

逐次三点測量に基づく KEKB 入射器の直線性解析とアライメント評価 STRAIGHTNESS ANALYSIS AND ALIGNMENT EVALUATION OF THE KEKB INJECTOR LINAC BASED ON SUCCESSIVE THREE-POINT SURVEYING

諏訪田剛*, 柿原和久

Tsuyoshi Suwada*, Kazuhisa Kakihara

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Straightness analysis and alignment evaluation for the 500 m long straight section of the KEKB injector linac have been performed based on successive three-point surveying with a laser tracker (LT). The precise laser alignment (LA) for the long straight section can be performed to align accelerator units by using the laser fiducial line. The LT measurements are applied to the components in the short straight and arc sections. It is often difficult to align local components at local and short straight section at one time if the transverse displacements of the local components are relatively large, because the laser fiducial is effective only for straightness evaluation of the long straight section along which the accelerator units are installed. In such a case, it is effective to apply successive three-point surveying based on LT measurements. Based on this method, it is possible to evaluate not only the straightness of any local section but also realignment of any local section along any fitting curve without laser fiducial. It is important to investigate the error evaluation, and especially, the quantification of it for successive three-point surveying itself. This report describes in detail fundamental successive three-point surveying method with a laser tracker and the results on the straightness analysis and alignment evaluation at local short straight sections of the injector linac.

1. はじめに

KEKB 入射器のアライメント計測では、長距離直線部に対しレーザーアライメント (LA) を適用し加速ユニットの計測を行い [1,2]、短距離又は曲線部に設置された構成要素に対しレーザートラッカー (LT、Leica AT401) によるアライメント計測を行うことを基本としている。前者はビーム軸に垂直な面で加速ユニットの二次元変位を計測する。一方、後者は加速ユニットの基準を用いて加速管など構成要素の三次元変位を計測する。入射器全体のアライメントは、これら二種類の異なる方法で評価されることになる。

LA 計測は加速ユニットの変位を計測するが構成要素の変位はわからない。他方、LT 計測は短距離計測には適しているが長距離計測は困難である等の理由から、これまで各データは別々に解析され、データ間の整合性を議論することはなかった。

日々の地面振動を通して床面の動的変位により、加速ユニットや構成要素が許容範囲外に変位すると局所的にアライメントを行う必要性がしばしば生じる。このような場合、作業自体は時間的制約により局所的にならざるを得ない。直線基準からの変位が大きいとその変位を一度に修正するのは困難で、むしろ局所的に滑らかな曲線に沿った修正の方が望ましい場合がある。入射器では長距離直線基準を有するが、直線基準に沿った局所的な修正は困難である場合が多い。

このような理由で、筆者らは入射器の 500 m 長直線部に対し逐次三点測量を実施し、LT 計測データを逐次解析的に接続することで長直線部の直線性を評価することにした。この測量により構成要素を含み加速ユニット間の相対変位が評価できるようになり、局所的に滑らかな

曲線に沿った修正も可能となる。2018 年夏保守期間に、長直線部の LT を用いた逐次三点測量を実施し直線性の解析を行った。本学会では、逐次三点測量に基づく入射器長直線部の直線性解析の手法と測量結果について報告する。

2. 逐次三点測量の原理

逐次三点測量に基づいた加速ユニットのアライメント計測の原理 (図 1 参照) を簡単に述べる。逐次三点測量とは、3 つの連続した加速ユニットのほぼ真中に LT を設置し、ユニット前後面の基準 (基準座を設置) を LT で計測する。入射器の場合、典型的な加速ユニット架台の軸方向長さは 8.44 m、ユニット長は 9.6 m である。

1 ユニット当たりの基準点数は前後の二点なので 3 ユニットで計 6 点の計測が 1 回目の計測 (1st meas., unit#1-3) に相当する。次に LT を 1 ユニット下流に移動させ 2 回目の計測 (2nd meas., unit#2-4) を行い、LT をさらに 1 ユニット下流に移動させ 3 回目の計測 (3rd meas., unit#3-5) を行い、計 3 回の計測が基本的なデータセット (計 18 点の基準点計測) を与える。

各計測では 2 ユニットが共通の計測となるので、この 2 ユニットの三次元位置が同一であるという条件から解析により加速ユニットを接続することができる。この解析により計 5 ユニットの順次接続することができ、その直線性が評価できることになる。元来、ユニットの直線性評価用ソフトウェアは通常 LT に付属しているが、中身がよくわからない、使い勝手が悪いという点から自作することにした。

3. 加速ユニット直線性の評価法

逐次三点測量の 1 計測では 3 ユニット分の計測点が得られ、この 3 ユニットの三次元的な軸を決めることがで

* tsuyoshi.suwada@kek.jp

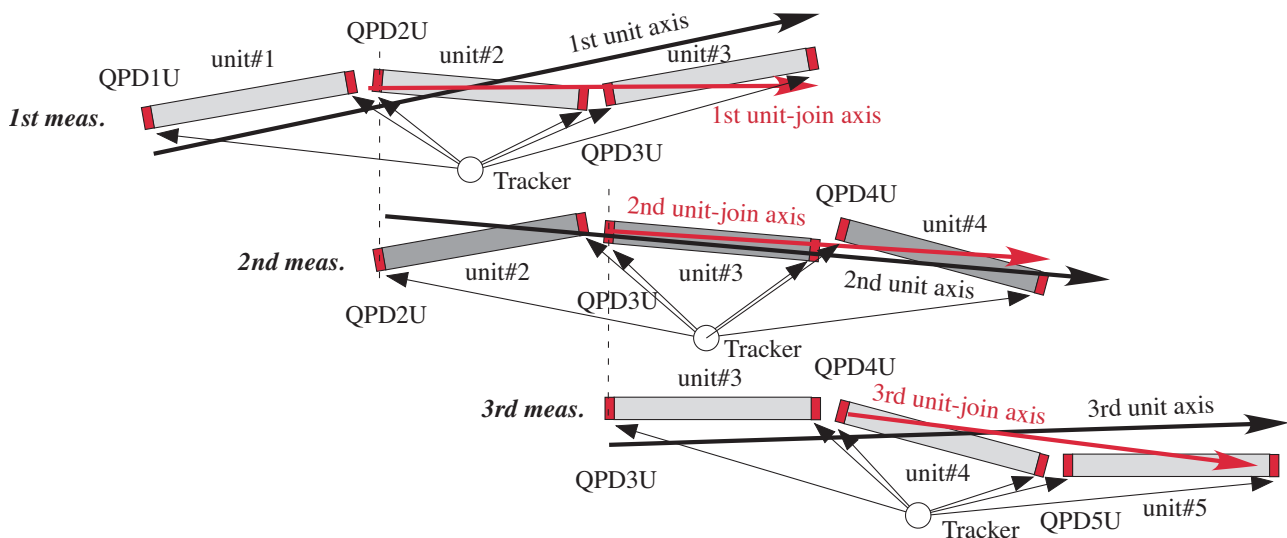


Figure 1: Measurement principle in the alignment evaluation of accelerator units based on successive three-point surveying with a laser tracker.

きる (図 1 参照)。これをユニット軸 (unit axis) と呼ぶ。この 3 ユニットはユニット軸内で常に固定され、相互に位置を変更することはしない。計測結果をもとにユニットを結合するには、このユニット軸の平行移動や軸の回転によりユニットの結合を行う。

各計測において共通計測された 2 ユニットから結合軸 (unit-join axis) を作り、この結合軸が一致するようにユニット軸の平行移動と回転を行う。ここで結合軸は結合軸からのデータ点の rms 変位が最小二乗法により最小になるように決められる。この操作を 3 回繰り返すことで前ユニットに 5 ユニット (unit#1-5) を順次結合できる。

図 2 に逐次三点測量における各計測の結合手法を示す。まず、2 回目計測の結合軸 (2nd unit-join axis) の軸方向位置が 1 回目計測の結合軸 (1st unit-join axis) に一致するように 2 回目計測の結合軸をオフセットさせる (1. Axial offset)。この時、2 回目計測のユニット軸も同時に同量オフセットさせる。1 回目結合軸と平行となるように 2 回目結合軸を回転させる (2. Rotation for parallel)。この時、2 回目のユニット軸も同時に同量回転させる。次に、横方向に結合軸が一致するように結合軸とユニット軸を横方向に同量平行移動させる (3. Radial offset)。次に、結合軸が一致するように 2 回目結合軸を軸方向の回りに微量回転させる (4. Axial rotation)。この時、2 回目のユニット軸も同時に同量回転させる。

このような一連の流れで結合軸とユニット軸を操作しユニット軸の結合を行う。1 回目結合軸を前計測のユニットに結合するには、1 回目結合軸が前ユニット結合軸と一致するように、同様な手法で結合軸とユニット軸を操作しユニット軸の結合を行えばよい。この解析で一回の逐次三点測量結果の結合が完了するが、次の測量結果も同様な解析で結合を行えば順次結合を継続することができる。この解析に基づき、入射器の 500 m 長直線部に対し逐次三点測量を実施した。加速ユニットの結合結果を図 3 に示す。

図 3(a) に 500 m 長直線部全体 (C5 ライン) の結合結

果を示す。ただし、中心の赤直線はアライメント基準を示し、C5 ラインのレーザー基準点 (始点 QPD-REF2、終点 QPD-584D) を結んだ直線基準を示す。C5 ラインの入出射面には半径 1 と 0.5 mm の円を目安のために描いた。図中、青色と灰色線は加速ユニット (容易な見分けのため交互に配色)、緑 (QF) と薄緑点 (QD) は Q 磁石、赤色は加速管、茶色は偏向磁石をそれぞれ示す。

図 3(a) は 500 m 長直線部全体の結合を一度に表示したためアライメントの詳細はよくわからないが、全体を概観すると全長に亘り系統的に大きな周期の曲がりが見られないこと、加速ユニット 1-8 周辺の変位が大きく 2 mm 近い変位を示す構成要素があることがわかる。また局所的なアライメントも良いとは言えない状態にあることもわかる。

図 3(b) に長直線部の 1 部分 (加速ユニット 35-47) を取り出した結果を表示した。図 3(c) はこの結果を軸方向上流から見たものである。この解析では三次元解析となっているので視点を自在に回転させることができ、各要素の相対的な変位が容易にわかるという特徴を持つ。また軸方向から見た結果によると、各要素の軸回りのアライメントも容易にわかる描画となっている。

このように各要素の相対的な変位が容易にわかるので、局所的な任意の曲線に沿った変位量に焼きなおすことも困難ではなく、局所的なアライメント作業への情報を提供することができる。

4. LT による長距離計測の問題点

LT を用いた逐次三点測量による計測結果を解析すれば、長直線部の直線性評価を行うことは可能になるが、次のような問題点が存在することに注意すべきである。すなわち、LT 計測では LT の基準座を見込む角度が浅くなるほど計測精度が劣化すること、加速ユニットの結合解析の精度がどれぐらいになるのかということである。前者は、仕様値によると計測精度 Δ は計測距離に依存し $\Delta = \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ とある。今回の逐次三点測

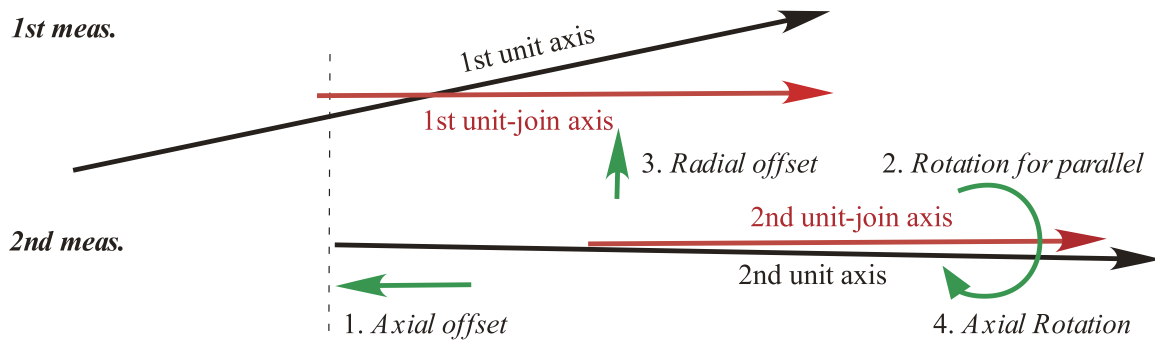


Figure 2: Joining principle of accelerator units in their alignment evaluation based on successive three-point surveying with a laser tracker.

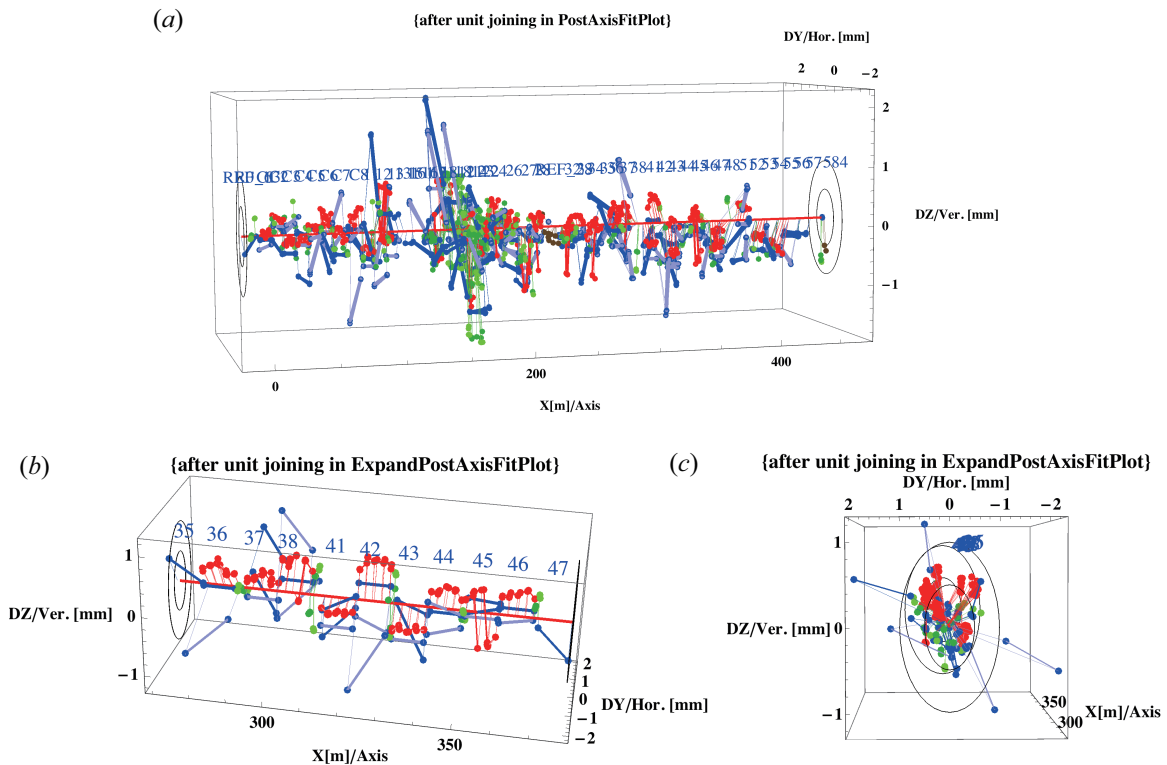


Figure 3: Analysis results in the successive joining of accelerator units and components based on successive three-point surveying with a laser tracker, (a) the result of the accelerator units and components of sectors C-5, (b) the side view, and (c) the front view from upstream in the analysis results for the accelerator units and components between unit 3-5 and 4-7.

量では、加速ユニット長が約 10 m なので最大計測距離 ~15 m として、LT による最大誤差は $\Delta \sim 0.1$ mm 程度が予想される。

他方、後者は共通結合ユニットの結合解析から誤差評価が可能である。今回の逐次三点測量では、ユニットの基準点当たりの測定回数は連続した 3 回の計測を行っている。従って 1 つのユニット軸は、計 18 (6×3) 点のデータ平均を使って決定される。また 1 つの結合軸は、計 12 (4×3) 点のデータ平均を使って決定される。この時、結合軸とデータ点との差分分布の幅から期待される統計誤差を評価することができる。

図 4 にその解析結果を示す。図 4(a)、(b) に ΔX 分布、

ΔY 分布をそれぞれ示す。データ点数はそれぞれの分布において 819 点 (48 ユニット分) である。実線はローレンツ分布を用いた最小二乗法によるフィットを示し、統計的には $\gamma \sim 0.1$ mm 近くまで大きな変位が存在することがわかる。分布幅 (半値半幅) としてはそれぞれ $\gamma_x \simeq 9 \mu\text{m}$ 、 $\gamma_y \simeq 8 \mu\text{m}$ を示した。この結果によると結合解析で期待される統計誤差は充分小さいが、分布の裾を見ると決して小さいとは言えない大きさまで伸びていることがわかる。

LT 仕様値の計測誤差によると最大 $\Delta \sim 0.1$ mm が期待されるので、逐次三点測量による最大誤差と同程度である。この結果は、逐次三点測量では長直線部全長を

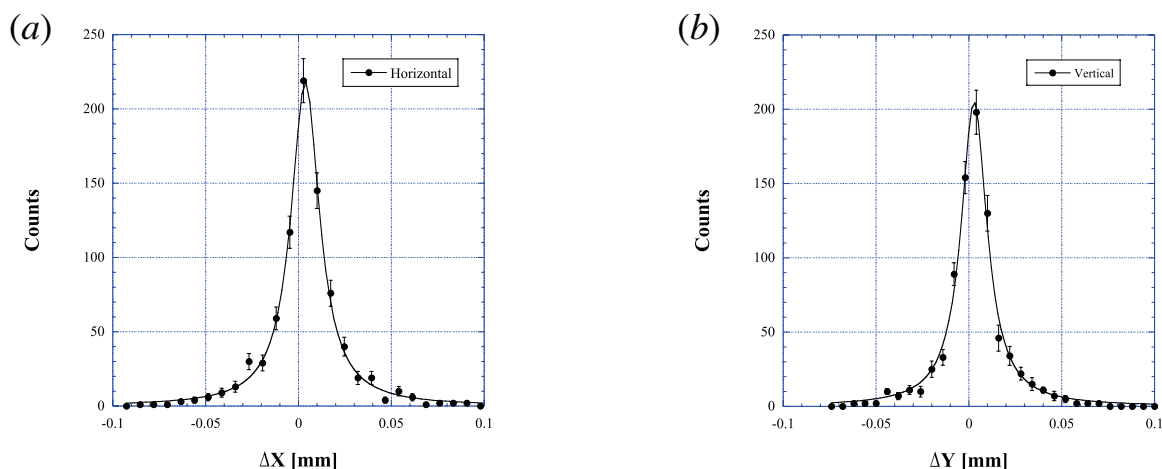


Figure 4: Distribution plots of the finite difference in the joining analysis of unit-join axes in the (a) horizontal and (b) vertical directions.

$\sigma \simeq 0.1 \text{ mm}$ レベルでその直線性を評価するのは困難であることを示している。あくまで3ユニット程度の直線性評価に限定すべきで、局所的なアライメントのみには適用可能であろう。

注意しないといけないことはLT計測誤差には系統誤差も考慮しないといけないことである。仕様値の計測誤差に系統誤差が含まれているのかどうかは不明であるが、系統誤差の評価は極めて難しくLT計測誤差の評価を困難にしている。このことが、入射器が二段構え(LAとLT)のアライメント計測を実施している理由でもある。従って、今回の解析で長直線部全体の結合結果は意味をなさず、局所的かつ相対的変位計測の評価に止めるべきであり、この範囲内では今回の解析結果は適切であると考えられる。

5. まとめ

KEKB入射器の500m長直線部に逐次三点測量を実施し、局所的かつ相対的な加速ユニットに対する直線性の評価を行った。本解析に基づけば、3ユニット程度の直線性評価には充分実用に耐える結果を示すことが検証された。

参考文献

- [1] T. Suwada, Proc. the 12th Annual Meeting of PASJ, Aug. 5-7, 2015, pp.129-133.
- [2] T. Suwada *et al.*, Proc. the 13th Annual Meeting of PASJ, Aug. 8-10, 2016, pp. 1291-1295.