

レーザープラズマ加速場入射用 極短パルス電子線型加速器制御システムの設計

CONTROL SYSTEM DESIGN OF A LINAC TO INJECT ULTRASHORT-PULSED ELECTRON BEAMS INTO A LASER PLASMA ACCELERATION FIELD

増田剛正[#], 益田伸一, 熊谷教孝, 大竹雄次

Takemasa Masuda[#], Shinichi Masuda, Noritaka Kumagai, Yuji Otake

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

We are developing a linac to generate ultrashort-pulsed electron beams with a bunch length of below 10 fs and a transverse size of $\sim 50 \mu\text{m}$ for injection into a subsequent laser-plasma acceleration (LPA) field. LPA is an extreme phenomenon in femtoseconds domain and its chaotic physics has not been established yet. Main purpose is to reveal the characteristics of LPA field by scanning its phase space with the generated electron beams. The best way complimenting theoretical analysis to find out the essence of LPA physics is applying machine learning (ML) to analyses of huge combinations of related data such as data on a plasma and a laser pulse, and electron beam parameters before and after injection into the LPA field. Therefore, a control system of the linac is demanded to realize acquisition of all the concerned data synchronized with its operation frequency of up to 30 pps and in-situ ML analyses of acquired data. Python is applicable for their software development because of its rich mathematical and ML libraries, and prompt development with scripting language. Combination of EPICS as a control framework and EtherCAT as a field network enables us to reveal the above as the best solution.

1. はじめに

科学技術振興機構の未来社会創造事業[1]では、高強度・極短パルスレーザーをプラズマに照射することにより生成されるレーザー航跡場を利用した小型電子加速器の実用化を目指して研究を行っている。レーザー航跡場で得られる加速勾配は、従来の高周波による加速勾配よりも3桁程度大きいため、高エネルギー物理をはじめとした学術分野で高い加速エネルギーを得るために巨大化が進んでいる加速器施設的大幅な小型化が可能となる。また、医療分野や産業分野において、テーブルトップの電子線源や放射光源としての加速器の利用が期待できる。

レーザープラズマ加速はフェムト秒領域の極限現象であり、未だその詳細な物理は明確になっていない。従って、レーザープラズマ電子加速を用いた加速器を実用化するためには、その加速特性を詳細に解明する必要がある。この目的のため、未来社会創造事業の実施機関の一つである高輝度光科学研究センターでは、極短バンチ電子ビームを生成する線型加速器の開発を進めている。レーザープラズマ加速を行う後段のレーザー航跡場に入射できるよう、横方向のビームサイズが $50 \mu\text{m}$ (rms)程度で、バンチ長が 10 fs (rms)以下の電子ビームの生成を目指す。開発中の線型加速器の構成を Fig. 1 に示す。

既に確立されている高周波加速技術を用いることで、高安定な電子ビームを生成し、電子ビームのパラメータを高精度で調整することが可能となる。追加速されるレーザー航跡場の位相空間に対して、垂

直・水平・縦の各々の位置で電子ビームをスキャンし航跡場の位相空間のマッピングを取ること、レーザー航跡場の詳細を明らかにすることが本加速器開発の最重要課題である。

2. 制御システムへの要求

前節で述べた通り、我々はレーザー航跡場の特性を明らかにするために、本加速器で生成する極短パルスの電子ビームを用いて、航跡場の位相空間のマッピングを取る。これを行うには、入射電子ビームのエネルギーや位相、パルス幅、ビーム位置やビームサイズ、航跡場生成のためのレーザーパルスのエネルギーやパルス幅、集光強度、スポット径、およびガスジェットのプロプラズマ密度など、関連する多くのパラメータを調整しながら運転を行う必要がある。加速器の制御システムが、連携する一連のソフトウェアから、全ての構成機器を一体的に制御することができなければ、このような運転を実現することは困難である。また、レーザー航跡場の特性を明らかにするため、上記の調整パラメータに関連するモニターデータを基に、入射電子ビームのエネルギーやエミッタンスが最適となるような航跡場の統計的な推論を行う必要がある。そのため線型加速器の制御システムは、加速器の最大 30 pps での運転に同期して関連する全てのデータを収集し、それを用いて加速器調整のその場で統計的な推論を行うことがある。その物理が明確になっていないレーザー航跡場の統計的な推論を行うには、機械学習を用いるのが最良の方法であると考えている。

[#]masuda@spring8.or.jp

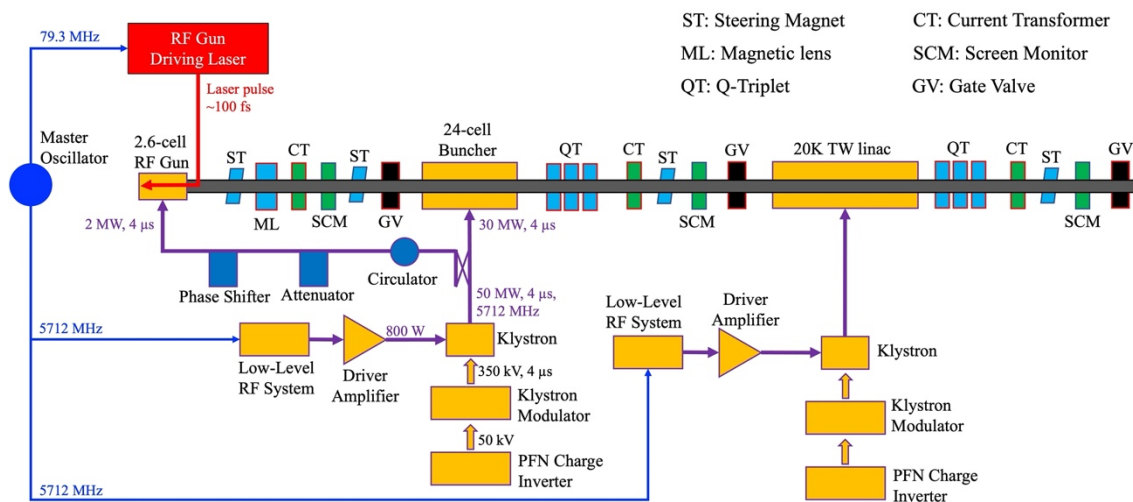


Figure 1: Configuration of a linac under development to generate ultrashort-pulsed electron beams.

本加速器は実験加速器であり、測定の目的によって加速器機器や計測器の追加・変更を行うことが予想されるため、制御システムにはそれに容易に対応出来るフレキシビリティが求められる。一方、本加速器開発は予算と人的資源が非常に限られているため、出来る限り低予算かつ省力的に制御システムを構築することが求められる。このような場合、制御システムの設計を後回しにしてしまい、完成後の加速器構成機器を一体的に制御出来ずに苦勞するケースが散見される。本開発においては、そのような状況にならないよう、加速器機器コンポーネントの製作開始時には制御システムの設計方針を決めておくことが重要となる。

以上より、本加速器の制御システムに対する要求をまとめると以下ようになる。

- 加速器全体の一体的な制御を実現すること
- 機械学習による運転のその場での統計的推論を実現すること
- 最大 30 pps での加速器運転に同期したデータ収集を実現すること
- 実験加速器に求められるフレキシビリティを有すること

加えて、設計にあたっては以下の境界条件を考慮する必要がある。

- 出来る限り低予算かつ省力的な制御システムを構築すること

3. 制御システムの設計方針

本線型加速器の制御システムの設計を行なうにあたり、前節で述べた要求に対して我々は以下のような設計方針を立てた。

3.1 一体的な制御の実現

この要求を満たすため、我々はソフトウェア開発の基盤となる**制御フレームワークを導入**する。予め導入する制御フレームワークを決め、これに従って全てのソフトウェアの製作を進めることで、加速器の一体制御を実現する。

境界条件から、市販の制御ソフトウェアを用いるのではなく、加速器施設で広く使用されている**オープンな制御フレームワークを導入**する。

3.2 機械学習によるその場統計的推論の実現

機械学習による推論を実現するため、アプリケーションソフトウェアの開発には、**数学ライブラリや機械学習ライブラリが充実した開発環境・開発言語を使用**する。境界条件から、フリーで利用可能で、かつ開発に必要な情報を容易に得ることが出来る利用者の多い開発環境／開発言語を採用する。

また、統計的推論を実施するためには、条件を指定して関心のあるデータをソフトウェアから容易に読み出せることが重要になる。そのために**データアーカイバーを導入**する。そして運転でのその場推論を実施できるよう、導入するデータアーカイバーは**高速に読み出し可能**なものである必要がある。

3.3 最大 30 pps の運転同期データ収集の実現

この要求を実現するために、機器の近傍まで配信された最大 30 pps のトリガー信号に同期して、対象データを取りこぼしなく収集する**イベント・ドリブン型の制御ソフトウェアを構築**する。また、収集したデータが同一ショットのデータであることを保証するために、トリガー番号またはタイムスタンプをデータに付与する。

3.4 フィレキビリティの実現

この要求を実現するため、我々は、昨今の Internet of Things (IoT)化の流れに見られるように、**それぞれの制御対象機器がネットワークに直接に接続されるネットワーク分散型の制御システムを構築**する。これにより、VME や MTCA.4 のような集積度の高いモジュラー型計算機を用いて機器の制御を集約的に行なう場合に比べて、他に与える影響を最小限に抑えながら機器の追加や変更が可能となる。また、制御点数が少ない本加速器においては、高価なモジュラー型計算機を用いる場合に比べ安価に制御システムを構築できるため、境界条件も満足する。

4. 設計した制御システム

前節で述べた設計方針に従って、我々は本線型加速器の制御システムを設計した (Fig. 2)。システムを構成する計算機や加速器制御機器が、ネットワークで緩やかに接続されたネットワーク分散型の制御システムとしている。以下、システムの詳細について述べる。

4.1 制御フレームワーク

加速器施設で利用されている幾つかのオープンな制御フレームワークを検討した結果、我々は Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS)[2]を採用することにした。

EPICS は世界中の加速器施設で広く使用されているメジャーな制御フレームワークであり、日本の加速器施設でも広く使用されている。大型の加速器施設だけでなく、我々のような小型加速器での使用実績もあり、真にスケラブルな制御フレームワークと言える。毎年 Collaboration Meeting を開催するなど大きなコミュニティを持ち、そこから多くの有益な情報が得られることが期待できる。また Control System Studio (CSS)[3]や Python Display Manager (PyDM)[4]などの GUI 製作ツールや、Archiver Appliance[5]等のデータアーカイバなど、多くの有益なツール群が継続して開発され、利用可能である。

EPICS は、pvAccess プロトコルによるクライアント・サーバー型のアーキテクチャを持ち、機器構成の変更や拡張に容易に対応出来るフレキシビリティを有する。また、イベント・ドリブンに対応しており、最大 30 pps の運転同期データ収集の実現に適している。

今回は新規に制御システムを構築するので、ネットワーク上で構造化データのやりとりが行える等の

メリットを享受すべく、最新のメジャーバージョンである EPICS 7 でシステム構築を進める予定である。

4.2 アプリケーションソフトウェア

我々は、機械学習による運転のその場での統計的推論を行うためのアプリケーションソフトウェアを、主に Python を用いて開発する。これは Python が、そのオープンなエコシステムにより、フリーで利用可能な数学ライブラリや機械学習ライブラリが充実しているためである。また、スクリプト言語であることから、その場でのアプリケーション開発にも適している。

Python は可読性が高く、比較的習得が容易な言語であることから元々人気の高い開発言語であるが、近年、機械学習用のライブラリが充実していることから特に人気が高まっている。数学ライブラリや機械学習ライブラリ以外にもフリーで利用可能なライブラリやツール群が充実しており、予算および人的資源が限られている我々の加速器開発のアプリケーション開発に最適な言語であると言える。

これら高度なアプリケーションから加速器制御のための簡易な GUI プログラムまでを幅広くカバーするフレームワークとして PyDM[4]の導入を考えている。PyDM は Python および Qt をベースとしており、Qt Designer を用いたドラッグ・アンド・ドロップによる GUI の作成に加えて、Python コードによる GUI 画面の作成も可能である。EPICS pvAccess および Archiver Appliance にアクセスするためのウィジェットも提供されている。

アプリケーションソフトウェアを動作させる計算機 (Operator Interface (OPI)) としては、操作性を向上させるための大画面液晶ディスプレイを持つ PC を 2 台程度使用する。OS には、利用者の多さや使い易さを考慮して Ubuntu [6]を採用する

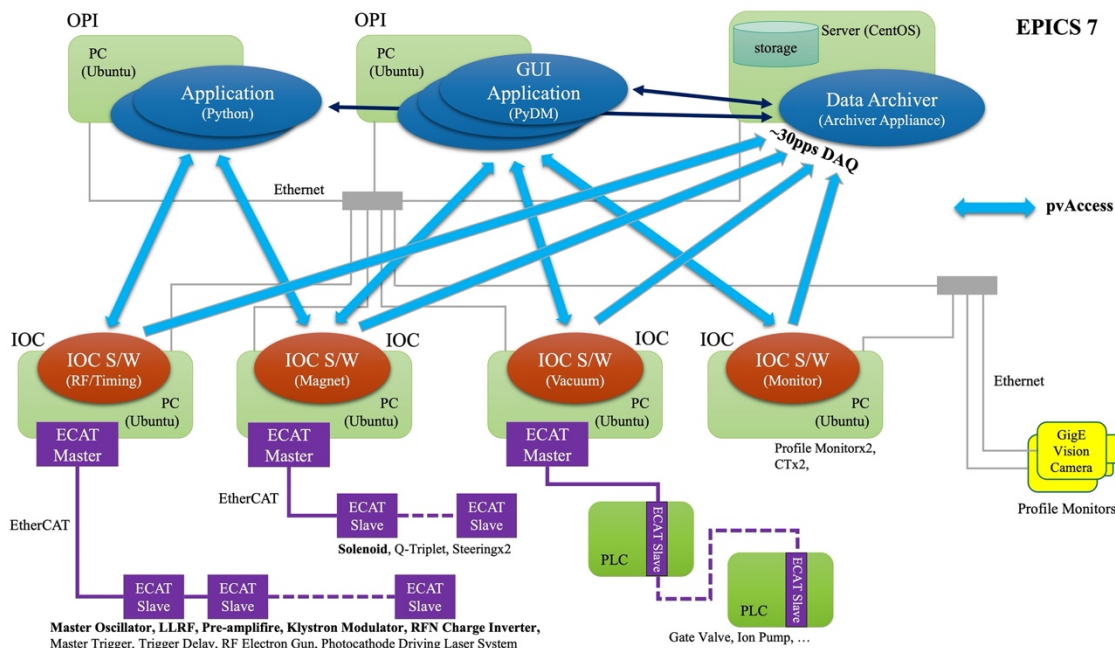


Figure 2: Schematic diagram of a control system designed for the linac.

4.3 データアーカイバ

上述の機械学習による統計的推論を実施するためには、アプリケーションソフトウェアから、関心のある一連のデータを、条件を指定して読み出せる必要がある。これを高速かつ効率的に行えるようにするために、我々はデータアーカイバを導入する。当初、制御フレームワークとして EPICS を採用するにあたっては、それまで EPICS で使用されていたデータアーカイバのパフォーマンスに不安を感じていた。しかしながら、近年開発された Archiver Appliance[5]が良いパフォーマンスを示しており、特に読み出し速度の高速化が図られているというデータがその実導入事例とともに幾つか示された[7-11]。これを受けて我々はデータアーカイバとして Archiver Appliance を採用する予定である。Archiver Appliance はシステム管理の負担軽減が図られており、このことも我々に適していると考えている。

Archiver Appliance は 1 台のサーバー計算機上で動作させることを考えている。必要なメモリ量やストレージの構成については、収集データ量の見積りを終えた段階で簡単な性能評価を行った後に決める予定である。必要があれば Short Term Storage (STS)用に小容量の Non-Volatile Memory Express (NVMe)を使用することも考える。OS には Archiver Appliance で動作実績のある CentOS 7 または 8 を使用し、Relational Database Management System (RDBMS)として MariaDB 10[12]を導入する予定である。

4.4 ネットワーク

我々は、制御システムのフレキシビリティの向上と、最大 30 pps でのパルス運転に同期したデータ収集の実現を考慮して、制御機器が直接接続されるフィールドネットワークとして EtherCAT[13]を使用する。EtherCAT は Ethernet をベースとした産業用ネットワークであり、サブミリ秒の高い実時間性を有する。また対応するデバイスが市場に数多く提供されているため、長い製品寿命が期待できる。以上より、本加速器を構成する機器については EtherCAT で取り合うことを基本として製作を進めている。

一方、全ての制御機器を EtherCAT に接続することは必ずしも現実的であるとは言えないため、汎用 Ethernet に直接接続することも認めることとした。例えばビームプロファイルモニターなどに用いるカメラについては、汎用 Ethernet に直接接続する GigE カメラが広く普及しており、それを用いた方が合理的であると判断した。

4.5 機器制御用計算機

我々は、制御システムのハードウェアおよびソフトウェアのフレキシビリティを向上させるため、加速器構成機器を制御するための計算機 (Input Output Controller (IOC)) を OPI と分離し、ネットワークで緩やかに接続された独立した計算機として構成する。IOC ソフトウェアがサーバーとして機能することで、クライアントであるアプリケーションソフトウェア

は機器の詳細な制御から切り離され、独立性を向上させ、ソフトウェアのフレキシビリティを向上させることができる。

IOC としては、PCI Express スロットに EtherCAT マスターカードを実装した PC を 2~3 台程度用いる。OS には Ubuntu[6]を採用し、EtherCAT 経由で機器を制御するための IOC ソフトウェアを動作させる。

プロファイルモニター用の IOC にも同じく PC を使用する。OS も同じく Ubuntu を採用し、GigE Vision[14]をサポートするオープンソースライブラリである Arabis[15]を利用してカメラ制御を行う IOC ソフトウェア製作する。

一方、ゲートバルブなどの真空機器や冷却水温の安定化のための温度調機器、インターロックシステムには Programmable Logic Controller (PLC)を用いる必要があるため、PLC に EtherCAT スレーブモジュールを実装することで、上述の EtherCAT 用 IOC から EtherCAT 経由で制御を行う。

5. まとめ (現状と今後の予定)

本設計方針に従い、線型加速器の構成機器の製作を進めている。マスターオシレータ、クライストロンモジュール、PFN 充電器、ドライバアンプやソレノイドコイル用電源などの新たに製作した機器について、EtherCAT マスターから個別に制御ができることを確認済みである。EtherCAT マスターとしては、アドバネット社製 AdEXP1572 EtherCAT マスターボード[16]を実装した PC (Ubuntu 16.04.5 LTS, Kernel: 4.15.0-45-lowlatency) を使用している。機器側の EtherCAT スレーブについては、機器の内部に横河電機製 FA-M3V[17]を使用している場合には、SPRing-8 でも動作実績のある EtherCAT スレーブモジュール F3LT02-0N を実装することで実現している。一方、内部に PLC を実装せず、FPGA や MPU を用いている機器については、市販の EtherCAT スレーブモジュールを組み込み、FPGA や MPU から直接制御を行う実装とした。例えばマスターオシレータでは、Hilscher 社の COMX 100CA-RE[18]を利用し、これを機器内部の FPGA から SPI 経由で制御することで EtherCAT スレーブとして機能している。

今後はソフトウェアの整備を順次進める予定である。まずは EtherCAT の制御を行うための IOC ソフトウェアの製作、および Archiver Appliance の性能評価から始めることを考えている。

謝辞

本研究は、JST の未来社会創造事業 JPMJMI17A1 の支援を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] JST-Mirai Program website;
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>
- [2] EPICS website; <https://epics.anl.gov>
- [3] Control System Studio website;
<https://controlsystemstudio.org>
- [4] Python Display Manager website;
<https://slaclab.github.io/pydm/>

- [5] EPICS Archiver Appliance website;
https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/
- [6] Ubuntu website; <https://ubuntu.com>
- [7] S. Yamada *et al.*, “Deployment of Archiver Appliance at J-PARC Main Ring”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1141-1147.
- [8] H. Kaji *et al.*, “Application of EPICS Archiver Appliance at SuperKEKB”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 592-595.
- [9] I. Satake *et al.*, “Introduction of Archiver Appliance in KEK Electron Positron Injector Linac”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 861-864.
- [10] T. Nakamura *et al.*, “Deployment of Archiver Appliance at PF-AR Accelerator”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 881-883.
- [11] A. Uchiyama *et al.*, “Introduction of Archiver Appliance to RILAC Control System”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 739-742.
- [12] MariaDB website; <https://mariadb.com>
- [13] EtherCAT Technology Group website;
<https://www.ethercat.org/jp.htm>
- [14] <https://www.baslerweb.com/jp/vision-campus/interfaces-and-standards/gigabit-ethernet/>
- [15] Aravis website;
<http://www.github.com/AravisProject/aravis>
- [16] AdEXP1572 EtherCAT Master board website;
<https://www.advanet.co.jp/products/network-communication-io-boards/ethercat/ethercat-master/adexp1572/>
- [17] Programmable Controller FA-M3V website;
<https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-platforms/control-system/programmable-logic-controller/>
- [18] COMX 100CA-RE EtherCAT slave module website;
<https://www.hilscher.com/products/product-groups/embedded-modules/communication-module/comx-100ca-reecs/>