

KEK 電子陽電子入射器におけるアライメントレーザー フィードバックシステムの改良

IMPROVEMENT OF ALIGNMENT LASER FEEDBACK SYSTEM FOR KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

市川智浩^{#, A)}, 草野史郎^{A)}, 工藤拓弥^{A)}, 水川義和^{A)}, 諏訪田剛^{B)}, 佐藤政則^{B)},
Tomohiro Ichikawa^{#, A)}, Shiro Kusano^{A)}, Takuya Kudou^{A)}, Yoshikazu Mizukawa^{A)},
Tsuyoshi Suwada^{B)}, Masanori Satoh^{B)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

^{B)} KEK, Accelerator Laboratory/SOKENDAI, Department of Accelerator Science

Abstract

Currently the alignment system of the KEKB injector LINAC referred to the laser beam passing through each two straight beam line. One of the system underlying the alignment of the injector there are those based laser. This system is measured using He-Ne laser and QPD installed in 2 of straight section respectively. The location of He-Ne laser is measured using QPD and ACC unit is adjusted using the measured data. Development of a system was advanced in fiscal year 2009 and Feedback system using a computer was built. The laser location stability of the termination of 500 m straight section was $40 \mu\text{m}$ of $\pm (1 \sigma)$ in fiscal year 2013, and therefore highly precise Alignment evaluation could be done now. In this report we will present the system about the Feedback system built based on EPICS.

1.はじめに

現在、KEK 電子陽電子入射器（以下、入射器）では、次期計画である SuperKEKB に向けて入射器増強および高度化が進行中である。それを受け、入射器ではアライメント作業が進められているが、入射ビームの高品質化のため、高精度なアライメントが求められている。入射器アライメントシステムの 1 つに、レーザーを基盤としたものがある。本システムは、2 つの長直線部（A-B および C-5 セクタ）にそれぞれ設置された He-Ne レーザーおよび四分分割受光素子シリコンフォトダイオード（QPD; Quadrant-segmented Photo-Diode）を用いて測定をおこなう。QPD は、加速管が搭載された加速ユニット架台の両端面に取り付けられている。架台内部にはレーザー光路用の光軸管が組み込まれており、真空排気した管内を伝搬するレーザー位置を QPD により測定する。この測定に基づき、光軸からの変位量がゼロになるように、加速ユニットの機械的な調整をおこなう。2009 年度よりシステムの開発が進められ、計算機によるフィードバック（以下、FB）制御システムを構築した。2013 年度には、500 m 長直線部終端におけるレーザー位置安定度 $\pm 40 \mu\text{m}$ (1σ) を達成し、高精度なアライメント評価が可能となった^[1]。FB 制御システムは、長直線部終端に設置される Windows 型オシロスコープおよび出射部の駆動式ピコステージ（以下、ステージ）から構成される。ステージを用いることにより、レーザー出射角度の精密自動制御を実現している。本稿では、本 FB 制御システムの詳細について報告する。

2. アライメントシステムについて

2.1 概要

入射器では、2011 年の東日本大震災により、加速管および電磁石などの加速器コンポーネントに大きなミスアライメントが生じた。SuperKEKB 計画での電子ビーム入射は、KEKB 運転時と比較して 5 倍の電荷量（5 nC）かつ 10 分の 1 以下の射影規格化 rms エミッタンス（20 mm · mrad）が求められている。加速器コンポーネントのミスアライメントは、エミッタンス増大を引き起こすため、これらの精密アライメントが重要課題となっている。そのため、レーザートラッカー（Leica AT-401）を用いたコンポーネントの 3 次元座標測定により、コンポーネントの直接アライメントを可能とした。また、既存のレーザーを基盤としたアライメントシステムの改良を重ね、精度および安定性の向上を図っている。

2.2 レーザートラッカーによるアライメント

レーザートラッカーは、2011 年より入射器に導入されたシステムであり、架台および搭載された加速器コンポーネントの精密測量を直接おこなうことができる。レーザートラッカーによる測量には、リフレクタと呼ばれるターゲット、レーザーを出射するトラッカー本体、トラッカーの操作および測定をおこなうための制御用 PC が用いられる。

レーザートラッカーによるアライメント測定では、始めに、測定の対象となる加速器コンポーネントや架台、基準となる床面や壁面に台座を設置し、その上にリフレクタを設置する。次に、トラッカー本体からレーザーを出射し、リフレクタからの反射光を測定する。これにより求められた距離情報とトラッカー本体に組み込まれているエンコーダによる角度

[#] mmc-ichi@post.kek.jp

情報を利用して、リフレクタが置かれた位置の 3 次元座標が決定される。

入射器では、エミッタンス増大に関する計算機シミュレーション結果を踏まえて、短区間におけるアライメント目標精度を $100 \mu\text{m}$ 以下とした。そのため、トラッカーおよびリフレクタとの相対距離を、5 m 以下に収まるように使用している^[2]。

3. レーザーアライメントについて

Figure 1 に、レーザーアライメントシステムの構成図を示す。また、Figure 2 に、加速管架台およびレーザーアライメントシステムの関係を示した。本システムは、レーザー光軸安定化のためのステージを含めたアライメント用レーザー出射部、レーザーを伝搬させるための光軸管、光軸測定用の QPD、レーザー位置データ収集系、および FB 制御部から構成される。

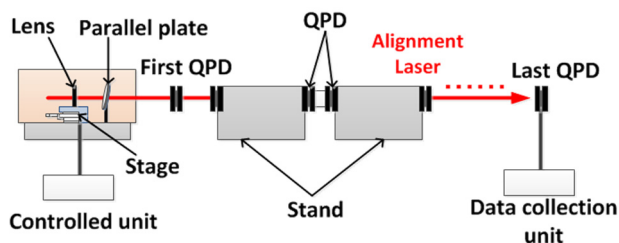


Figure 1: Schematic drawing of the laser alignment system.

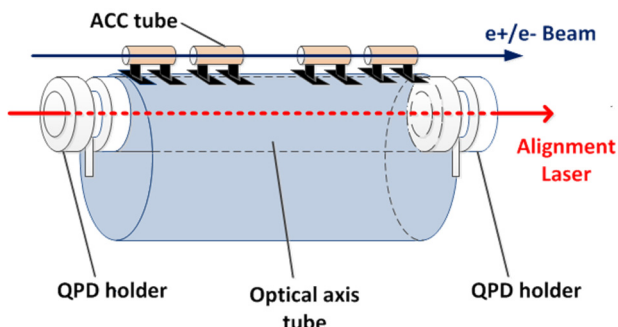


Figure 2: Outline of the girder for accelerating structure.

Figure 3 に示すように、入射器は、J-Arc と呼ばれる 180 度偏向部を挟んで 2 つの長直線部から構成される。それぞれ、125 m 長の直線部 (A-B セクタ) および 475 m 長の直線部 (C-5 セクタ) となっており、全長 600 m の線形加速器である。ビーム加速の基本となる加速ユニットは、耐震構造を有する約 10 m 長の円筒形 ($\phi 508 \text{ mm}$) 構造の架台上に設置されている。1 台の架台上には基準プレートが設けられ、加速管が 4 本設置されている。

レーザー出射部にはレーザー光源の他、反射ミラーおよびレンズが設置されている。レーザーの入射角度を調整するための球面平凸レンズは、ステー

ジ上に設置されており、直接手で触れなくとも調整が可能となっている。各架台には光軸管が組み込まれており、その中をアライメント用レーザーが伝搬する仕組みとなっている。各直線部の始点にはレーザー出射部があり、それぞれ独立に測定が可能となっている。測定の精度を高めるために、レーザー出射時には光軸管内部を真空状態とする。ディテクタとオシロスコープで測定した終端 QPD のデータを基に、ステージの自動 FB 制御をおこない、レーザーの安定化を図っている。今回、本 FB 制御に着目し、改良をおこなった。

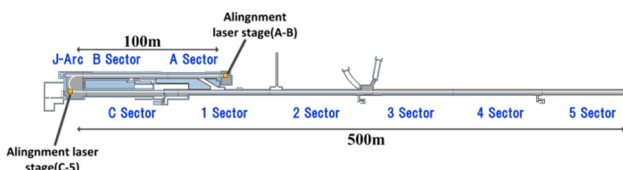


Figure 3: Outline of the KEK injector linac.

3.1 レーザー出射部

アライメントの基線となるレーザーには、レーザー光のパワー分布が理想的なガウス分布に近く、波長が安定である He-Ne レーザーを使用している。He-Ne 管とその光学系は、市販の光学定盤 ($1500 \times 900 \text{ mm}$) 上に設置している。レーザー出射部に面積の大きな光学定盤を用いることで光路長を長く取り、レーザー径の安定化を図っている。

レーザー出射部は、温度や気圧変化に起因する空気の攪乱を避けるため、光学系全体を大きなアクリルカバーで覆い、さらにその上からビニールシートを被せている。特に安定性を求められる C-5 セクタレーザー出射部の架台床面 ($1500 \times 500 \text{ mm}^2$, PHC 杭深さ 1 m) は、トンネル床面と隙間を開けて滞りすることで建屋の変形に起因する床変動の影響を直接受けないようにしている。また、床面に剛性の高い鉄架台を固定し、この上に光学定盤を固定することでも安定化を図っている。

3.2 レーザー光軸安定化用ステージ

光軸の入射調整は、始点 QPD に対する平行移動および終点 QPD に対する入射角度の調整によりおこなう。レーザー出射部の最終段に位置する平行平板 ($\phi 150 \text{ mm}$) の屈折を利用し、平板を水平または垂直軸の周りに回転させることで光軸の平行移動が可能になる。これらは頻繁な再調整が不要のため、現システムでは手で回転させることにより調整している。

一方、角度調整には球面平凸レンズの屈折を利用している。本レンズは平行平板の手前に位置し、水平または垂直軸方向に平行移動させることにより、光軸の入射角度の調整が可能になる。また、このレンズは駆動ステージ上に設置されており、コンローラを介して PC 上からレンズの位置を制御できるようになっている。ステージにはピコモータ付ス

ステージ (Newport M-562-XYZ) を使用している。本ステージは、パルスモーターを用いてドライブシャフトを回転駆動させるものである。駆動にはピエゾ素子を使用しており、駆動分解能は 30 nm/step となっている。

3.3 光軸管

各架台には、それぞれアライメント用レーザーを下流まで伝搬させるための光軸管が組み込まれている。架台の光軸管両端に設置された PD ホルダーに QPD が内蔵されている。ホルダーは、架台の端面にフランジを介して装着されている。

各架台間は円筒型ダクトで接続されており、アライメント測定時には管内を真空状態にする。真空排気にはスクロールポンプ (1000 l/min) を使用し、10 Pa 以下の状態にする^[3]。

3.4 QPD

アライメント測定時には、QPD 上に基準レーザーを照射し、その強度重心を光軸に垂直な平面で計測する。これにより、基準レーザーおよび加速管光軸の相対変位が測定可能となる。

QPD 装着時には、ホルダー中心に対する QPD 中心の相対誤差を極力抑える必要がある。これについては、事前にテストベンチで He-Ne レーザーを用いた電気試験をおこなうことで、 $\pm 10 \mu\text{m}$ の精度を満たしている^[4]。また、ホルダーの光軸管装着時には、はめ合い誤差が生じる。さらに、測定時には蝶番構造によって QPD を手動で光軸ラインへ挿入するが、その際の位置再現誤差が生じる。これらの誤差を考慮しても、測定精度は $100 \mu\text{m}$ 以下を十分に満足している。

3.5 レーザー位置データ収集系

データ収集系は、ディテクタおよびデジタルオシロスコープ (Tektronix DPO7104; 10 GSa/s, 8 bit) から構成される。QPD にレーザーを照射し、各素子から出力される電流信号はディテクタに入力される。ディテクタは電流信号を電圧信号に変換し、アナログ演算回路に入力する。4 信号のアナログ演算により、QPD 中心からのレーザー重心相対位置に比例した水平または垂直信号が電圧として出力される。この電圧信号をオシロスコープに入力し、データを平均化 (100 回平均) した後、事前に求めた感度係数を乗じて QPD 上でのレーザー重心相対位置が算出される。

算出された位置情報は、オシロスコープ上で動作する Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) のソフトウェア Input Output Controller (IOC) 上に保持される^[5]。FB 制御用のパネルは、EPICS の通信プロトコルである Channel Access 経由でレーザー重心位置情報を読み出している。

3.6 FB 制御

レーザー光軸の角度調整は、計算機による自動 FB 制御でおこなっている。ステージの通信制御には、Figure 4 に示すように Python スクリプトを用いて

telnet 接続をおこなっている。また、FB 制御には Python/Tkinter を用いて開発した専用のパネルを使用している。

ステージのコントローラはシリアル通信 (RS485) にのみ対応しているため、FB 制御パネルから遠隔制御するためにはイーサネットへの変換が必要となる。そのため、変換には R 社製のターミナルサーバを使用している。

FB 制御パネルは、データ収集系により演算された終点 QPD 上でのレーザー重心位置データを参照し、ステージの移動量を算出する。算出された情報を基に、ステージのコントローラを制御している。

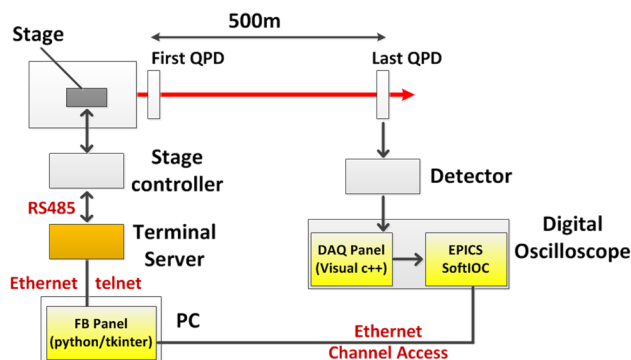


Figure 4: Schematic drawing of FB system.

4. FB 制御システムの改良

4.1 ターミナルサーバの更新

現在、ステージコントローラのシリアルからイーサネットへの変換に、ターミナルサーバを使用している。しかしながら、ターミナルサーバは元々データセンタなどでシリアル通信機器の一括管理や運用を目的とした機器であり、セキュリティやイベント管理機能など多様な機能を有している。イベント管理機能により、メールアラートを始めとした障害通知機構を利用できるため、迅速な障害対応が可能になる。しかしながら、設定項目が多く、単純な目的のためには使いづらい部分もある。

そこで、システムの簡略化を目的に、ツジ電子製の Ethernet LAN アダプタ (T2429-01) を試験的に導入した。本製品は、単純なシリアル・イーサネット変換アダプタであり、初期設定も容易であり基本的な動作試験も問題がなかった。また、Table 1 に示す通り、ターミナルサーバに比べアダプタのサイズは小さく、省スペース化にも役立った。

Table 1: Serial/Ethernet Converters

Manufacture	Size (W×D×H)
R company	290×270×44 mm
Tsuji Electronics Co., Ltd	80×55×20 mm

4.2 FB 制御用 IOC の作成

ピコステージの制御をおこなうため、EPICS IOC を開発した。EPICS IOC 化により、FB 制御用パネルに障害が発生した場合においても、ステージの情報を取得し続けることができる。また、入射器では EPICS の Archiver システムを運用しているため、独自の履歴収集システムを構築する必要が無く、過去の履歴データを容易に参照することが可能である。

5. まとめ

本稿では、入射器におけるレーザーアライメントシステムおよびレーザーFB 制御について報告した。レーザーFB 制御システムの改良として、ターミナルサーバの更新およびステージ制御用 EPICS IOC の開発をおこなった。今後は、FB 制御プログラムの動作試験をおこなった後、実運用に用いる予定である。

参考文献

- [1] T. Suwada, et al., “高精度レーザーアライメントのための 500m 長レーザー長基線の高安定化”, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 10, No.4, 2013.
- [2] S. Ushimoto, et al., “Super KEKB に向けた電子陽電子入射器のアライメント状況”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 8-10, 2014.
- [3] Y. Mizukawa, et al., “KEK 入射器におけるアライメント用レーザー光軸管の真空測定”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [4] K. Hisazumi, et al., “KEK 入射器におけるレーザーアライメント用光検出器の高精度取り付け”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [5] M. Satoh, et al., “Super KEKB 入射器に向けた BPM データ収集系アップグレード (II)”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.