

床変動の常時モニターを目指すレーザーPDを用いた自動計測機器の開発

DEVICE DEVELOPMENT FOR CONTINUOUS MEASUREMENT OF FLOOR MOVEMENT WITH USING LASER PDS

榎本嘉範[#], 肥後寿泰, 柿原和久, 諏訪田剛, 三川勝彦, 榎本収志

Yoshinori Enomoto[#], Toshiyasu Higo, Kazuhisa Kakihara, Tsuyoshi Swada, Katsuhiko Mikawa, Atsushi Enomoto
KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We developed two types of pneumatically driven mechanisms mounting photo diode sensors to replace the manually driven one. These units make it possible to measure the position of linac girders automatically and successively. The position accuracy and the reproducibility of the sensor mount are evaluated by a three-dimensional coordinate measuring machine.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器（以下入射器）では SuperKEKB へ向けてのアップグレードが進められている。要求される低エミッタンスビームを維持するためには、加速管や主要電磁石等の各コンポーネントの設置精度はローカル（概ね 20~30 m 程度）で $\sigma = 0.1$ mm、グローバル（入射器全長約 600 m）で $\sigma = 0.3$ mm という厳しい値が要求されている。これを

1. 長基線レーザーと 4 分割シリコンダイオード (PD) センサーを用いた初期アライメント、
2. レーザートラッカー、傾斜計等の手段を用いたローカルアライメントの改善、
3. 床面の動的変動下でのエミッタンス維持に必要なアライメント技術、
 - ・ビームによるアライメント維持と改善
 - ・床-架台間の接続場所及び方法の検討と改善
 - ・架台の動的制御等

の段階を踏んで確立していく必要がある。現在はその第 1, 2 段階まで進んできており、今後は要求精度に比べて非常に大きな床変動の効果をいかに抑制するかを視野に、アライメントシステムを開発していくことに重点をおいていく。本稿では 1 に用いたレーザーPD を、3 に関する開発につなげるべく開発

している連続計測用計測機器構造について報告する。

2. 長基線レーザーを用いたアライメントシステム

2.1 ユニット架台構造とアライメント機構

入射器は 180 度偏向部（エネルギー 1.5 GeV）を挟んで 2 本の直線部（A, B セクター及び C, 1, 2, 3, 4, 5 セクター）からなる総長 600 m の線形加速器である（Figure 1）。各セクターは概ね 8 つのユニットからなり、各ユニットには 2 m 長の S バンド加速管が 4 本ずつ配置された構成となっている。

加速管や電磁石といったコンポーネントの多くはユニットごとに長さ 8440 mm、直径 508 mm、肉厚 7.9 mm の鋼製円筒を主構造材とした高剛性架台（ユニット架台）上に配置されている^[1]（Figure 2）。各コンポーネントのビーム軸に対する水平方向の位置出しはユニット架台上に設置した基準レールに押し当てることによりなされる。垂直方向の位置出しは各コンポーネントから伸びる足を高精度に加工することにより行われる。これにより個々のコンポーネントを一つずつ調整ネジ等で位置合わせする必要がなくなり、迅速な組み立てを実現している。更に最近ではレーザートラッカーによる測定とシムプレート

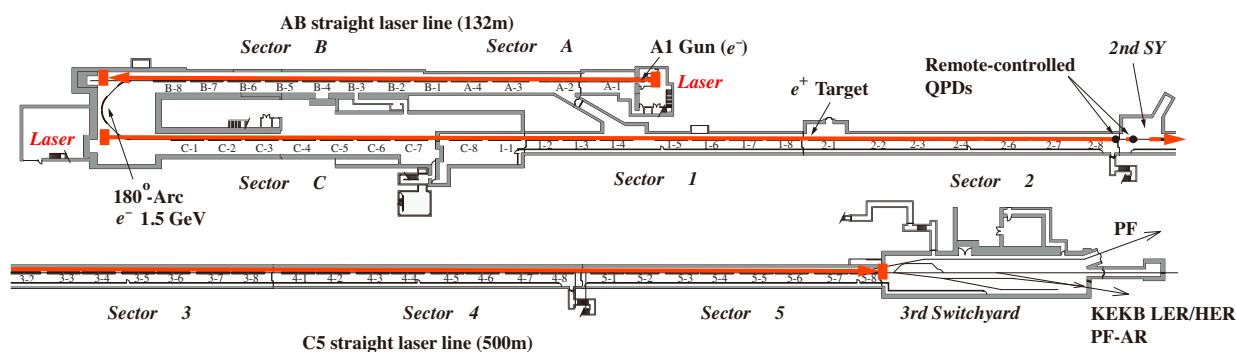


Figure 1: Schematic layout of KEK injector linac.

[#] yoshinori.enomoto@kek.jp

による補正を併用することにより、ユニット内のコンポーネントの位置を 0.1 mm 以下の精度で修正、補償することができるようになっている^[2]。

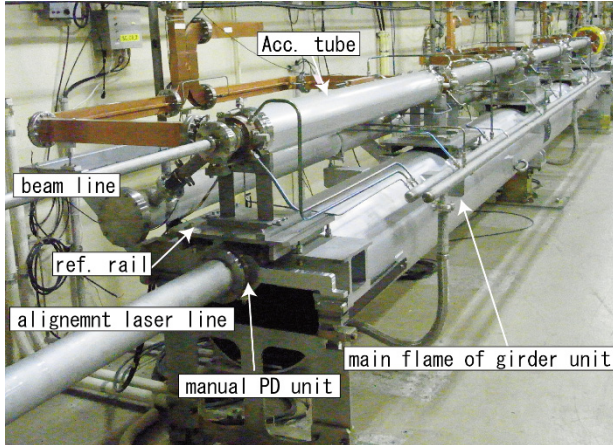


Figure 2: Structure of typical acceleration unit of the KEKB injector linac.

2.2 長基線レーザーによるユニット架台のアライメント

入射器全体のアライメントとしては、上記のようにして、高精度で組み立てられた各ユニット架台をいかにして直線に並べるかが鍵となるが、このために長基線レーザーと 4 分割 PD センサーを用いたシステムが運用、改良中である。

ユニット架台にはビーム軸に平行に基線レーザーを通すための真空ダクト（光軸管）が設置されている（Figure 2）。架台両端部にはレーザー光の位置を測定するために 4 分割 PD センサーを装着した回転式のユニット（手動 PD ユニット、Figure 3）が取り付けられている。直線部最上流に設置した He-Ne レーザーからのレーザー光を PD センサーで測定し、レーザー光軸の架台中心に対する変位を測定すれば、ユニット架台の位置を機械的に合わせることができる。この操作がアライメントの基本スキームとなっている。

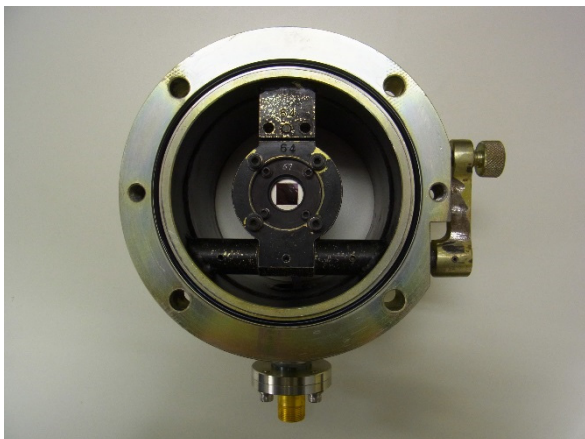


Figure 3: Picture of a manual PD unit.

3. 自動出し入れ機構による測定の自動化及び連続化

3.1 手動 PD ユニットによる計測

これまで入射器では手動 PD ユニットによる測定を定期的に行ってきたり、測定結果に関しては^[3]等で述べられている。しかしながら PD センサーでレーザー光を遮って測定するという方法上、当然ながら同時に 1 箇所ではしか測定を行うことができない。またセンサーの出し入れ機構が現在は手動のため、加速器運転中は測定を行うことができない。したがってこれまでは長期メンテナンス時等に人力で一つ一つセンサーを動かして測定をおこなってきたが、全部で約 170 台あるセンサーを全て測定しようとするかなりの労力になり、頻繁に測定を行うことができなかった。そこで、加速器運転中であっても連続的かつ継続的に測定を行えるようにするために、センサーの出し入れを圧空による自動制御とした自動レーザーPDユニットの開発を行っている。

3.2 直動式自動 PD ユニット

Figure 4 に直動式自動 PD ユニットの 3D モデルを示す。図中水色の部分は溶接ベローズとなっており、ピンク色の部分がセンサーを表している。エアシリンダーにより、直線的にセンサーマウントを動かせるようになっており、ベローズ部分が鉛直下側になる向きに搭載される。このタイプのユニットは既に 2 台が設置されており、これを用いた測定結果については^[4]に詳しく述べられている。また制御系やセンサーからの信号処理については^[5]を参照されたい。

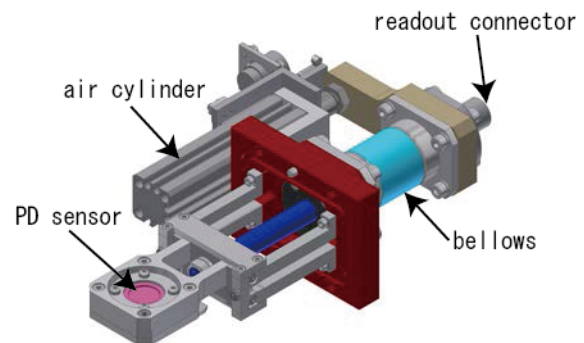


Figure 4: Isometric view of the linear motion mechanism for the remote-controlled PD unit.

3.3 回転式自動 PD ユニット

Figure 5 に回転式自動 PD ユニットの 3D モデルを示す。図中の支点を中心としてエアシリンダーでセンサーマウントの片端を押すことによりマウントが回転する構造となっている。戻り側はゼンマイバネによる力を利用しており、位置決めはピンで行う。この機構のメリットはレバー比を調整することにより、直動式に比べエアシリンダーやベローズのストローク量を小さくすることができる点にある。全体、特に駆動部をコンパクトにできれば低コスト化にも

有利となる。またバネを用いることによって、圧空ラインの圧力変動による影響を受けないため、高い位置再現性が期待される。一方で、長期運転による軸の摩耗やバネのへたりに起因する精度の悪化も懸念される。これらは今後の耐久試験で検証していく予定でいる。

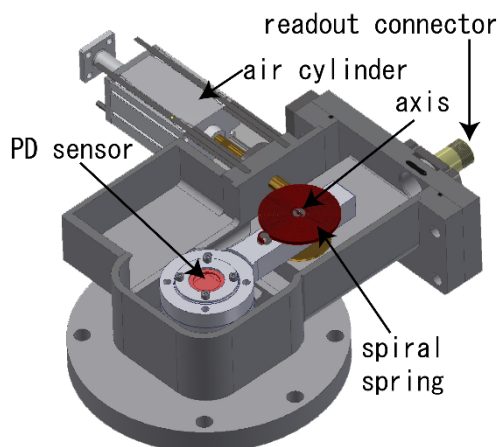


Figure 5: Isometric view of the rotational motion mechanism. For the remote-controlled PD unit.

4. 位置精度と繰り返し再現性

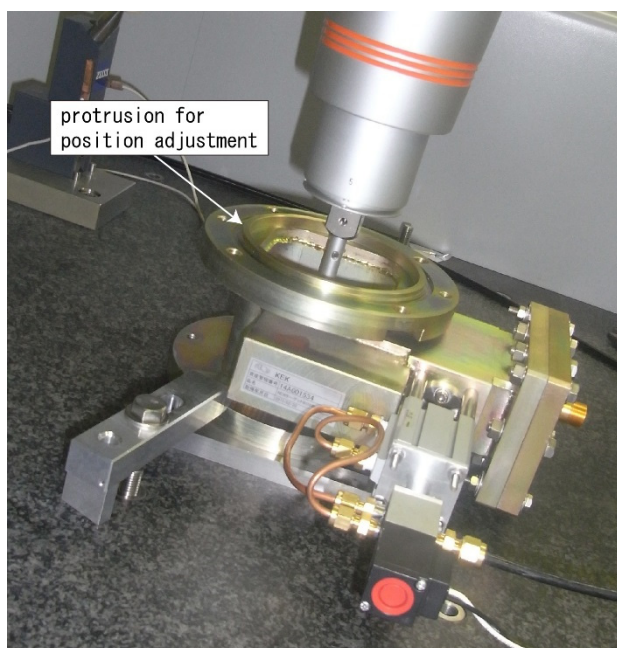


Figure 6: Rotational motion type PD unit on the 3D coordinate measuring machine.

各 PD ユニットはユニット架台の光軸管に取り付けて測定を行うが、PD ユニット側と光軸管の位置決めは Figure 6 に示した PD ユニット側フランジの突起（位置決め突起）と光軸管側フランジの嵌め合いによって行う。従って、この位置決め突起の中心とセ

ンサーマウントの中心がどの程度の位置精度で一致しているか、また圧空による動作前後で位置の再現性がどの程度あるかが測定を行う上で重要である。そこで、三次元測定器を用いて、位置決め突起を基準とした時のセンサーマウントの中心位置の測定を行った。

Table 1 に直動式自動 PD ユニット測定結果を示す。

Table1: Position Measurement Results of Linear Motion Type PD Units

| ユニット番号 | 測定番号 | X (mm) | Y (mm) |
|--------|------|--------|--------|
| 1 | 1 | 0.056 | -0.016 |
| 1 | 2 | 0.052 | -0.011 |
| 2 | 1 | 0.119 | -0.011 |
| 2 | 2 | 0.117 | -0.010 |

このタイプは 2 台あるため、それぞれユニット番号 1, 2 とする。測定番号 1 は三次元測定器へ取り付け後エアシリンダーを動かす前の状態での測定結果、2 は 10 回エアシリンダーを動かして、センサーマウントを出し入れした後の測定結果を表している。X はビーム軸に対して水平方向、Y は垂直方向を示す。X,Y 共に繰り返し再現性は数 μm 程度であった。一方で位置決め突起の中心とセンサーマウントの中心のずれ量は X 方向で 0.05 mm (ユニット 1)、0.12 mm (ユニット 2) 程度、Y 方向はいずれも 0.01 mm 程度ずれていることがわかった。

Table 2 に回転式自動 PD ユニットの測定結果を示す。測定番号 1 は三次元測定器へ取り付け後エアシリンダーを動かす前の状態での測定結果、2 は 1 回出し入れした後の測定結果、3 は 10 回出し入れ後の測定結果を表している。X 方向は数 μm 、Y 方向は 1 μm 以下の繰り返し精度となっている。一方で位置決め突起の中心とセンサーホルダーの中心間は 0.1 mm 程度のズレが有る。これは主にセンサーマウントを固定している角型フランジ部の組み立てに起因するものである。直動形、回転型ともに、センサーの位置精度を十分上げれば測定器毎のオフセット量の考慮が不要となり単純になるが、そのためには組み立て時の位置精度を改善する必要があり、今後の検討課題である。

Table2: Position Measurement Results of Rotational Motion Type PD Unit

| 測定番号 | X (mm) | Y (mm) |
|------|--------|---------|
| 1 | 0.0954 | -0.0932 |
| 2 | 0.0969 | -0.0937 |
| 3 | 0.0985 | -0.0936 |

5. まとめ

加速器運転中でも連続的に測定が行えるよう、現行の手動式 PD ユニットの置き換えることを目的と

して、圧空動作による PD センサーユニットの駆動機構の開発を行った。直動式、回転式 2 種類の駆動機構を試作、試験し位置精度、再現性に関して、三次元測定器を用いて評価した。両者とも再現性は十分であるが、位置精度は改善の余地がある。今回測定を行った物に関しては、オフセット量の補正を行った上で使用する予定でいるが、位置精度の向上へ向けた駆動機構の改良についても今後検討していく。直動形は既に 2 台導入済みで、半年に渡り、1 時間毎のデータを撮り続けている。今後は両タイプの長期使用耐久性も考慮した上で、量産を目指した改良型の設計を行う予定でいる。

6. 謝辞

高エネルギー加速器研究機構機械工学センターの渡辺勇一氏には三次元測定器による測定において多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 諏訪田剛, “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”, 加速器 **10**, 226, 2013.
- [2] S. Ushimoto, et al., “Status of alignment of KEK linac for SuperKEKB”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 9-11, 2014.
- [3] S. Ushimoto, “Status of alignment of KEK linac for SuperKEKB (2)”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015.
- [4] T. Suwada, “Dynamical observation of slow tunnel floor motion at the KEKB injector linac”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015.
- [5] T. Suwada, “Dynamical measurement system of tunnel floor motion with a long laser-based alignment system at the KEKB injector LINAC”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015.