

LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC: DESIGN OF THE MEASUREMENT SYSTEM

Tsuyoshi Suwada¹ and Masanori Satoh,
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A new alignment system is under development at the 500-m-long KEKB injector linac. The new system is strongly required in order to increase the stability and to create the high-quality electron and positron beams towards the next-generation of B-factories because the previous alignment system has become obsolete. The basic design of a measurement system in the laser-based alignment system is summarized along with some numerical results in this report.

500m長KEK電子陽電子入射器におけるアライメント：測定系の設計

1. 概要

KEK電子陽電子入射器(以下、入射器)では、アライメントシステムの再構築を計画している。入射器のアライメントシステムは、1995年のKEKB改造時に再構築され精力的に測定されたが、1998年6月を最後に行われていない。これは、測定系の簡便性の欠如やシステムの老朽化が主な理由である。次期計画(Super KEKB)に向けた入射器の高度化に伴い、アライメントの重要性が再認識されるようになり、システム全体を再度見直すことにした。本報告では、レーザーアライメントシステムにおける測定系の設計について検討結果をまとめる。

2. はじめに

1993年に始まったKEKBへの入射器改造[1]から16年が経過したが、現在でも、運転の高度化と安定化をめざして日々の向上が続けられている。

その中の重要項目が、下流リングへの同時連続入射の実現[1]とアライメントシステムの再構築である。同時連続入射については、ほぼ実用可能な領域に達し運転に利用されている。さらに、より安定な入射を目指して、入射器アライメントシステムの再構築に向けた準備を開始した。

再構築とはいえ、旧システムの資産の一部を引き継ぐことになる。これまでのシステムを再度見直し、次期計画に向けた入射器の高度化にも耐えられるシステムを目指す。

3. 測定システム

入射器アライメントシステムの概要[2]とレーザー光学系の設計検討[3]については、本学会の別稿でまとめている。ここでは、測定系の設計検討についてまとめることとし、主に、システムの誤差要因と予期される誤差について議論する。

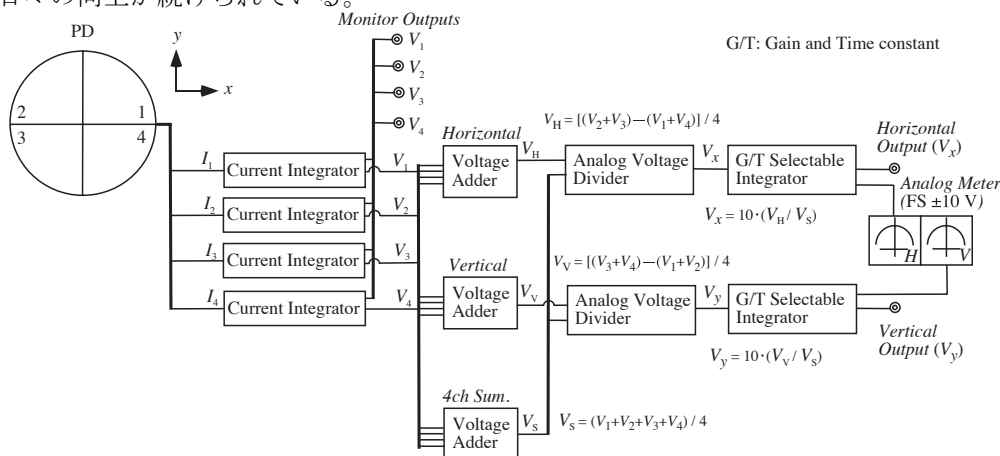


図1：レーザー光による変位測定系のブロック図

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

レーザー光軸に対する垂直面内の変位は、四分割型シリコンフォトダイオード(PD, 直径10mm)[4]が受光するレーザー光の強度重心から測定される。図1に測定系のブロック図を示す。

PDの各セルは、光強度に対するゲイン($\sim 0.45\text{mA/mW}$, $\lambda=632.8\text{nm}$)に応じた光電流信号(I_i , $i=1-4$)を出力し、測定器に入力される。電流信号は、前段積分回路の $10\text{k}\Omega$ を通して電圧に変換されると同時に、 100Ω を通してモニター出力される。電圧信号(V_i , $i=1-4$)は、オペアンプ(OP27G)による加算回路(Analog Voltage Adder)に入力し、適当な信号の組み合わせにより、式(1)-(3)に従う電圧の加算と減算が行われる。この演算により、水平、垂直方向の電圧(V_H , V_V)と規格化電圧となる4信号の電圧和(V_S)が出力される。

$$V_H = [(V_2 + V_3) - (V_1 + V_4)] / 4, \quad (1)$$

$$V_V = [(V_3 + V_4) - (V_1 + V_2)] / 4, \quad (2)$$

$$V_S = \sum_{i=1}^4 V_i / 4. \quad (3)$$

(1)-(3)の電圧信号は、アナログ除算回路に入力し、再度、式(4), (5)に従う演算が行われ、光強度で規格化された水平、垂直方向の変位に比例した電圧(V_x , V_y , 最大出力 $\pm 10\text{V}$)に変換される。光強度の規格化は、光強度変動による影響を抑制するための演算である。

$$V_x = S \cdot (V_H / V_S), \quad (4)$$

$$V_y = S \cdot (V_V / V_S). \quad (5)$$

ここで、 S は感度係数と呼ばれ、回路上では、 $S = 10$ に設定している。後段の積分回路は、時定数可変回路($T_{fast} = 0.1\text{s}$, $T_{slow} = 1\text{s}$)で速いノイズ変動を抑制することができる。また、測定感度をさらに5倍高めるゲイン選択が可能である。最終出力 V_x (V_y)は、 100Ω を通して出力されると同時に、 $10\text{k}\Omega$ を通してアナログメーターに接続される。

図2にレーザー光(直径2mm, He-Ne, $\lambda=632.8\text{nm}$)をPDセル中心に照射したときの入出力特性を示す。PDへの最大入力パワーは、 $< 10\text{mW/cm}^2$ に制限されるが、図2に示すように測定では 4.5mW/セル が飽和点となっている。これは、むしろ前段積分回路のオペアンプの飽和点を示すものである。アライメント時の動作点は、He-Neレーザー光源(出力 15mW , $\lambda=632.8\text{nm}$)を考慮すると出射点と最終点での1セルに入力するパワーは、それぞれ、 0.42mW , 0.62mW となりダイナミックレンジは1.5倍である[3]。対応する出力電圧は、それぞれ、 1.2V , 1.8V となり、ダイナミックレンジ内の低い領域ではあるが充分良好な動作範囲に入っていることが確認された。測定から最大3%の非直線性が得られたが、積分回路の非直

線性の最大値(0.5%)と光強度の測定誤差($\sim 2\%$)を考慮すると、PD自体の非直線性は、 $< 0.5\%$ となり充分小さい。このことから、PDを含む測定系の非直線性の最大値は、 $\sim 0.5\%$ と見積もられた。

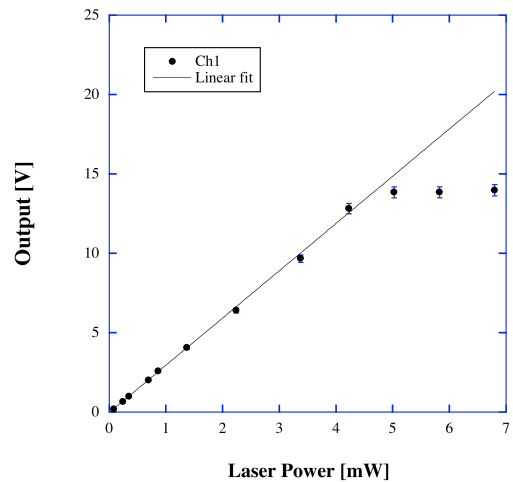


図2：レーザーパワーに対するPDセル(Ch1)の入出力特性

図3に測定器(Ch2)に入力するテスト電圧を変化させたとき(他Chは、 0.2V を入力)の出力 V_x の変化を示す。これは、測定器のテスト電圧を用いた最終的な校正曲線を示し、式(4)からの最大のズレは、 0.5% であった。これらの校正測定により、PDを含んだ測定系の誤差は、 $\sim 1\%$ と見積もられた。

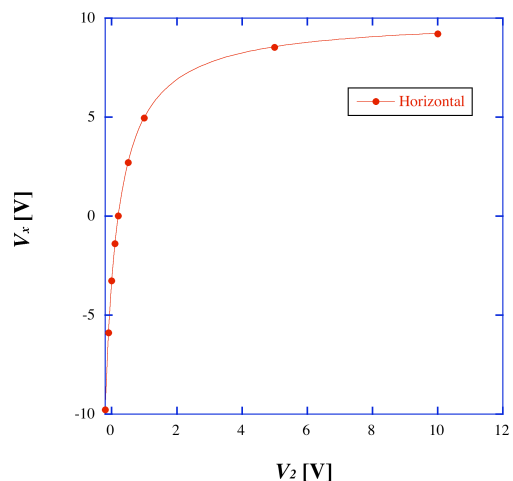


図3：Ch2に入力するテスト電圧を変化させたときの出力 V_x の変化

4. 誤差要因の解析

レーザー光による変位測定は、PDを含む測定系に起因する誤差とレーザー及び光学系に起因する誤差からその精度が決まる。特に、光サイズの変化は、測定器の測定感度を定める主要因となり、アライメントの精度に大きな影響を与える。レーザー光の

大気伝播時のサイズの変化は、基本的に光学系で決まるが、その他、出射時の光スポットのアスペクト比、レンズ収差も光サイズを変化させる要因となり、測定感度の変化を通して誤差要因となる。このような光学系に起因する誤差要因は、すでに議論している[3]。ここでは、測定系に起因する誤差要因について議論し、各要因の誤差の大きさをまとめる。

4.1 測定系に起因する誤差

図4は、ガウス分布するレーザー光のサイズ(1σ)をパラメータとして、光強度の重心をPD中心から5mmまで水平方向に変位させたときの出力電圧(式(4))を計算したものである。図4に示すように、光サイズの違いに応じて測定感度が大きく変化する。99%の光強度を含むサイズ($2 \times 2.58\sigma$)を考慮すると、 $\sigma=1.9\text{mm}$ の広がりをもつレーザー光の占める面積がPDのそれと同一になる。これより大きなサイズの光は、効果的に検出されなくなり測定感度が低下するようになる。

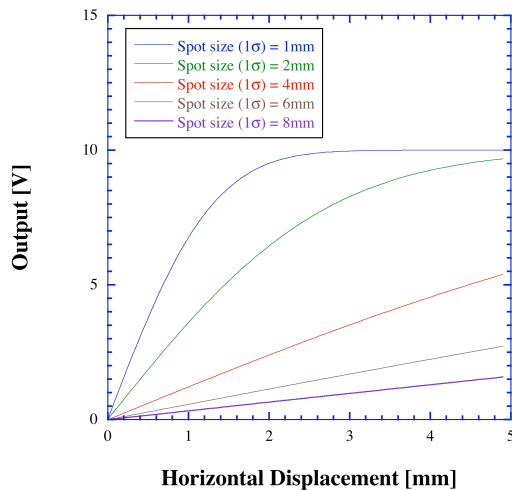


図4：レーザー光の強度重心の水平変位に対する出力電圧の変化

このようにサイズが異なるレーザー光の照射、あるいは、サイズが変化するレーザー光の伝播は、測定感度の変化を通して変位測定の精度に影響を与える。当然のことながら、光サイズが小さいほど測定感度が高くなる。しかし、光サイズの大きさは、光学系が決めるので、むやみに小さくすることはできない。できるだけサイズの変化を小さくする光学系が望ましい。サイズの変化に対する測定感度を正しく校正した後、光軸方向の光サイズの変化を精度よく測定する重要性がここにある。

光学系の設計[3]によると500m直線部を伝搬するレーザー光のサイズ変化は、直線部中央を中心として対称となり、99%の光強度領域を考慮すると中央で最小値(7.6mm, $\sigma=1.5\text{mm}$)を、両端で最大値(37mm, $\sigma=7.3\text{mm}$)となる。対応する測定感度の変化は、5.2-

0.45V/mmである。

前節で議論した測定器の非直線性以外にもPDセル間のゲイン差も誤差要因となる。全116台のPDについてゲイン差を測定した結果[5]、ゲイン差の最大値を5%に制限し、これ以上のPDは、新しいPDに交換することにした。この結果、交換したPDの個数は、全体の約10%であった。表1に、測定系に起因する誤差要因と誤差の大きさをまとめる。

表1：測定系と光学系に起因する誤差要因と誤差の大きさ

Device	Error factor	Error [mm]	Remarks
Laser	Asym. Asp. Ratio	0.25	5%
	Size stability	0.02	2%
	Pointing stability	0.01	—
Optics	Lens Aberration	0.12	0.6mm
Detector	Nonlinearity	0.02	1%
	Gain difference	0.30	5%
Total		0.72	

4.2 レーザー光学系に起因する誤差

レーザー光学系に起因する誤差要因は、別稿[3]ですでに議論している。ここでは、各誤差要因と誤差の大きさをまとめておく。

誤差要因は、レーザーと光学系に分けられる。レーザー出射時の光スポットのアスペクト比(短長軸比)が異なると、水平・垂直変位の測定感度がそれぞれ異なり誤差要因となる。光ファイバーで結合したレーザー光のアスペクト比は、ファイバーコアの真円度がこれを決める。シングルモードファイバーの場合は、< 5%が充分期待できる。また、レーザーの光サイズとポインティング安定度に関し、ファイバー結合の場合は、気にする必要はないだろう。一方、光学系では、集光レンズの回折と球面収差が、主な誤差要因となる。回折効果は、レンズ口径を大きくすることで抑制できるが、一方、球面収差は、完全には抑制できず、収差最大値で、< 1mm程度の大きさが残る。表1に、レーザー光学系に起因する誤差要因と予期される誤差の大きさをまとめた。

5. まとめ

入射器では、アライメントシステムの再構築が進行中である。本稿では、特に測定系の再検討を行い誤差要因と予期される誤差の大きさを明らかにした。

参考文献

- [1] 榎本収志, 他, 日本加速器学会誌 第6巻1号 2009, p.69.
- [2] M. Satoh, *et al.*, presented in this meeting.
- [3] T. Suwada, *et al.*, presented in this meeting.
- [4] OSI Optoelectronics AS, Inc., Model SPOT-9D, <http://www.osioptoelectronics.com/>.
- [5] E. Kadokura, *et al.*, presented in this meeting.