

光を自在に操る制御

大端 通 財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
E-mail : ohata@spring8.or.jp

濁川和幸 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
E-mail : kazuyuki.nigorikawa@kek.jp

1. はじめに

「光を自在に操る」とは、光の位置、発散、エネルギー、位相あるいはタイミングなど、ビームラインの装置を制御して実験ステーションで使えるように加工することです。本稿では、これまでに紹介された分光器をはじめとするビームラインを構成する装置を、実験に応じて最適に調整する制御システムの構築例を示し、ビームライン制御の考え方を平易に解説します。

これまでのシリーズで紹介された装置は、全て制御システムとの取り合いを想定して設計されています。例えば、SPRING-8の標準型二結晶分光器は、結晶方位の制御のために15軸余りのパルスモータを実装し、計算機による制御が可能となっています。近年のコンピュータ技術の進歩により、このようなモータ制御システムはどこの実験室でも見かけられるように一般的になっていますが、大型の放射光施設では、対象となる全てのパルスモータを合わせると、1000軸を超える巨大なシステムになります。他に真空機器やビームポジションモニタなど汎用的なデジタル/アナログの入出力を加えると、ゆうに5000点を超える規模になります。これらを如何にして自由かつ確実に操作出来るようにするかが、ビームラインの制御システムに求められる重要な機能となります。また、実験内容に応じて、測定系との連携や、制御手順や計測手段の変更に柔軟に対応して、必要なデータを迅速に取得することも要求されます。

本稿では、装置と制御システムのインターフェースの解説から始め、ネットワークシステムやセキュリティ管理など、現代の計算機制御に欠かすことのできない基幹技術についても解説します。また、放射光実験において制御システムが果たす役割や必要となる基礎的な情報をまとめます。国内の代表的な放射光施設である高エネルギー加速器研究機構にある放射光研究施設（以下 KEK-PF）とSPRING-8のビームライン制御システムを紹介するとともに、将来の放射光ビームラインにおける制御システムの方向性の一端を示します。

2. 制御システムの役割

ビームラインにおける制御システムは、いわば、装置と人間の橋渡しの役割を果たします。人間に例えるならば、脳と目や指先を結ぶ神経系に相当するでしょう。目から入ってきた情報を基に指先を動かし、その結果を再び目からの情報として受け取るといった繰り返しを確実にこなすことによって、一連の動作が完結するのです。以下では、実際に使用される制御機器や、放射光ビームラインに特有なリモート制御の環境について紹介します。

2.1 制御対象

ビームラインにおいて制御システムが取り扱う対象は、最上流は光源である挿入光源に始まり、光の整形、熱負荷除去などの役割を担うフロントエンド部、そして必要な光を精密に切り出す光学系輸送部の様々な装置です。加えて、安全な実験環境を実現するためには、真空や放射線のインターロックシステムとの取り合いも重要となります。これらの装置は、標準的なビームラインで約50 mの間に広く分散配置されています。

ここでは制御対象となる機器の例をいくつか示します。まず、最も重要なのはアクチュエータ系です。本シリーズで紹介されてきた分光器やミラーなどの装置は、高精度なアクチュエータを備えたステージを搭載しています。アクチュエータとはモータに代表される駆動用機器の総称ですが、大きく分けて回転駆動用と並進駆動用があります。多くの装置はこれらを組み合わせて自由度の高い複雑な動作を実現しています。様々な種類のモータがありますが、位置決め精度が高く、停止時の安定性が高いパルスモータが多く利用されています。放射光ビームラインで利用されているほとんどのモータがパルスモータにより構成されています。高速な駆動が必要な場合には、高い位置決め精度と高いトルク特性を両立させたサーボモータが利用されるケースも見られます。最近では後で述べるエンコーダ機能として高精度の位置検出機能を備えたモータ*の製品化が

* 例えばオリエンタルモーター㈱の“ α step”や多摩川精機㈱の“Smartsyn”などがある。

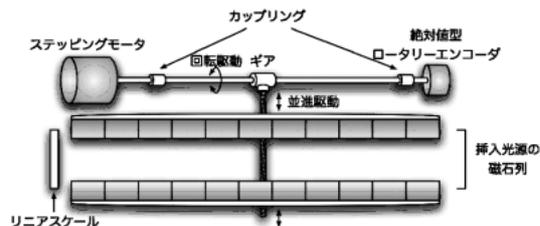


Fig. 1 Example of setup of motor and encoder in insertion device of SPring-8. An absolute type rotary encoder and a linear scale are used for the reliability improvement of the precise positioning.

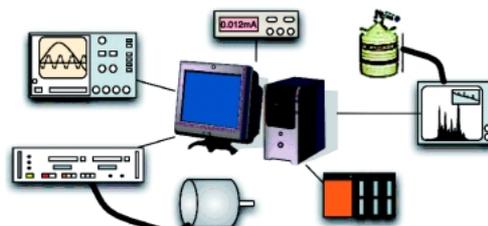


Fig. 2 Image of control system which centers around computer. Not only the control equipment but also the data collection from various apparatus becomes an important function of the control system.

進み注目されつつあります。殆どのモータは回転駆動ですが、ギアやボールネジ等を使うことによって、並進動作に変換して直線駆動を行うことができます。このような並進機能は直動ステージの駆動だけでなく、タンジェントバー¹⁾など、より高精度の回転角制御にも利用されます。超高精度な並進駆動用アクチュエータとしてピエゾ素子も多く見られます。アクチュエータの多くはそれ自身がどの回転角に設定されているかなど、絶対的な位置を知ることができません。そこで登場するのがエンコーダです。エンコーダは位置を計測する機器で、アクチュエータと対になって用いられます。エンコーダにも回転タイプと並進タイプがあります。位置情報の保持は相対値型、絶対値型があり、位置の計測方法も様々です。用途に応じて使い分けます。これらのアクチュエータやエンコーダは、挿入光源、分光器やミラー等に組み込まれています。**Fig. 1**にSPring-8の挿入光源装置におけるモータとエンコーダの構成例を示します。挿入光源の動作は蓄積リングの電子軌道に影響を与えることから、操作する場合は細心の注意が必要となります。そこでSPring-8では挿入光源の位置モニタとして、回転タイプのロータリーエンコーダと並進タイプのリニアエンコーダを併用して、位置測定信頼性を向上させています。他の制御機器にも言えることですが、選定にあたって位置の分解能や再現性および動作速度などの基本性能はもとより、放射光実験に特有の使用環境について考慮する必要があります。特に放射線環境下での使用に関しては、設置後10年単位で使用し続けることを考慮した素材の選定が重要になります。例えば、塩ビのケーブル被覆は、放射線によって塩素ガスを発生し、ケーブルの劣化によるライン間ショートだけでなく、周囲の装置の腐食を引き起こす等の影響を与えることがあります。また、真空内で使用する機器に関しては、脱ガスや放熱等の検討が必要となります。

次のステップで重要になるのがデータ収集です。フォトン数の計数や強度計測、1次元検出器から2次元、時間軸を含んだ検出器など、実験によって様々な検出器や計測機器が用いられます。一般的な計測機器として、デジタルカウンタや、微小電流計が広く利用されています。また、温度計測や汎用のデジタルマルチメータ、オシロスコープ、

マルチチャンネルアナライザなどの利用もよく見られます。過渡的な物理現象の測定には高精度なタイミング系も欠かすことはできません。この他にも、真空機器やシーケンサなどのインターロック装置も、データ収集の対象となります。**Fig. 2**に示すように、制御システムは、これらの計測データとアクチュエータやエンコーダを関連づけて、自由に取り扱うことができなければなりません。

最後に、制御対象ではありませんが、計算機やストレージシステム、ネットワークシステムは、制御システムの中で重要な位置を占めます。続くセクションでは、計算機を中心とした制御システムの設計概念についてお話しします。

2.2 計算機制御

放射光実験の黎明期には、手製の実験装置や検出器および計測装置を駆使して、今では想像もできないような緻密な作業を繰り返し行っていたようです。装置の仕様一つ一つを熟知していなくては使いこなすことのできない、言うなれば職人技に支えられたシステムでした。先達のたゆまない努力によって、単一の装置で対応できる実験の適応範囲が広がり、近年では装置の成熟度が高まってきました。現在では通常の放射光実験において、職人技が必要となる場面はそうありません。その背景には装置自体の高機能化だけでなく、計算機技術の劇的な進歩に裏打ちされた制御システムの高度化が深く関与しています。

一般に、多くの放射光実験は、同じような作業の膨大な繰り返しによって、一連の実験データを生成します。比較的単純な測定手段であるX線吸収測定の場合でも、分光器によるエネルギー選別とX線強度の検出を数1000ステップに亘って繰り返します。計算機はこのような作業に、まさにうってつけて、再現性の確保や作業の効率化をはかる上で、欠かすことはできません。

ここで、計算機による制御システムを形作る各パーツを埋めていきましょう。装置に組み込まれた制御対象について前の章で示しました。では、計算機と実験装置の結びつきはどのようになっているのでしょうか？ パソコンに代表される一般的な計算機の外部インターフェースとして、シリアルポート (RS-232C) があります。シリアルポー

トは、使いやすく非常にシンプルですが、数多くの機器を接続できないため、現代の制御システムではあまり利用されていないように思います。現在でも広く利用されている制御用インターフェースとして、GP-IB (General Purpose Interface Bus) があります。1960年代後半にヒューレット・パッカード社で開発された制御通信バスで、パルスモータコントローラ、デジタルマルチメータなど、GP-IB インターフェースを備えた様々な制御・計測機器が入手可能です。しかし規格が古く、通信速度や安定性の面で問題があることなどから、市場動向として次第に縮小傾向にあるようです。最近では、USB や Ethernet などが、GP-IB に代わるインターフェースとして注目されています。これらのインターフェースは、マイコンを内蔵した組み込み型の高精度な計測機器や制御装置を利用する際に用いられます。高機能で魅力的な計測機器が数多く市販されていますが、実験室での利用を想定して設計されているため、手の届く範囲での使用を前提としている製品が多いようです。また、数1000点にもおよび制御対象を扱うには、制御点数の増減に柔軟に対応できるような、いわゆる「スケラビリティ」が重要となります。その際に利用されるのが、VME (Versa Module Europe) などのバス接続された I/O カードシステムです。VME は計算機の I/O バスの規格のひとつで、ANSI/IEEE 1014-1987 として標準化されており、高信頼性の制御システムとして、幅広く利用されています。Fig. 3 に典型的な VME のシステム構成を示します。

さあ、これで装置と計算機が接続されました。残るはソフトウェアの出番です。ちゃちゃっ、と作って完成！とはなりません。実はこのソフトウェアも先人たちの知恵の固まりです。職人たちの手動計測で蓄積されたノウハウを、一見単純な繰り返し作業の中に埋め込み、再現性、効率性を維持しながら、高機能な実験装置の性能を、容易かつ最大限に発揮できるようにしなくてはなりません。そのためには、効率的なアプリケーション開発を実現する枠組みと

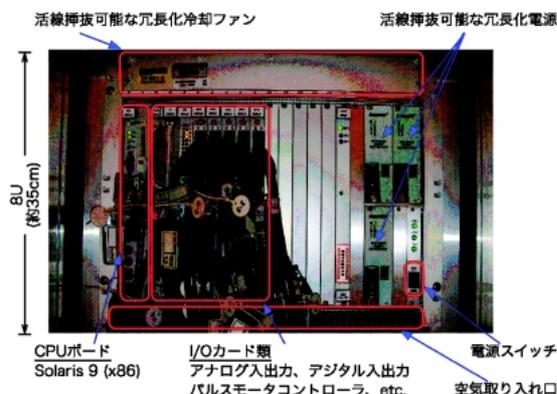


Fig. 3 A VME used at beamline control system of SPring-8. It has a chassis with power supplies and the cooling fans, CPU board, and various I/O cards.

して、制御システムに特化したアプリケーションフレームワークが必要不可欠です。KEK-PF の STARS (Simple Transmission and Retrieval System)²⁾ や SPring-8 の MADOCA (Message And Database Oriented Control Architecture)³⁾ がそれにあたります。これらの制御フレームワークは、巨大な制御システムを柔軟に構築するための細かな工夫がなされています。これらの詳細については、それぞれの施設の制御システムの紹介の中で解説します。

これで一通り計算機制御のためのシステムが完成しました。放射光ビームラインの制御システムは、上述した計算機環境を利用して、蓄積リング収納部内や光学ハッチ内にある装置群が、あたかも手が届く距離にあるかのような制御を実現しています。実は、ここまでの解説では、大型の放射光施設で特徴的な重要な技術が欠けています。機器とのインターフェースとして紹介した USB や GP-IB の到達距離は、せいぜい10~20 m です。モータのケーブルを伸ばしたとしても、50 m が関の山です。これでは、ビームラインが目の前にあるような制御環境を構築することはできません。大学の研究室等の制御システムと大きく違うのはこの点でしょう。実験室レベルでは、机の上の、いわゆるデスクトップ環境で完結した制御系で充分なのですが、1 km にもおよぶビームラインを有する放射光施設では、リモート制御という概念が必ずついてまわります。次項では、放射光ビームラインにおけるリモート制御とその延長線にある遠隔実験やコラボラトリについてお話しいたします。

2.3 リモート制御とコラボラトリ

リモート制御の要件について理解して頂くために、Fig. 4 に SPring-8 の長尺ビームライン (BL29LXU) における制御システムの構成を示します。最下流の実験ステーションから、約 1 km 離れた挿入光源を自由に制御する必要があります。

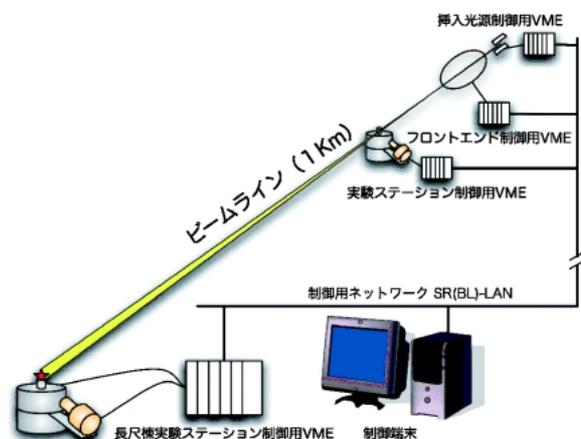


Fig. 4 Equipment setup of control system in 1 Km beamline of SPring-8. VME is distributed for the control of insertion device, front-end, and several experimental stations.

ありますが、他のビームラインや施設外など、無関係なところから勝手に操作されることを防がなくてはなりません。

リモート制御は、二つのパートに分けて考えることができます。一つは、ネットワークシステムであり、他方がネットワークプロトコルの上に実装されたソフトウェアです。前者は、ネットワークケーブルを敷設するだけと考えられがちですが、トラフィック量の推定やパフォーマンスチューニング等、巨大なネットワークを構築する際は注意が必要です。ビームライン制御システムにおけるネットワークシステムは、人でいう神経組織そのものです。1箇所のネットワーク障害が、全てネットワークの停止に至らないようにしなくてはなりません。冗長性を考慮した設計など、耐障害性の高いネットワークシステムの構築は、施設の安定稼働のために最も重要となります。また、近年特に注意が必要なのは、ネットワークセキュリティの問題です。ネットワークのセキュリティコントロールと、ネットワークを利用した制御システムは切り離して考えることはできないでしょう。一見単純なネットワークシステムも大型の放射光施設においては、制御システムの基幹技術のひとつとなっています。

もうひとつの構成要素であるソフトウェアは、主に計算機間の通信をサポートします。長尺ビームラインの例 (Fig. 4) でも示したように、一般的なリモート制御環境は複数の計算機により構成されます。これらの計算機は、機器制御用やユーザインターフェース用など、役割を分担し、同一のネットワーク上に接続されます。このような制御システムを、「ネットワーク分散型制御システム」と言い、規模の大きな制御システムでよく利用されます。分散型のメリットは、計算機の役割分担によって機能を細分化することで、新たな機能の追加や特定の不具合を修正する際の作業の範囲を小さくすることにあります。反面、ネットワーク通信を利用したソフトウェア開発は、複雑なネットワークプロトコルの実装やアプリケーション間の同期制御等、高度な開発技術を要します。ここにリモート制御の構成要素の一つであるソフトウェアが活躍します。先に紹介した STARS や MADOCA は、リモート制御のための通信機能を内包したフレームワークです。これらを利用することで、ネットワーク通信を意識せずに、高度なリモート制御環境を実現できます。同時に、これらの通信用ソフトウェアは、先のネットワークシステムと連携した通信制御を行い、想定しないエリアからの機器の操作を制限します。

近年、リモート制御の範囲を拡大して、大学など、施設外からの実験環境の整備⁴⁾が進みつつあります。その背景としては、SuperSINET (Super Science Information Network)⁵⁾に代表される学術ネットワークの導入が挙げられます。施設間を10 Gbps ものバックボーンで相互接続し、施設内部のネットワークと遜色の無い WAN (Wide Area Network) 環境が実現されています。これを利用して、

KEK-PF の一部では、ビームラインに行かなくても自分の研究室に居ながら放射光利用実験が可能な環境が実現され始めています。遠隔地からの利用実験の流れは、ESRF や APS をはじめ、世界中の放射光施設で始まってきます。WAN を利用した遠隔実験には、施設内のそれとは違ったセキュリティ環境の整備が要求されます。既に運用されている遠隔実験環境 (コラボトリー) については、3章の「KEK-PF における制御システムの実際」で紹介いたします。

2.4 標準化された制御システムの存在意義

以上で、ビームラインにおける制御システムの主要なパーツの全てが埋まりました。ここで、本シリーズの趣旨説明であった自動車を例に、放射光ビームラインにおける制御システムの存在意義について考えてみましょう。ビームラインはそれぞれの特徴から、オフロードが得意なビームラインや、サーキットが得意なビームライン、街乗りにも最適なビームラインなど様々です。しかし、ブレーキ、アクセル、ハンドルなど、統一的な操作性を有する制御システムの構築は、運転の効率化や安全性を実現する上でとても重要になります。つい10数年前までは、ビームライン毎に独自の制御システムが構築されていました。あるビームラインではアクセルとブレーキが同じペダルで構築されていたり、極端な場合にはブレーキが無かったりという状況でした。そのためユーザはビームライン毎に特殊な使用方法を習得しなければならず、とても利用し易い環境とは言えませんでした。これは、制御システムを構築する側にも当てはまりました。独自に構築された制御システムはそれぞれには使い勝手がよいのですが、制御対象がさほど変わらないため、似て非なるシステムになりがちです。結果として、たくさんの職人たちが、それぞれのビームラインで、同じような苦勞をしていたのです。現在、本稿で紹介する国内の2大放射光施設では、各ビームラインから共通部分を抽出し、制御システムの標準化への取り組みを行っています。これにより、制御システムの構築や保守の効率化だけではなく、ユーザにとっても大きなメリットをもたらす共通の実験環境を提供することが可能となりました。

ビームラインの制御システムは、ユーザが光を自在に操るためのシステムです。現時点では、全ての実験を包括したシステムではありませんが、将来的には殆どのビームラインにおいて、強力なユーザ支援の環境として整備されるでしょう。次の章では、日本を代表する2大放射光施設における制御システムの実際を概観します。「制御システムの標準化」への取り組みとして、KEK-PF では STARS, SPring-8 では MADOCA と呼ばれる制御用アプリケーションフレームワークがそれぞれ開発されました。それぞれの施設の目指す方向性の違い等、施設毎の特徴が見て取れると思います。

3. KEK-PF における制御システムの実際

3.1 ビームライン制御の標準化への KEK-PF における取り組み

はじめに、KEK-PF において実施している制御システムの標準化の取り組みについてお話しします。KEK の PF や AR で稼動している約70の実験ステーションの制御はこれまで各ビームライン担当者の裁量に任されてきました。実験ステーションに合わせて個々には非常に優れているが、似て非なるシステムが個別に構築されました。このため「ビームライン担当者が個々にシステムを構築することに費やすマンパワーの浪費」や「ビームライン担当者の交代時などにスムーズな引継ぎが必ずしも出来ていない」などの問題点が出始めました。また、KEK-PF では同じ実験手法であるにも関わらず、時期によって使用する実験ステーションが異なるということがあり、「同じような実験を行う場合でもステーションが異なると別の制御システムの操作方法を取得しなければならない」という問題点もありました。これらの問題点を解決するためにビームラインの制御系をある程度標準化することが非常に重要であるとして「ビームライン制御の標準化」⁶⁾に取り組み、本研究機構で開発した STARS と呼ばれるメッセージ配信型システムを採用し一部の実験ステーションから導入を始めています。

STARS は2001年に KEK-PF で開発されました。Fig. 5 のように STARS サーバを中心としてユーザ等が制御を行う GUI (Graphical User Interface) や各種光学系の制御を行う機器を司る I/O などの各種クライアントソフトウェアから構成されており、各々が TCP/IP を使用してテキストベースの STARS 用メッセージをやり取りすることでコミュニケーションをとっています。

例えばパルスモータを動かす I/O クライアントのノード名が「PluseMotor」であって、それを制御しようとする GUI クライアントのノード名が「GUI」の場合に、パ

ルスモータに100パルスを送信するためには、下記のメッセージを GUI クライアントから STARS に送信することになります。

```
GUI>PulseMotor SetValue 100
```

STARS は、相手先のノード名によって、その後にあるメッセージ部分を該当する I/O クライアント (すなわち制御対象の機器) に送信します。下線を引いた「SetValue 100」にあたる部分が制御コマンドになります。これらは共通コマンドとして規定され、公開されています。このコマンドを使うことで、ユーザ持ち込みの PC で構築した独自の計測システムに、実験ステーションに常設の光学系を連携させた高度な計測システムの構築が可能となっています。STARS の特徴としては、コアとなるサーバ本体と周辺の I/O クライアントが Perl というフリーのスクリプト言語を使用して開発されていることが挙げられます。実験ステーションで用意された PC がどのような OS であっても、Perl が動作可能であればこの標準化システムを導入することが可能になっています。I/O クライアントの実装として、装置を抽象的に扱い複数の機器を連携させた高度な制御を実現するものがあります。例えば分光器をあるエネルギーに変更する場合などは下記のメッセージを送ることにより、先に書いたようにユーザが持ち込んだ PC で制御を行う場合でも、実際に機器を動かすパルスモータコントローラ等を意識することなく目的のエネルギーを得られるように分光器を動かすことが可能になります。なお、STARS を介したデータ転送速度は約 4 MByte/Sec の通信速度になっています。

<STARS クライアント「User1」から分光器のエネルギーを10 KeV に設定する場合>

```
User1>Mono.Energy SetValue 10 KeV
```

STARS サーバは、オプション機能としてログ機能とスクリプト機能を持っています。ログ機能とは、上記で書いたコマンドをログとしてファイル形式で記録を行うものです。この機能を使用することで、どのような制御を行ったか後から確認することができます。スクリプト機能を利用すると、定形の処理を自動化することができます。例えば、ミラーの角度を多軸で変更する場合、軸を動かす順番が決まっている場合があります、それぞれの軸に対する制御コマンドを順番に処理する必要があります。これらの一連のコマンドの流れを編集して一つの制御コマンドとして扱うことが出来るようにする機能が、このスクリプト機能です。スクリプトを作成するためには専用のソフトウェアが用意してあります。ユーザはこのソフトウェアを使用して、それぞれの測定に合ったスクリプトを作成することができます。

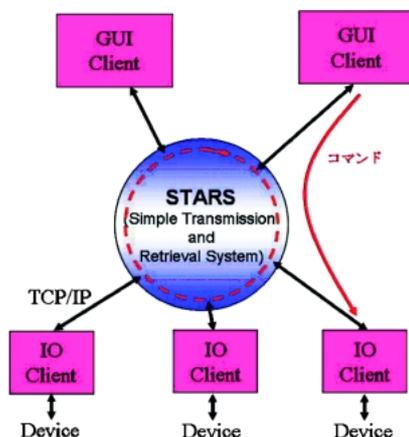


Fig. 5 Conceptual scheme of STARS.

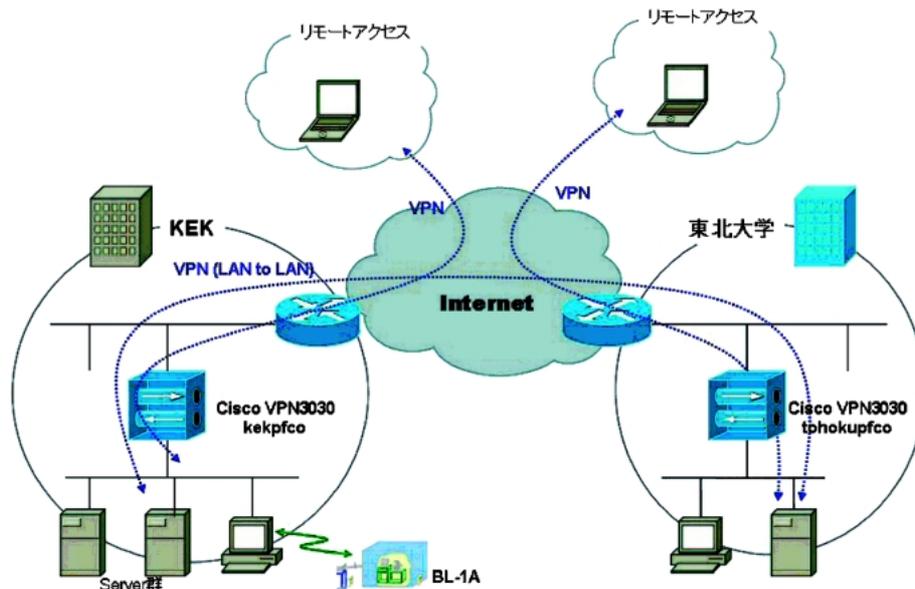


Fig. 6 Conceptual chart of network for “collabo”.

3.2 コラボラトリ

大型プロジェクトなど多くの研究機関からの研究者が参加するような実験の場合、それぞれの研究機関の全ての人々が遠路はるばる実験ステーションに集うのは、効率の良い方法とは言えません。そこで学術創生研究「新しい研究ネットワークによる電子相関係の研究」（課題番号：13NP0201）の一部として、KEK-PFに「コラボラトリ」の構築を行いました。コラボラトリは、collaborationとlaboratoryを組み合わせた造語です。研究所（ラボラトリ）間の共同研究（コラボレーション）をより緊密に進める21世紀の新しい研究体制を目的として、WANを利用した「広域リモート制御システム」がBL-1A（多目的X線回折用ビームライン）に導入されました。BL-1Aの回折計はWindows上で動作する専用のソフトウェアによって制御・計測が行われ、また光学系は3.1で述べた標準化に沿った形の光学系制御システムが導入されています。広域リモート制御を安全に行うためには安全なネットワーク環境の構築が不可欠です。これを実現するためにコラボラトリ専用のVPN（Virtual Private Network）装置を設置し、広域リモート制御を行う場合は、VPN経由で接続する方式をとっています。VPNとは、通信相手を固定した専用の非公開ネットワークを仮想的に構築する技術で、通信内容の暗号化により高い通信内容の安全性を確保することが可能です。今回のシステムでは、BL-1Aと東北大学理学部村上研究室にVPN装置を設置して、インターネットVPNを構築しました。このVPNに接続されているネットワークはKEK-PFや東北大学の内部LANからも完全に独立しており、たとえKEK-PFの内部からであってもVPN接続なしにBL-1Aの制御をリモートで行うことは出来ない仕組みになっています。なお、VPN接続に必要

なIDとパスワードはKEK担当者によって一元管理されています。Fig. 6に広域リモート制御の概念図を示します。

コラボラトリの特徴として、一対一の広域リモート制御のみではなく、一対多での広域リモート制御を可能とするためにT.120プロトコルを使用したデータ会議技術のアプリケーション共有を使用しています。T.120はデータ会議を行うための国際標準規格で、これに対応した様々なソフトウェアがあります。そのため、T.120プロトコルをサポートしているソフトウェアを使用すれば、BL-1Aで使用しているWindowsでなくても広域リモート制御が可能になります。広域リモート制御のためのデータ会議への参加はFig. 7の流れで行われます。

データ会議へ参加すると自動的にアプリケーション共有を設定したパソコン（親PC）の画面が、他の会議参加パソコン（子PC）に表示されます。子PCから遠隔操作を行う場合は「制御権」を親PCに要求し、許可を受けてから操作可能となります。この手続きによって広域リモート制御の安全性確保に役立っています。アプリケーションを共有されたソフトウェアはFig. 8のSiteBのようにデータ会議に参加したすべてのパソコンに同時に表示されますが、操作できるのは制御権の許可を受けた一台のみです。子PCから遠隔操作を行っているときは、親PC上であってもそのソフトウェアを操作することは出来ません。通常はBL-1Aにある制御用パソコンを親PCとしていますが、データ会議に参加しているすべてのパソコンが親PCになることも可能です。また、広域リモート制御に参加している人たちのコミュニケーション手段としてテレビ会議システムも別途導入しています。

これまでに、学術創生研究プロジェクトに関係していたグループを中心に使用され実績をあげています。しかし、

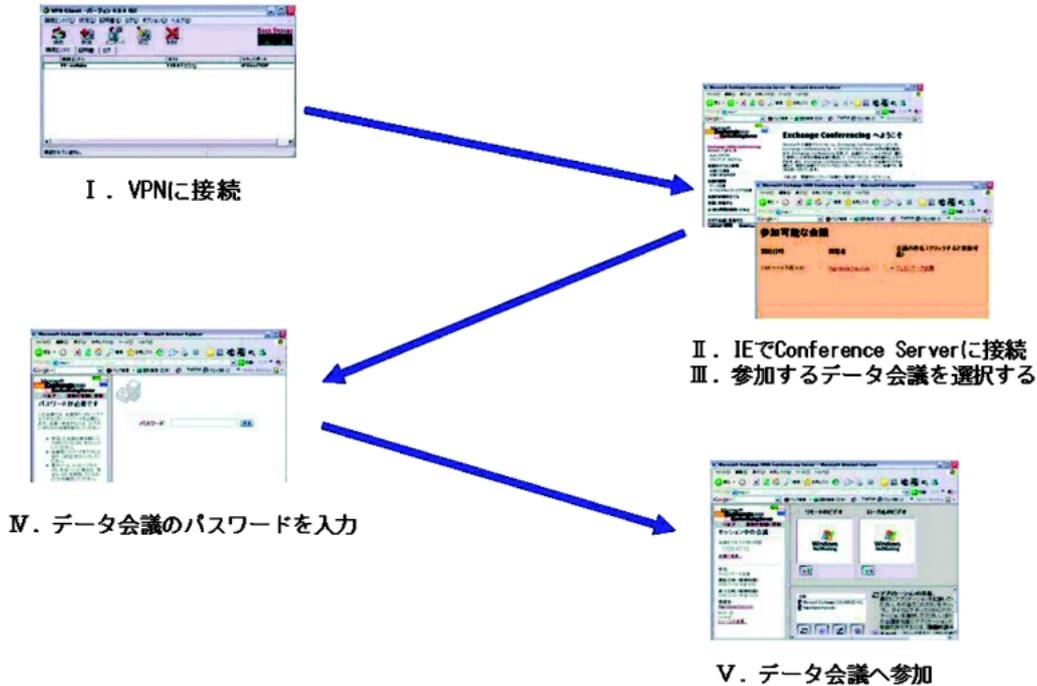


Fig. 7 Flow of participation in data conference.

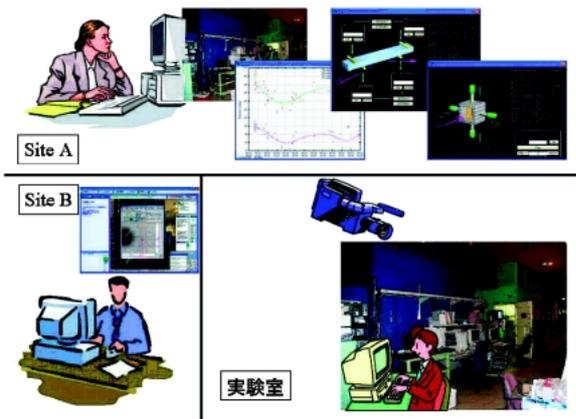


Fig. 8 Image of experiment that uses “collabo”.

問題点も幾つか指摘されているのも事実です。例えば、リモート制御のために画面そのものをネットワークを通じて送っているため、通信帯域や、1対多の接続を実現するサーバのパフォーマンス不足からリモート操作の反応速度に1秒程度のタイムラグが生じています。また、第2回で触れられているようにビームラインは放射線発生装置であるため実験ステーションが無人になるようリモート制御を行うことは出来ません。装置の状態を確認するためにWebカメラを設置しているものの、突発の問題回避のためにもビームラインに人手が必要となります。今後はこれらを改善していくことが課題となります。

4. SPring-8 における制御システムの実際

SPring-8では、建設当初からの取り組みにより、加速器とビームラインの制御システムをハードウェアとソフトウェアの両面で共通化することができました。また、ビームラインでは、現在稼働している約50本のビームラインで、共通の計算機環境を構築し、多くのソフトウェアが再利用可能となっています。残念ながら、実験ステーションに関しては、実験のバリエーションが極めて多く、様々な計測手段が必要となるため、実験ステーションの制御システム標準化はごく一部に限られます。近年、XAFSや粉末回折実験など、比較的単純な計測システムを足がかりに、実験ステーションまわりの共通化が始まっています。

4.1 基本構成

SPring-8のビームラインには大別して4種類の計算機が装備されています。(1)ビームライン全体を取り仕切るUNIXワークステーション、(2)挿入光源やフロントエンドそして分光器などのアクチュエータの制御を行うVMEシステム、(3)これらの操作のためのグラフィカルユーザーインターフェースを備えたユーザ用端末です。また(4)これらにコマンドを送信して光を操るとともに、実験ステーションに設置された回折計などの実験装置を制御するユーザPCと呼ばれる計算機も装備されています。通常ユーザが触れるのは、実験ステーション毎に設置されたユーザ用端末とユーザPCです。これらの計算機を制御専用ネットワーク上に分散配置して、効率的な制御環境を構築しています。

基盤となる計算機環境は、汎用性やスケーラビリティ(2.2項参照)を重視し、ネットワークシステムも汎用的な構成により基盤技術の共通化をはかっています。UNIXをベースとしたワークステーションを採用し、強力なネットワーク分散環境の基盤としました。機器を直接制御する計算機は、スケーラビリティ、信頼性に優れたVMEを多く使用しています。

UNIXワークステーションとしては、これまでHP製ワークステーションを使用していましたが、最近では、対費用効果が高く、保守性に優れたx86サーバとLinuxの組み合わせに移行しつつあります。VMEシステムは、CPU環境として、Solaris9(x86)を利用しています。現在、汎用的なアナログ入出力ボード、デジタル入出力ボードをはじめ、GP-IB、パルスモータコントローラ、エンコーダ入力、カウンタ、熱電対入力など、多くのI/Oボード類が利用可能となっています。

SPring-8の制御用基幹ネットワークは、大きく二つに分かれています⁷⁾。一つは加速器を含む制御専用のネットワーク(SR(BL)-LAN)で、ギガビットイーサネットにより構成されています。放射光ビームラインの制御システムは、このSR(BL)-LAN上に構築されています。もう一つは実験ステーションの制御/計測システムのためのネットワーク(BL-USER-LAN)で、こちらもギガビットイーサネットをバックボーンとした高速ネットワークになっています。放射光ユーザは、持ち込んだPC等をBL-USER-LANに接続し、放射光実験や高速データ収集などに利用します。実効的なスループットは800 Mbpsに達しています。セキュリティ維持のため、ファイアウォールによりお互いのネットワークおよびインターネットから隔絶しています。加えて、BL-USER-LANではVLAN技術によってビームライン毎に独立したネットワーク環境を構築し、異なるビームラインからの不要な操作を制限しています。これによって、信頼性の高い制御環境を構築しています。また、不特定多数の持ち込みPCが接続されるBL-USER-LANでは、特別のセキュリティ対策を施し、ウィルスに感染したPCを自動的にネットワークから隔離するための対策⁸⁾を行っています。

4.2 ソフトウェア環境

SPring-8では、独自に開発した制御用ソフトウェアフレームワーク:MADOCAを採用し、ソフトウェアコンポーネントの標準化を行っています。MADOCAは、メッセージベースの制御コマンド体系を利用して、制御機器特有の制御コマンドを隠蔽します。これにより、簡便な制御メッセージだけで、複雑な操作を手軽に実現することができます。例えば、BL49XUの実験ステーションに導かれるX線のエネルギーを10 keVに選択する場合は、以下のようなメッセージとなるでしょう。

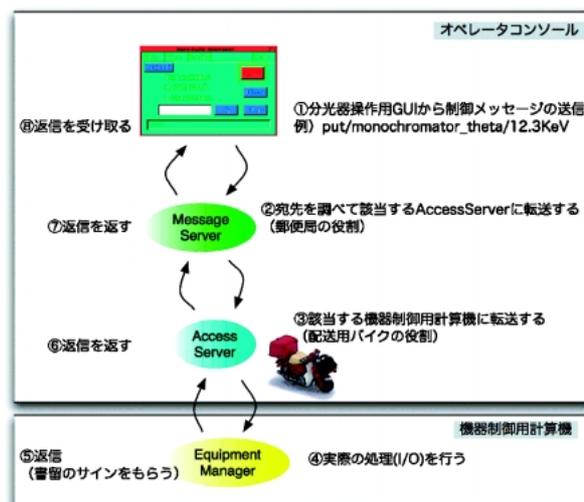


Fig. 9 Flow of control messages in MADOCA.

put/BL49XU/10 keV

これによって分光器の第1, 第2結晶および結晶間距離に加え、挿入光源のギャップを計算機により結合した制御を実現できます。実際に計算機が行う制御シーケンスは、結晶の衝突を避けるためや、挿入光源の操作による軌道変動の確認のため、細かなステップでモータの駆動行っています。このように、分光器や制御装置の種類や特性に依存せず、どのビームラインでもユーザの意思に近いメッセージで機器を操作できることが、MADOCAの最大のメリットです。Fig. 9にMADOCAの制御フローを示します。

現在、MADOCAは様々なプラットフォームで動作しています。たとえば、マッチ箱サイズの超小型計算機^{9,10)}上にMADOCA環境の移植を行い、GP-IBやシリアルインターフェースしか持たない計測器機を、手軽にネットワーク対応機器として利用することができるようになってきました。

4.3 ビームライン制御の例：挿入光源の独立調整について

SPring-8の建設当初、ユーザが自由に挿入光源のエネルギーや偏光を変えられることが大きな目標でした。今では当たり前のこの技術ですが、SPring-8のように挿入光源が26台もある施設で、それぞれのビームラインで挿入光源を独立に操作可能でなければ、どれほど不便でしょうか。挿入光源は磁石列のギャップ操作により電子軌道を制御し、放射光の特性を変化させる装置ですが、挿入光源のギャップ操作は、電子軌道に変動を与えてしまうため、他のビームラインで放射光の射出方向が変動するなどの影響が起きます。このためどこかのユーザがエネルギーを変えるたびに光軸がずれてしまうかもしれません。そこで、挿入光源装置の高精度な磁場調整を行うとともに、制御シ

システムによるきめ細かな制御が必要不可欠でした。挿入光源の前後にステアリング電磁石を置いて、ギャップ操作に連動した軌道補正を、数ミリ秒間隔の高速なフィードフォワード制御¹¹⁾と予測制御¹²⁾を組み合わせで行います。これにより挿入光源の磁場変動が電子軌道に与える影響を電子ビームサイズ以下に収めています。どこのビームラインで挿入光源を動かしても、他のビームラインにその影響がほとんど見えないのです。

4.4 便利なツールの紹介

SPring-8 では、制御システムが管理している全てのコンポーネントについて、真空度やバルブの開閉ステータス、パルスモータの位置情報などを一定間隔でデータベースに記録しています。SPring-8 で“ayagiku”という名前を聞いたことがあるかもしれません。これは SPring-8 のビームライン建設当初からの機器の状態を収録したデータベースです。ユーザは、必要な時にいつでも、手近な Web ブラウザ上で、データベースからビームラインの機器の状態を拾い出すことができます。たとえば、実験データに異常が見られた場合、その時点の加速器やビームラインの状態を調べ、データの健全性を確認したり、ビームをロストした際に、装置の直前の状態を確認したりすることが可能となります。

“ayagiku”は、主に SPring-8 の基幹コンポーネントのためのデータベースシステムですが、ビームライン単位または個人ベースで利用可能な、手軽なシステムとして、MyDAQ¹³⁾を整備しています。MyDAQ は、MADCOA で採用したメッセージベースのコマンドを利用して、データベース上のテーブル作成やデータの登録を、利用者が自由かつ簡便に行える様に設計されています。登録されたデータには、マイクロ秒単位のタイムスタンプが自動的に押され、簡単な操作でグラフ表示を行ったり、データ列をまとめて取得したりすることができます。MyDAQ は、UNIX 系 OS だけでなく、Windows, MacOSX などでも動作します。ユーザが、より簡便に MyDAQ を利用可能とするために、ビームライン毎の専用 MyDAQ サーバの設置を検討しており、実現すれば、全てのビームラインで実験ステーションの測定系や実験ノートさえもデータベース化することが出来るようになるでしょう。

上記以外にも、実験ステーションにおけるビームの安定化を図る MOSTAB¹⁴⁾、高速・リアルタイム制御に特化した汎用ロジックボード¹⁵⁾や、可搬性の高い CompactPCI ベースの高速カウンタボード¹⁶⁾の開発を行っており、バラエティに富んだ実験ステーション制御システムへの対応を行いつつあります。

5. おわりに

現在、ビームラインで利用可能な制御システムは、多く

のユーザにとってブラックボックス的な存在になっています。透過的な制御システムは理想的な形態なのかもしれませんが。しかし、ビームラインを利用する上で制御システムを理解し適切に使用することは、効率的に実験をこなすために重要です。本稿ではこのブラックボックスを展開し、分かりやすい解説に努めましたが、如何でしたでしょうか？本稿の結びとして、制御システムの世界的な情勢や今後の展望について紹介いたします。

SPring-8 も KEK-PF も導入時期・使用している I/O 機器の違い・制御対象機器の規模（制御対象の数）の違いからそれぞれ独自に最適な制御システムが構築されています。また海外では、多くの研究施設で利用されている EPICS¹⁷⁾や、ESRF の TANGO¹⁸⁾、DESY の ACOP¹⁹⁾など、様々な“標準”制御システムがあります。ユーザの立場からみれば、どれか一つの制御システムに統一されれば、一度作成した計測プログラムを容易に再利用できるため、計り知れないメリットになるでしょう。しかし、それぞれの制御システムが対応するハードウェアの違いやサポート面の問題などから、全ての研究施設の制御システムを統一するのは困難だと思われます。近年、これらの問題を解決する手法として、それぞれのシステムが相互に通信可能になるようなゲートウェイの開発が活発に行われています。現在では、ACOP-EPICS, ACOP-STARS, EPICS-TANGO など様々なゲートウェイが利用可能となっています。ゲートウェイを上手く利用すれば、他の制御システム用に作成したプログラムを使用することが可能となり、ユーザの負担がさらに軽減されるようになるかも知れません。

KEK-PF におけるコラボラトリで紹介した広域リモート制御の需要は、今後ますます高くなると思われます。さらに高い次元の広域リモート制御環境を実現するために、まだまだ新しい技術開発が必要です。特に、広帯域でセキュアなネットワーク基盤の発展は必要不可欠です。リモート制御の陰に隠れて忘れがちなのが、システム全体の自動化です。現時点で実現している自動化の多くは「人間の操作の自動化」ですが、「人間の判断の自動化」が実現した場合、現在の測定環境が劇的に変化するものと考えられます。現在の広域リモート制御は、新たな研究のスタイルといった側面を持つ一方、「人間の判断の自動化」を補う解決方法のひとつと見ることもできるでしょう。「人間の判断の自動化」の試みは、古くは A.I. (人工知能) として広く研究されていますが、実際のビームラインにおける制御や計測を完全に自動化するレベルには到底至っていません。現実には、複雑な条件判断を実装した、高度なソフトウェアの作成が必要になるものと考えられます。

理想的な計測環境とは、実験に関わる全ての装置の状態や計測器機のデータが全て、いつでも、どこでも、リアルタイムに、または欲しい時に取得可能な環境と考えることができます。この環境の構築は、多分、現在の制御システ

ムのすぐ先にあると考えています。しかしその実現には、測定の自動化や計測データのデータベース化のための膨大なソフトウェア開発が必要となります。現在の制御システムが、真に利用者のためのシステムとなるためには、これらのソフトウェアの充実が最優先課題であると言えるでしょう。

コンピュータを利用した制御技術は日進月歩どころか秒進分歩の勢いです。もちろん、安定・安心な制御を実現する場合は、新技術に飛びつくばかりが良いとは限りませんが、単に安定しているからと古い技術にばかり固執続ける訳にもいきません。これらのバランスを上手くとして今後も SPring-8 や KEK-PF のビームライン制御は、日々進化して行くでしょう。

お願い

本シリーズでは、初心者ユーザーが陥りやすい誤りやビームライン担当者の貴重な経験談を募集しております。最終回で紹介したいと考えております。また、本シリーズに関してご意見・ご要望がございましたら編集担当 (SPring-8 JASRI 大橋治彦/hohashi@spring8.or.jp, KEK-PF 平野馨一/keiichi.hirano@kek.jp) までどうぞお便りください。

参考文献

- 1) 標準機械工学講座20 改訂 精密測定(1), 青木保雄 (コロナ社).
- 2) <http://pfwww.kek.jp/kosuge/paper/g2001-kosuge.pdf>
- 3) R. Tanaka et al.: "The first operation of control system at the SPring-8 storage ring", Proceedings of ICALEPCS '97, Beijing, China, 1997, p1.
- 4) <http://msl.kek.jp/mSR/shinpro/index.html>
- 5) http://www.sinet.ad.jp/s_sinnet/index.html
- 6) 「PFにおけるビームライン制御の標準化」KEK-Internal 2006-1.
- 7) T. Ohata, et al.: Secure network for beamline control, Nucl. Instr. and Meth. A 467-468 (2001).
- 8) M. Ishii, T. Fukui, M. Kodera, T. Ohata and R. Tanaka: "CONSTRUCTION AND MANAGEMENT OF A SECURE NETWORK IN SPRING-8", Proc. of ICALEPCS '05, Geneva, Switzerland, 2005.
- 9) <http://www.atmark-techno.com/products/armadillo/a210>
- 10) T. Masuda, T. Fukui and R. Tanaka: "DEVELOPMENT OF A LINUX-BASED SMALL-SIZE CONTROLLER USING POE TECHNOLOGY", Proc. of ICALEPCS '05, Geneva, Switzerland, 2005.
- 11) T. Tanabe, et al.: SPring-8 Annual Report, 1996, p228.
- 12) T. Nakatani et al.: "Scheme for Precise Correction of Orbit Variation Caused by Dipole Error-field of Insertion Device", Rev. Sci. Instrum. Vol. 76, 055105 (2005).
- 13) A. Yamashita and T. Ohata: "MyDAQ, a Simple Data Logging and Display Server", Proc. Of PCaPAC '05, Hayama, Japan, 2005.
- 14) Y. Nishino, et al.: Proceedings of the SPIE, Volume 5195, pp. 94-103 (2003).
- 15) T. Hirono: presented at データ収集 (DAQ) ワークショップ2007, 2007.
- 16) Y. Furukawa, Proceedings of PCaPAC '06, Newport News, USA, 2006.
- 17) <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- 18) A. Gotz, et al.: "TANGO a CORBA Based Control System", Proceedings of ICALEPCS 2003, Gyeongju, Korea, 2003.
- 19) I. Deloose, P. Duval and H. Wu: "The Use of ACOP Tools in Writing Control System Software", Proceeding of ICALEPCS '97, 1997.