3つのサブシステムで構成される：10台のボタンタイプのビーム位置モニター (MB1G, MB2G など)、3台の誘導電流モニター (ICT1, ICT2 および ICT3) および5台のスクリーンモニター (MS1G, MS2G, CP1G, MS3G など) である。BPM および ICT から信号は、30メートルの高品質 RF ケーブルを介して、加速器トンネルから 14ビットの CAMAC ADC に基づく DAQ に送信される。スクリーンモニターでは、発光スクリーンと OTR ターゲットが取り付けられたデュアルポジションエアアクチュエーターを使用している。MS1G は、レーザー位相と RF ガン位相を調整するためのビーム電荷量測定用のファラデーカップにもなる。MS3G スクリーンモニターは、高解像度のビームエネルギーおよびエネルギーブレッド測定用の YAG スクリーンも備えている。画像イメージは、JAICM-030GE 8ビットデジタルトリガー CCD カメラによって取得する。CP1G 画面は、四重極電磁石スキャンによるエミッタンス測定に使用する。多数のステアリングおよび四重極電磁石、ガン

レーザーの位相制御、加速 RF、および 1 m 加速管と組み合わされたすべての装置は、完全な情報取得と電子ビームの制御を可能にする。加速器制御ソフトウェアは EPICS IOC に基づいており、Python、C++、および Qt を使用して記述されたさまざまな便利なツールを備えている。

3. ANN の実装

Fermilab Accelerator Science and Technology (FAST) 施設 [4] で行われた初期の実験は、シミュレートされた仮想カソードレーザー画像、ガンのフェーズ、およびソレノイド強度を使用して、複数のシミュレートされたダウストリームビームパラメーターを予測する ANN の有効性を示した。我々の研究は FAST の研究の成果を踏まえて、それを飛躍的に発展させようとするものである。ANN の有効性を利用して、それぞれ測定可能で調整可能な機械パラメーターに関する複数のオブザーバブルの制御を改良できる。アルゴリズムの設計では、動的応答行列を使用してシステムを自己適応型にすることも目的としている。現在、自動ビーム位置合わせとレーザー輸送ライン、ソレノイド強度、およびガン位相の調整に焦点を当て、KEK LUCX 施設の光陰極電子銃の自動制御法を開発している。使っている RF ガンレーザーシステムの設計では、横方向のレーザープロファイルと初期レーザー分布の非対称性を制御して、電子ビームパラメーターを向上させることができる。そのため、コントローラーを訓練して、いわゆる仮想陰極で測定されたレーザー分布画像を取得し、最適なレーザースポットサイズとフォトカソードでの位置、RF ガンの位相、および下流のビームパラメーター

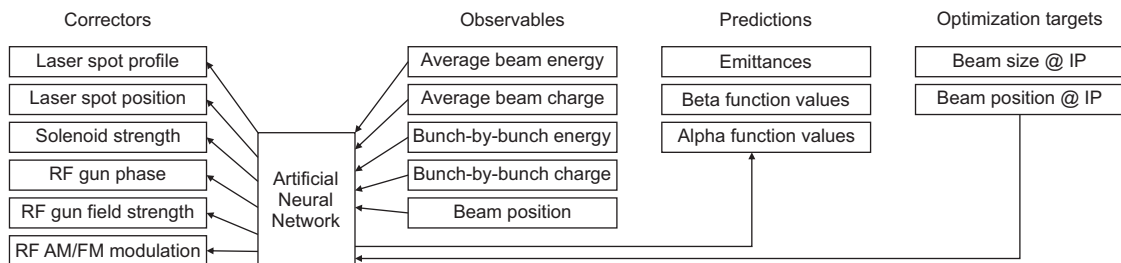


Figure 2: Artificial neural network inputs and outputs.

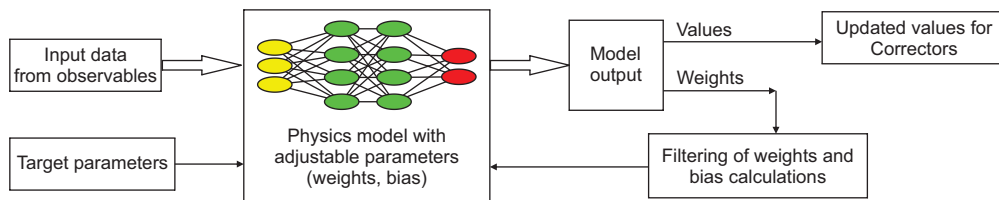


Figure 3: Artificial neural network controller topology.

ターで決定されたソレノイド強度設定を生成する。さらに、ビーム負荷効果を補償するために、制御アルゴリズムは RF パルスの振幅変調および周波数変調補正を含んでいる。このタイプの制御法を開発するための最初のステップは、ANN が図 2 に示すさまざまな入力パラメータからビームパラメータを適切に予測できるようにすることである。次に、このプロセスモデルを使用して、図 3 に示すトポロジで ANN 制御法を育成する。我々は、LUCX の物理ベースのシミュレーションを訓練データとして使用する ANN モデルの作成を計画している。シミュレーションデータを使用して ANN を訓練することにより、オンラインモデル予測制御、オフライン最適化スタディ、または制御室での迅速なテストでも使用できるダイナミクスの高速実行表現を作成する。

4. 結論および次のステップ

ANN 統合線形加速器制御の作成に向けた私たちの意図と最初のステップを示す。我々は、RF ガンのレーザービームパラメータ、ソレノイド強度、ガンの位相、および測定された仮想陰極画像から、下流のビームパラメータをシミュレーションにより予測できると考えている。このことを実証することは、小型加速器を高い精度と再現性で直接調整できる ANN 制御法を作成するための重要な最初のステップである。訓練セット内のサンプル数は比較的少なく、予測パラメータも多数あるが、ターゲットパラメータのすべての平均絶対誤差を最小限に抑えることができる。LCS 相互作用点でのビームサイズとビーム位置を安定化する。また、この高速実行モデルは、それだけで迅速な最適化研究に使用できる。現在、この作業を拡張して、加速器から測定された訓練データを含めるようにしている。これらの研究では、ビーム位置合わせが追加の予測パラメータとして使用される。モデルが測定データで更新されたら、ニューラルネットワーク制御法を訓練し、

LUCX でテストする予定である。

謝辞

ANN 活動に対する絶え間ない支援とサポートを提供してくれた KEK の同僚に感謝します。本研究は JSPS 科研費 JP19H00691 の研究活動と密接に協力しあって行われている。

参考文献

- [1] Y. Chen, Y. Shi, and B. Zhang. “Optimal control via neural networks: A convex approach”, arXiv preprint, arXiv:1805.11835 (2018).
- [2] A. Ivanov, I. Agapov. “Physics-based deep neural networks for beam dynamics in charged particle accelerators”, Phys. Rev. Acc. and Beams, 23.7, 074601 (2020).
- [3] E. Meier, *et al.*, “Electron beam energy and bunch length feed forward control studies using an artificial neural network at the Linac coherent light source”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 610.3, 629-635 (2009).
- [4] A. L. Edelen, *et al.*, “First steps toward incorporating image based diagnostics into particle accelerator control systems using convolutional neural networks”, arXiv preprint, arXiv:1612.05662 (2016).
- [5] M. Fukuda, *et al.*, “Upgrade of the accelerator for the laser undulator compact X-ray source (LUCX)”, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. section A, 637, S67 (2011).
- [6] A. Deshpande, *et al.*, “Experimental results of an rf gun and the generation of a multibunch beam”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 14, 063501 (2011).
- [7] 坂上和之, and 荒木栄. “KEK-LUCX におけるレーザーコンプトン散乱小型 X 線源の開発.” 加速器: 日本加速器学会誌 10.1, 32-42 (2013).
- [8] 福田将史, *et al.*, “KEK におけるレーザーコンプトン散乱を用いた小型 X 線源の開発の現状とアップグレード計画.” 加速器: 日本加速器学会誌 9.3, 156-164 (2012).
- [9] SAD - Strategic Accelerator Design; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>