

KEK-ATF スキュー六極電磁石への 自動位置調整機構の導入とアライメント法の確認

BEAM BASED ALIGNMENT OF SKEW SEXTUPOLE MAGNETS IN KEK-ATF WITH MOTORIZED MOVER

阿部優樹^{*A)}、荒木栄^{B)}、奥木敏行^{A,B)}、久保浄^{A,B)}、照沼信浩^{A,B)}

Yuki Abe^{**A)}, Sakae Araki^{B)}, Toshiyuki Okugi^{A,B)}, Kiyoshi Kubo^{A,B)}, Nobuhiro Terunuma^{A,B)}

^{A)}SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies, ^{B)}KEK

Abstract

ATF has studied the final focus technology to realize the nanometer small beam required for the International Linear Collider (ILC). In the ATF final focus beamline, 23 quadrupole magnets, 4 sextupole magnets, and 4 skew sextupole magnets are installed to realize the small beam. The sextupole magnets and skew sextupole magnets are used as correction magnets for nonlinear beam optics. Each of the magnets except for the three skew sextupole magnets are equipped with a remotely controllable automatic alignment mechanism, which enables Beam Based Alignment (BBA) based on the beam response during beam operation. On the other hand, three skew sextupole magnets are equipped with a manual alignment mechanism, and alignment based on the beam response is not possible at present. Therefore, in this study, in order to prepare the environment for BBA of all the magnets in the ATF final focus beamline, an automatic positioning mechanism was implemented for these skew sextupole magnets. As an automatic positioning mechanism, we utilized the positioning mechanism used in the ATF damping ring. The automatic positioning mechanism was modified to be motor-driven and remote-controllable. Based on the beam test, the BBA method of the skew sextupole magnet using the automatic positioning mechanism is also being investigated. In this paper, we report the progress of these works and the implementation of the automatic positioning mechanism with the prospect of BBA.

1. はじめに

KEKの先端加速器試験施設(ATF, Fig. 1)ではダンピングリングにて生成された高品質な低エミッタンスビーム[1,2]を用いて、国際リニアコライダー(ILC)において必要とされるナノメートル極小ビーム(目標鉛直ビームサイズ $37\ \mu\text{m}$)を実現するためのビーム制御、計測技術の研究開発が行われている[3,4]。

ATF最終収束ビームラインには極小ビームを実現するために四極電磁石(計23台)、六極電磁石(計4台)、スクュー六極電磁石(計4台)がインストールされている。スクュー六極電磁石3台を除く各電磁石には遠隔制御可能な自動位置調整機構が実装されており、ビーム運転中のビームの応答を基にしたアライメント(Beam Based Alignment; BBA)が可能である。一方、スクュー六極電磁石3台に対してはボルト調整式の手動位置調整機構(Fig. 2)が取付けられている。BBAを行う事は可能だが、ビーム運転を中断する必要があり、作業には1台当たり半日程度の時間を要する。本研究ではスクュー六極電磁石に自動位置調整機構を導入することで、より迅速にBBAが行える環境を整えた。ATFダンピングリングにて使用されていた位置調整機構をモーター駆動化し、制御システムを構築することで遠隔制御可能な自動位置調整機構を実現した。これら装置を用いて、実際にビーム試験によるスクュー六極電磁石のBBAにも取り組んだ。本報告ではこれら測定結果と作業進捗、今後の展望について述べる。

2. 導入した機構の位置調整原理

ATFダンピングリングで使用していた位置調整機構を改造し、Fig. 3に示すようにスクュー六極電磁石に取り付けた。Figure 4に示すような偏心カムを位置調整機構として用いている。偏心カムは円筒の中心から偏心量 h だけズレた位置を回転中心とすることでストローク h の位置調整を可能とする機構である。4つの偏心カムをFig. 5のように組み合わせることによって電磁石の水平、鉛直、ロール、ピッチの調整を行う。3つの偏心カム(Fig. 5中CAM1,2,3)が鉛直(y)方向とロール α 、ピッチ ψ を、1つの偏心カム(Fig. 5中CAM4)が水平(x)方向の位置調整を担う。スクュー六極電磁石では鉛直・水平方向の位置調整の導入を優先した。ゆえに、これら偏心カムの各回転角 θ_i と位置調整量(x, y)の関係はEq. (2), (3)のように示される。

$$\begin{aligned} y_i &= h_i \sin(\theta_i) \quad (i = 1, 2, 3) \\ x_1 &= h_4 \sin(\theta_4) \end{aligned} \quad (1)$$

$$x = x_1 \quad (2)$$

$$y = \frac{y_1 + y_3}{2} = y_2 \quad (3)$$

* abeyuki@post.kek.jp

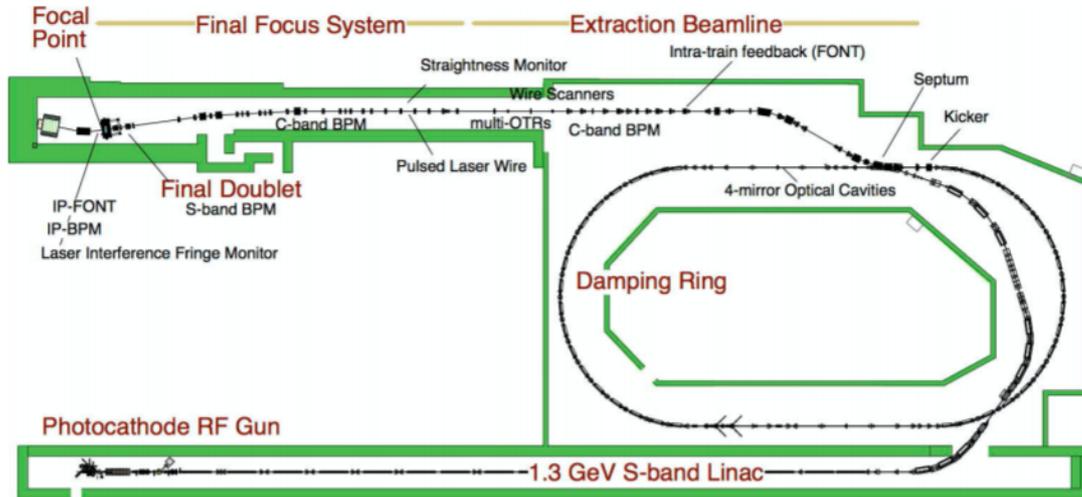


Figure 1: ATF beamline layout.

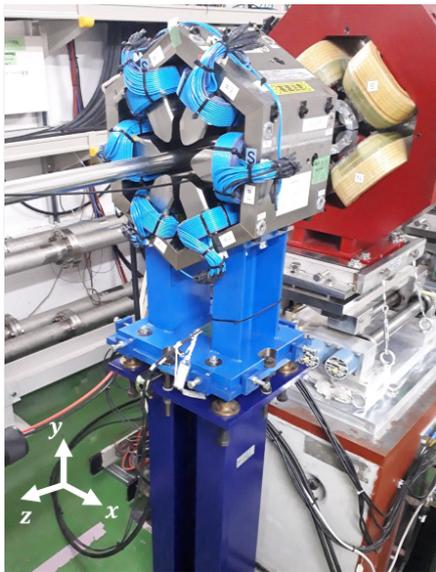


Figure 2: Skew sextupole magnet with manual positioning mechanism in ATF-FF.

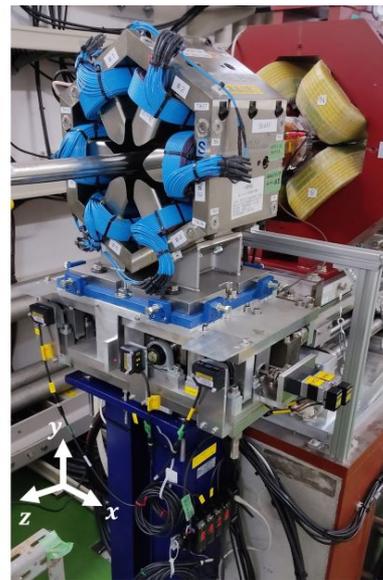


Figure 3: Overview of magnet positioning mover installed to skew sextupole in ATF-FF.

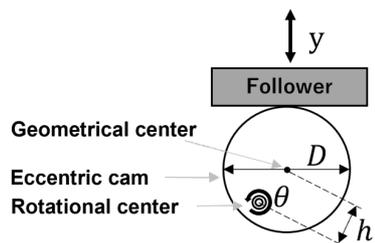


Figure 4: Schematics of eccentric cam.

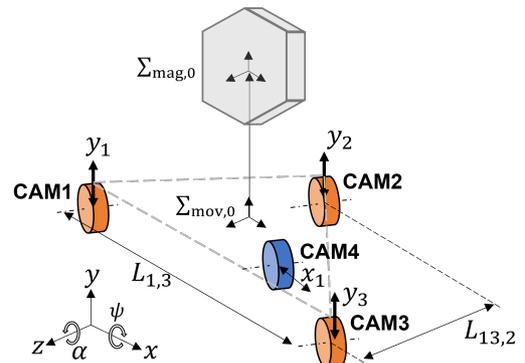


Figure 5: Schematics of skew sextupole magnet mover and coordinate definition.

3. 自動位置調整機構

自動位置調整機構の各機械要素のレイアウトを Fig. 6 に示す。偏心カムはウォームギア（減速比 60）を連結したハーモニックギア（減速比 100）付きのステッピングモーター（Orientalmotor 製 AZM24AK-HS100） [5] にて駆動される。この時、偏心カムの回転分解能は 6,000,000 steps/rev となる。偏心カムの偏心量 h が 3.0 mm であるため、機構自体の理論位置決め分解能は Eq. (2) から $|\Delta x, \Delta y| \leq 0.05 \mu\text{m}$ と定義できる。各カムの近くには位置の変化量をモニターするためのレーザー変位計（Keyence 製 IL-S025、分解能 $1 \mu\text{m}$ ） [6] が取り付けられている。位置調整時の最小位置決めステップはセンサーの分解能と等しく、 $1 \mu\text{m}$ である。

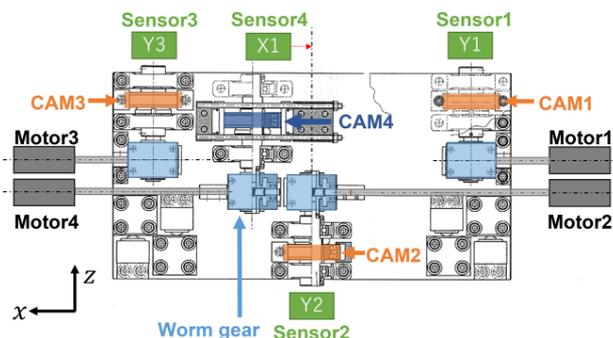


Figure 6: Magnet mover sensor and motor layout.

制御システムの構成を Fig. 7 に示す。EPICS [7] を中心とした制御システムを構築しており、RaspberryPi [8] を EPICS IOC (Input/Output Controller) として使用している。各モータードライバーへの入出力とレーザー変位計の計測値の読み出しを行う。Raspberry Pi (EPICS IOC) と各モータードライバーは RS-485 通信、レーザー変位計は TCP/IP 通信を用いる。モーターの制御および各種モニター値に関しては個々のレコードを作成し、EPICS 上で管理している。各制御量の計算や取得したセンサー値の計算などは Python を使用し、レコードへのアクセスは PyEPICS [9] を使用した。選定したモーターとレーザー変位計は不揮発性の原点記憶機能を有するため、停電などが起こったとしても位置調整機構の原点位置情報を保持することが出来る。開発した駆動システムでは電磁石のアライメント完了後の位置をレーザー変位計、モーターの原点位置として設定することで、原点復帰が可能となる。従来使用されていたリミットスイッチやフォトインタラプタなどは使用していない。以上のシステムを Fig. 8 に示す制御ボックスとしてトンネル内に設置した。

4. 自動位置調整機構の位置決め性能評価

4.1 測定内容と方法

スクュー六極電磁石の鉛直・水平方向の要求位置決め精度 $100 \mu\text{m}$ 程度 [10] である。目標位置に対して機構を駆動した際の目標位置に対する残差を位置決め性能評価の指標とし、残差が要求仕様範囲内であることを確認し

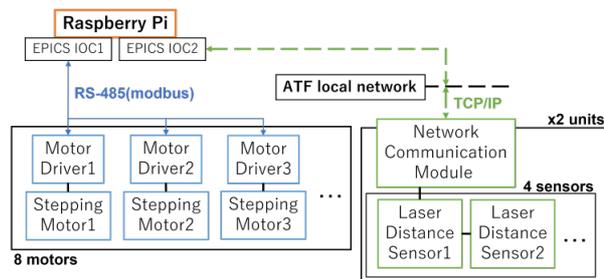


Figure 7: Map of skew sextupole magnet mover control system.

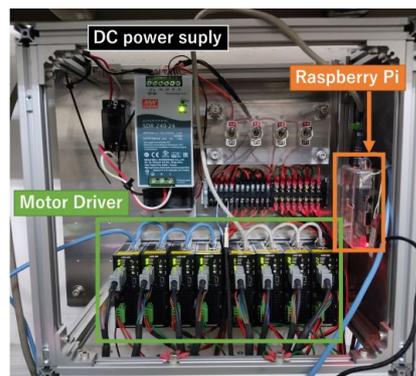


Figure 8: Control box of skew sextupole magnet mover.

た。測定にはレーザー変位計と Fig. 9 に示すようにレーザートラッカー（Leica 製 AT401） [11]、傾斜計（Leica 製 Nivel 210） [12] を用いた。それぞれ、機構と電磁石の変位と角度変化を測定している。



Figure 9: Positioning measurement with Laser Tracker (LT). Red circle: LT measurement point.

4.2 位置決め性能評価結果

Figure 10, 11 に位置決め性能評価の測定結果を示す。Figure 10 は得られた変位測定結果を X-Y 平面上にプロットした図である。青がレーザー変位計の測定結果、オレンジがレーザートラッカー（LT）による測定結果である。測定は $\pm 1500 \mu\text{m}$ の範囲を $500 \mu\text{m}$ 毎の間隔で行った。図から全体的な分布のばらつきは一樣であるが、変位量が大きくなるほど目標位置に対する残差が大きくなっていることが分かる。特に X 方向が顕著であり、現状、位置調整機構の変位（レーザー変位計の測定

結果)に対して電磁石の変位(LT測定結果)が小さくなる傾向があることが分かった。

各測定点における目標位置に対する変位測定結果と目標位置の差(残差)をFig. 11に示す。横軸は測定点のデータ番号、縦軸は残差を破線は要求仕様 100 μm を示す。残差は概ね要求仕様の範囲内に収まっているが、 $X = \pm 1500$ においては満たせていない。現状では、 $|X| \leq 1000$ 、 $|Y| \leq 1500$ の範囲において要求位置決め精度を満たす。位置調整システムとしてはより精密な位置決めが可能であるが、現状、誤差補正が不十分であるため設計性能を十分に発揮できていない。位置調整機構開発の先行例[13]において、フィードバック制御による誤差補正の有効性が示されているため実装を進めている。導入した自動位置調整機構は今後、非線形光学系の補正を行う上でも利用が期待されている。

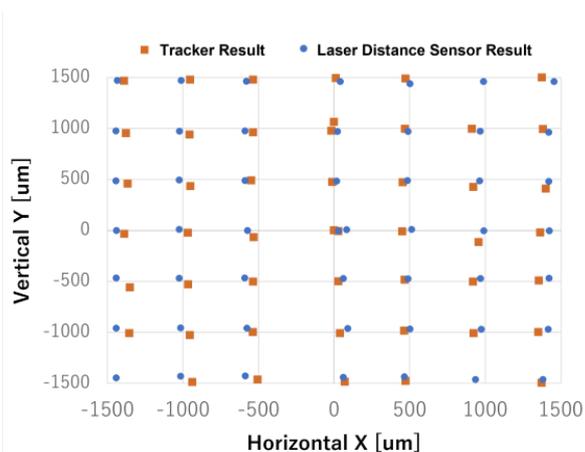


Figure 10: Measurement position map.

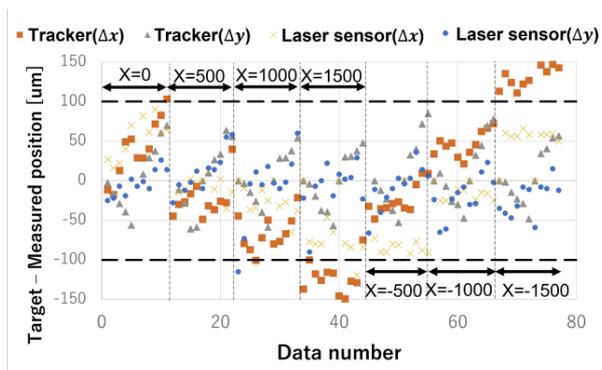


Figure 11: Mover positioning results. Vertical: target minus measured position, Horizontal: measurement point number.

5. BEAM BASED ALIGNMENT (BBA)

5.1 測定原理

導入した自動位置調整機構(Fig. 3)を用いて、ATF最終収束ビームラインに実装されているスキュー六極電磁石のBeam Based Alignment(BBA)を行った。BBA

はビームの応答を基に、電磁石の強さを変えた際にビームの軌道が変化しない位置へ電磁石をアライメントする手法である。磁場中心とビーム軌道を一致させることで実現でき、本研究ではFig. 12に示すSK3FFとSK4FFのBBAを仮想衝突点近くのBPM(M-PIP)の応答を基に行った。SK1FFとSK2FFも自動位置調整機構を用いたBBAを行ったが、異なる位置調整機構を用いたため、本報告では触れない。スキュー六極電磁石における磁場中心は四極成分が最小となる位置とした。スキュー六極電磁石の強さを変えた際のビームの角度変化を $\Delta y'_{\text{SK}}$ として、その際の仮想衝突点でのビームの位置の変化 Δy_{IP} は転送行列を基にEq. (4)から算出される。 Δy_{IP} と転送行列の R_{12} 成分から $\Delta y'_{\text{SK}}$ を算出することができる(Eq. (5))。 β_i は各地点におけるベータ関数、 $\Delta\phi$ は各地点間の位相差である。ある電流値 I_1, I_2 それぞれのスキュー六極電磁石地点におけるビームの角度変化 $\Delta y_{\text{IP}, I_1}, \Delta y_{\text{IP}, I_2}$ の差分 $\Delta(\Delta y')$ が算出できる。

$$\begin{pmatrix} \Delta y_{\text{IP}} \\ \Delta y'_{\text{IP}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta y'_{\text{SK}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$R_{12} = \sqrt{\beta_{\text{SK}}\beta_{\text{IP}}} \sin \Delta\phi$$

$$\Delta y'_{\text{SK}} = \Delta y_{\text{IP}} / R_{12} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta y') &= \Delta y'_{\text{SK}, I_2} - \Delta y'_{\text{SK}, I_1} \\ &= (\Delta y_{\text{IP}, I_2} - \Delta y_{\text{IP}, I_1}) / R_{12} \end{aligned} \quad (6)$$

磁場とスカラーポテンシャルの関係性をEq. (7)のように表すとスキュー六極電磁石の磁場分布はEq. (8)のように示される。与式から電磁石の位置オフセットの2乗に比例した鉛直方向の軌道の変化が得られることが分かる[14]。Equation (8)とEq. (6)から、 $\Delta(\Delta y')$ が極値を取る時、磁場中心とビーム軌道が一致する。

$$\phi = \sum \{a_n r^n \sin n\theta + b_n r^n \cos n\theta\}, B_n = \text{grad}\phi \quad (7)$$

$$B_{s,3} = 3b_3(x^2 - 2y^2, -2xy) \quad (8)$$

5.2 測定結果

Figure 13にスキュー六極電磁石のBBA結果を示す。横軸は自動位置調整機構の変位量を、縦軸はEq. (6)に示したある電流値 I_1, I_2 それぞれのスキュー六極電磁石地点におけるビームの角度変化 $\Delta y_{\text{IP}, I_1}, \Delta y_{\text{IP}, I_2}$ の差分 $\Delta(\Delta y')$ である。実線は得られたBBA測定結果を2次関数でフィッティングした結果である。得られた $\Delta(\Delta y')$ は2次曲線状の応答が得られた。1台当たり40分程度の時間を要したが、BBAの測定が行えることは確認できた。測定時間の関係上、測定点を7点とした。BBAの測定精度を上げるためには測定点数を増やす必要がある。今回の測定は半自動で行っており、そのため1台40分もの所要時間となった。測定システムの全自動化を行う事でこれら課題は解決可能である。また、得られた測定結果を見ると2次関数の最小・最大においてオフセットを持つ。これはスキュー六極電磁石の磁場中心において変更電磁石成分があることを示唆している。電磁石の組み上げ精度などが原因であると考えられる。夏のシャットダウン期間中に磁場測定による確認作業を行う予定である。

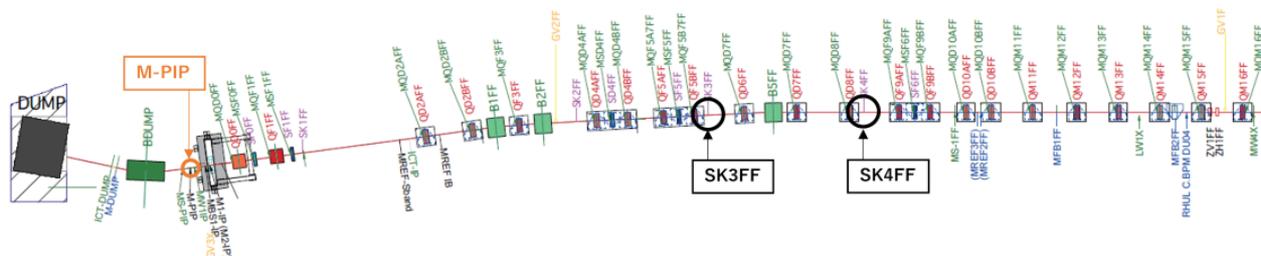


Figure 12: Layout of ATF final focus beamline and BBA components map.

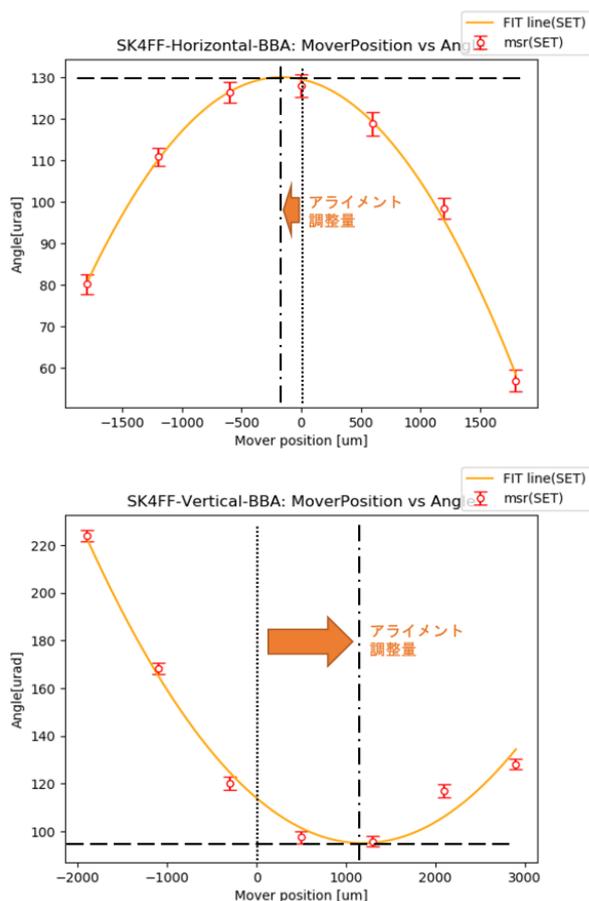


Figure 13: Results of skew sextupole BBA in ATF-FF.

6. まとめと今後の展望

本研究では手動位置調整機構が実装されていたスキュー六極電磁石に対して、自動位置調整機構を実装し、BBAを行える環境整備を行った。位置決め性能としては、 $|X| \leq 1000$ 、 $|Y| \leq 1500$ の範囲において要求仕様を満たすことを確認した。現状では設計性能を十分に発揮できておらず、誤差補正技術を導入することで非線形光学系補正のツールとしての利用も期待されている。現状、1台40分程度の時間を要するが、導入した自動位置調整機構を用いてBBAが可能である事を確認した。所要時間は測定システムの自動化を行う事で縮小可能である。それに伴い、測定点数も増加できるためBBA測定

結果の精度向上(フィッティング精度の向上)も見込める。測定結果から電磁石の組上げ精度等に起因する変更電磁石成分があると考えられ、磁場測定による確認を進めている。

謝辞

本研究を進めるに当たり、高エネルギー加速器研究機構、機械工作センターの佐藤様、伊藤様にご協力頂いた。また、駆動システムの開発に当たり、関東情報サービス(株)の田丸様にご協力を頂いた。この場を借りて陳謝致します。

参考文献

- [1] K. Kubo *et al.*, Phys.Rev.Lett.88,194801(2002).
- [2] Y. Honda *et al.*, Phys.Rev.Lett.92,054802(2004).
- [3] "ATF2 Proposal", KEK Report 2005-2 (2005).
- [4] N. Terunuma *et al.*, "Nanobeam R&D at the KEK Accelerator Test Facility (ATF)", PASJ(18th), WEP059,2021; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/abstracts/html/WEP059.htm
- [5] Orientalmotor- α STEP stepping motor; <https://www.orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=AZM24AK-HS100%2BAZD-KX&seriesCd=IU50>
- [6] Keyence-Laser distance sensor(IL series); <https://www.keyence.co.jp/products/sensor/positioning/il/models/il-s025/>
- [7] Experimental Physics and Industrial Control System; <https://epics.anl.gov/>
- [8] Raspberry Pi; <https://www.raspberrypi.org/products/>
- [9] PyEPICS; <https://pypi.org/project/pyepics/>
- [10] T. Okugi(Private communication).
- [11] Leica-Laser Tracker(AT401); <http://www.alignmentservices.com/wp-content/uploads/2017/08/Leica-AT401.pdf>
- [12] Leica-Nivel 210; https://leica-geosystems.com/products/levels/leica-nivel210_220
- [13] Y. Abe *et al.*, "Development of Active Mover for Remote Position Adjustment of ILC Cryomodule", PASJ(15th), WEP003, 2018; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP003.pdf
- [14] P. Tenenbaum *et al.*, "BEAM-BASED ALIGNMENT OF THE FINAL FOCUS TEST BEAM", 4th International Workshop on Accelerator Alignment (IWA 95),Tsukuba,Japan,1995; <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.17.023501>