

# 電磁石架台のモーター制御 1

## MOTOR CONTROL OF MAGNET SUPPORT 1

榎本嘉範 \*<sup>A)</sup>、佐々木信哉 <sup>A)</sup>、牛本信二 <sup>B)</sup>  
Yoshinori Enomoto\*<sup>A)</sup>, Shinya Sasaki<sup>A)</sup>, Shinji Ushimoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Accelerator Division, KEK

<sup>B)</sup>Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd

### Abstract

A motor controlled magnet support system was developed and installed in the KEK electron positron LINAC to realize low emittance beam required for SuperKEKB experiment. Five axis except for  $z$  motion are moved by stepping motors. Position of the support is monitored and feed-backed by six linear gauge with  $10 \mu\text{m}$  precision. Through the evaluation using  $0.1 \mu\text{m}$  resolution sensors, the system turned out to be having potential to position with much better than  $1 \mu\text{m}$  precision. Alignment and beam tuning with this system are in progress.

## 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器（以下入射器）では、SuperKEKB で要求される低エミッタンス入射ビームを実現するために、様々な取り組みを行っている [1-4]。中でも 2017 年に PF, PF-AR, SuperKEKB LER/HER の 4 リング同時入射を目的として入射器後半のマグネットの大部分を DC マグネットからパルスマグネットへ置き換えたが [5,6]、この際新しいマグネットに合わせて架台も一新した。これまでの測定から入射器の床面は場所によっては年間 1 mm 以上変動することがわかっている。一方で、SuperKEKB で必要とされる入射ビームのエミッタンスを維持するためには、これよりも高精度のアライメントが要求されている。具体的には、マグネット等の主要コンポーネントに関しては、ローカル（概ね 10 m 前後）で  $\sigma = 0.1 \text{ mm}$ 、グローバル（入射器全長約 600 m）で  $\sigma = 0.3 \text{ mm}$  以内にアライメントすることを目標としている。この精度を維持するために、ステッピングモーター制御により 5 軸と手動により 1 軸の位置調整が可能な機構を備えた新たな架台を開発した。本稿では架台及び可動機構の機械設計と試験結果について詳細に述べる。

## 2. 構造および可動機構

Figure 1 に制作した電磁石架台の外観図と写真を示す。1 つの架台に四重極磁石 2 台、水平及び垂直ステアリング磁石各 1 台の合計 4 台を乗せる形になっている。また上流側には 1 台の BPM を設置する。本稿では Fig. 1 中に示したように座標を定義し、それぞれの軸周りの回転を、ピッチ ( $x$  軸)、ヨー ( $y$  軸)、ロール ( $z$  軸) と定義する。架台の位置調整はスクリージャッキ S1 から S6 及びその回転軸に取り付けられたステッピングモーター M1 から M6 により行い、 $z$  方向の並進以外の 5 方向への移動が以下の組み合わせにより可能な構造となっている。なお  $z$  方向の並進運動は押しねじにより手動での調整が可

能になっている。

- $x$  方向への並進運動は S5, S6 を同じ方向へ動かす
- $y$  方向への並進運動は S1 から S4 を同じ方向へ動かす
- ピッチ方向の回転運動は S1, S2 と S3, S4 を逆方向へ動かす
- ヨー方向の回転運動は S5, S6 を逆方向へ動かす
- ロール方向の回転運動は S1, S4 と S2, S3 を逆方向へ動かす

### 2.1 スクリュージャッキとモーター

今回使用したスクリージャッキ及びモーターの主要諸元を Table 1, 2 に示す。

Table 1: Specification of Screw Jack

	S1 - S4	S5, S6
manufacturer	NIPPON gear	NIPPON gear
type	J2GL	JSGL
screw lead	8 mm	4 mm
Worm reduction ratio	24	24
travel per input rotation	0.33 mm	0.17 mm

Table 2: Specification of Motor Unit

	M1 - M4	M5, M6
manufacturer	Oriental motor	Oriental motor
type	PKP264D14A2	PKP246D15A2
phase	2	2
reduction ratio	36	1
step angle	0.05 deg	1.8 deg

機械的遊び等を見無視すると、travel per input rotation と step angle の値から、S1 - S4 (M1 - M4) と S5, S6

\* yoshinori.enomoto@kek.jp

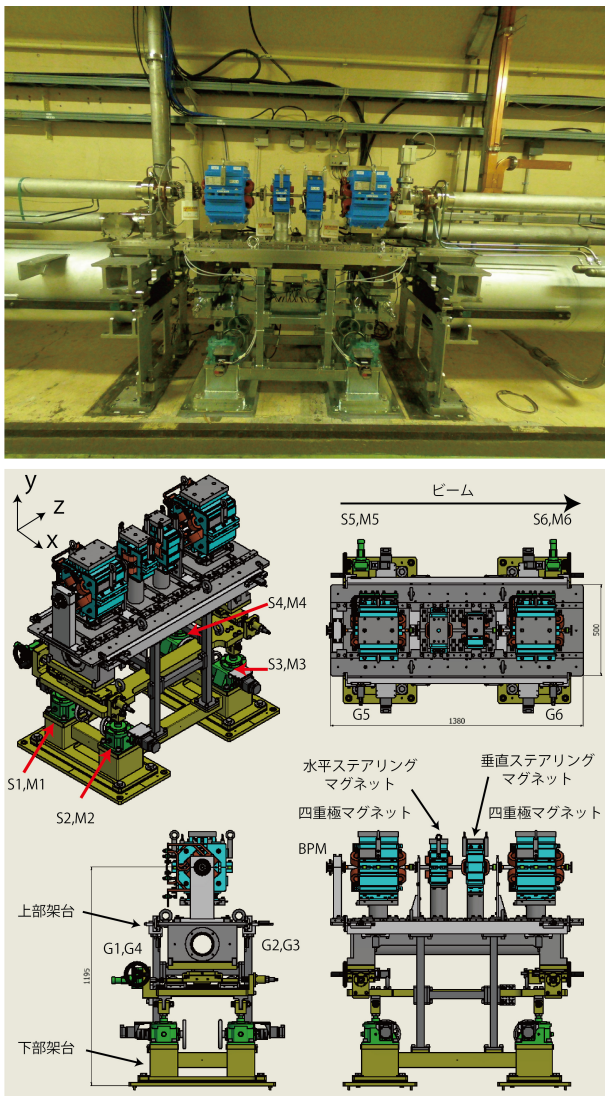


Figure 1: A photo of the magnet support with magnets (top). Isometric and three view of the magnet support with magnets.

(M5, M6) に対して 1 ステップあたりの移動量はそれぞれ  $0.046 \mu\text{m}$ ,  $0.85 \mu\text{m}$  となる。

## 2.2 位置の測定

架台移動量の測定は、非可動部から伸ばしたステータにリニアゲージ (ミットヨ, LGS-1012P、分解能  $10 \mu\text{m}$ ) を取り付け、上部架台の側面 2 箇所、下面 4 箇所を測定することにより  $z$  方向の並進以外の位置を測定している。それぞれのセンサ位置は Fig. 1 中に G1 から G6 で示した。

## 2.3 逃し機構

今回の架台のようにある程度細長い形状で、軸を 1 点に取れない場合、回転方向の運動に伴う角度や位置変化を何らかの形で逃がす必要がある。Figure 2 にロール及びピッチ方向の運動に伴う逃し機構を示す。Figure 2 左下の図はロール方向に動かした場合

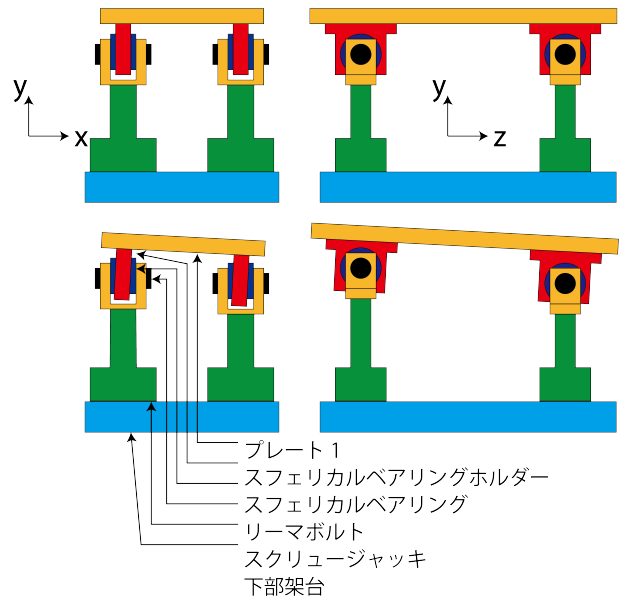


Figure 2: Schematic view of adjustment mechanism for roll and pitch motion.

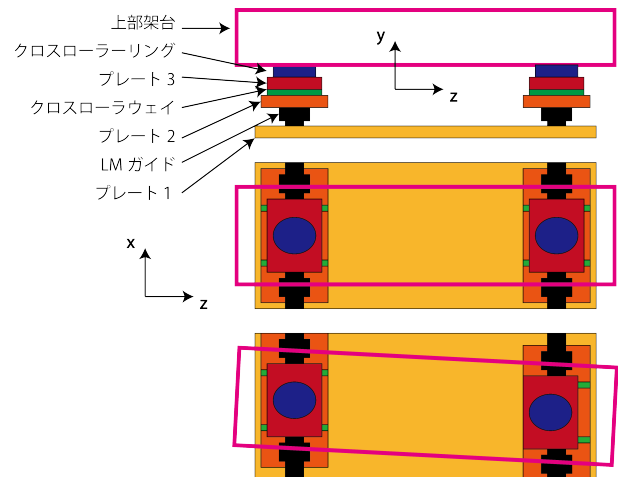


Figure 3: Schematic view of adjustment mechanism for yaw motion.

を、右下の図はピッチ方向に動かした場合を示している。いずれの場合もスフェリカルベアリングが角度を吸収する構造となっている。一方で  $x, z$  方向の距離の変化は大きな角度をつけない限り、変化量が非常に小さいため逃し機構は設けていない。Figure 3 はヨー方向の運動に伴う逃し機構を示している。回転に伴う角度はクロスローラーリングで、 $z$  方向の距離はクロスローラウェイで吸収する。クロスローラウェイは  $z$  方向の押しネジによる手動位置調整にも用いられる。

## 2.4 ロール対策

BPM 及びビームダクトは電磁石と異なり、真空を維持するために両サイドのコンポーネントと接続されておりロール方向へ動かすと破損する恐れがあ

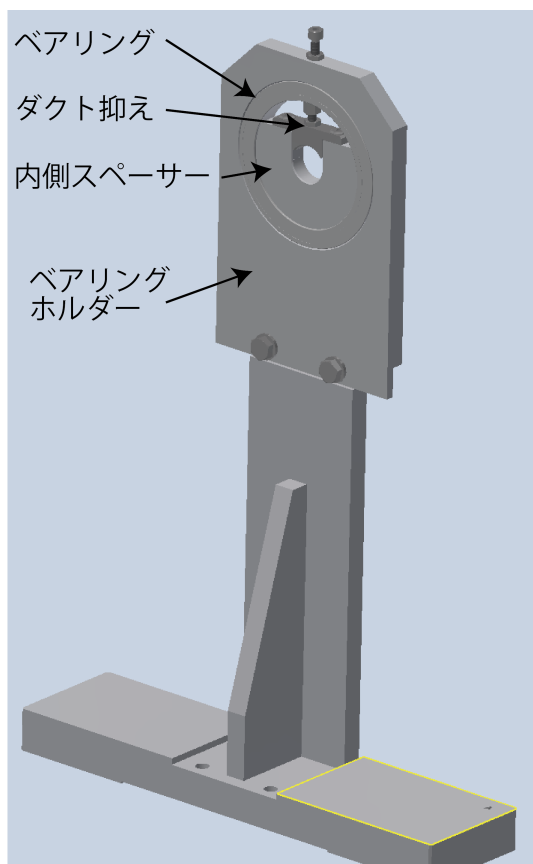


Figure 4: Structure of beam duct support.

る。そのため架台がロールしてもロール方向の力がかからないようなサポートを制作した。Figure 4に構造を示す。フランジサイズより一回り大きいベアリングをベアリングホルダーに固定し、内側スペーサーとダクト抑えで挟んだダクトをベアリング内に通す。ダクト抑えの頭にあるネジで内側から突っ張るようにして、ダクトを内側スペーサーごとベアリング内に固定している。

### 3. 性能評価

#### 3.1 オフライン試験

制作した架台の制御性、安定性に関する性能を評価するために、通常のリニアゲージ（ミットヨ、LGS-1012P、分解能  $10 \mu\text{m}$ ）に変えて高精度のリニアゲージ（ミットヨ、LGK-0110、分解能  $0.1 \mu\text{m}$ ）を取り付け、モーターで架台を動かした際の位置決め精度を測定した。Figure 5は水平方向のスクリーンジャッキ S5 を  $10 \mu\text{m}$  動かした場合のリニアゲージの読みを表している。青いラインが目標値、赤いラインがリニアゲージによる測定値、緑のラインが目標値と測定値の差を表している。G3, G4 に関しては G1, G2 と同じ傾向のため、図では省略している。測定結果から、動かした箇所は  $1 \mu\text{m}$  より十分良い精度で目標値に到達していると同時に、動かしていない箇所に関しては、 $0.5 \mu\text{m}$  以内で元の位置にとどまっていることがわかる。同様に Fig. 6 に垂直方向のス

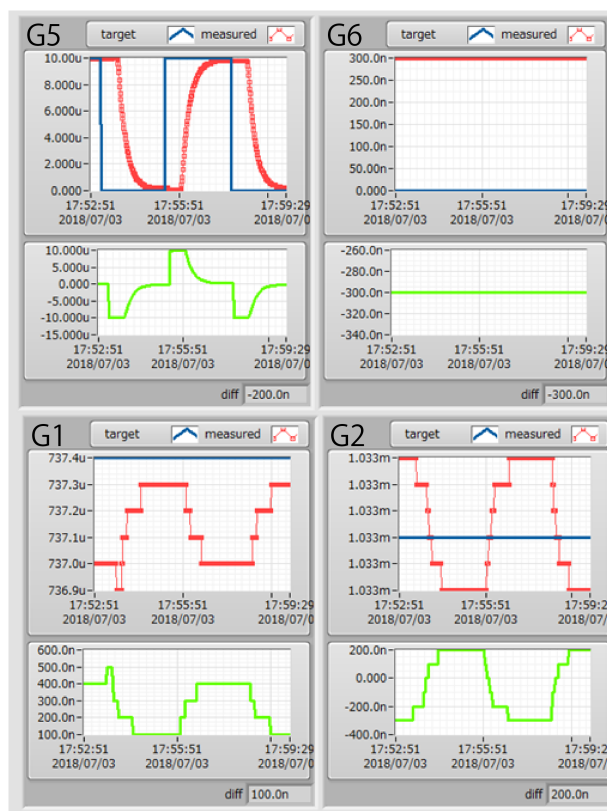


Figure 5: Displacement of each position when S5 is moved  $10 \mu\text{m}$ .

クリュージャッキ S1 を動かしたときの測定結果を示す。垂直方向に動かした場合は、数  $\mu\text{m}$  程度水平方向へも動いてしまっている。しかし、垂直方向の移動を止めた後で、水平方向の調整を行うことによりグラフの右端ではやはり  $1 \mu\text{m}$  より十分良い制度で、全箇所目標値へ合わせることができている。

Figure 7 はモーター制御を行わないで、約 2 日間放置した際の変動を表している。温度変化や周辺環境の振動などにより、位置が実際に動いたり、センサーの読みが変動する可能性があるが、この測定からはその値は  $5 \mu\text{m}$  程度であった。

#### 3.2 オンライン試験

Figure 8 にビームを使った測定結果を示す。横軸は架台位置、縦軸は BPM で測定したビームの位置を表している。上の 2 つは架台を  $x$  (水平) 方向へ移動した場合、下の 2 つは架台を  $y$  (垂直) 方向へ移動した場合の結果に対応している。それぞれ架台の移動量は  $0.1 \text{ mm}$  ステップで元値から  $\pm 0.5 \text{ mm}$  としている。BPM は架台と一緒に動くためビームが動かなければ、架台を動かし分だけビーム位置の測定値が動いたように見える。測定結果を見ると左上 (架台を  $x$  方向へ動かした際のビームの  $x$  位置) と右下 (架台を  $y$  方向へ動かした際のビームの  $y$  位置) が傾き 1 で比例しており、左下と右上はほぼ動いていないことから想定通りの結果を確認することができた。



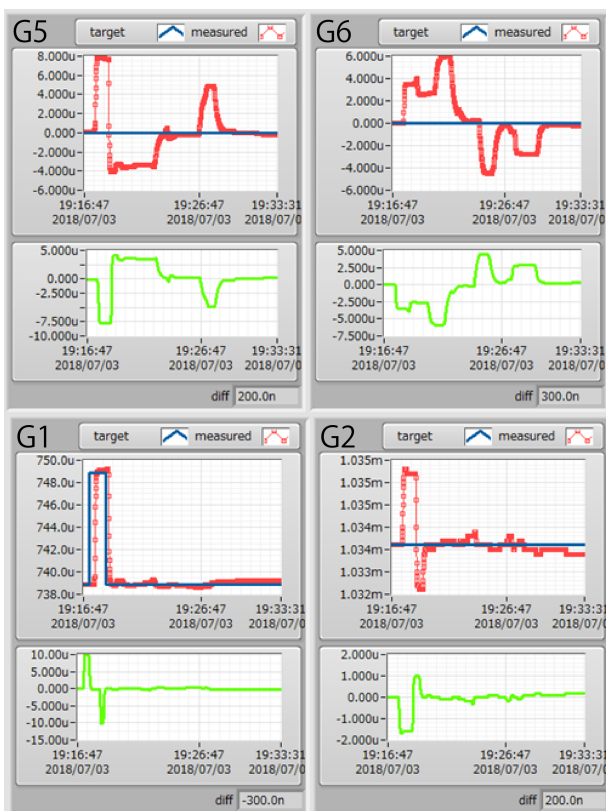


Figure 6: Displacement of each position when S1 is moved  $10 \mu\text{m}$ .

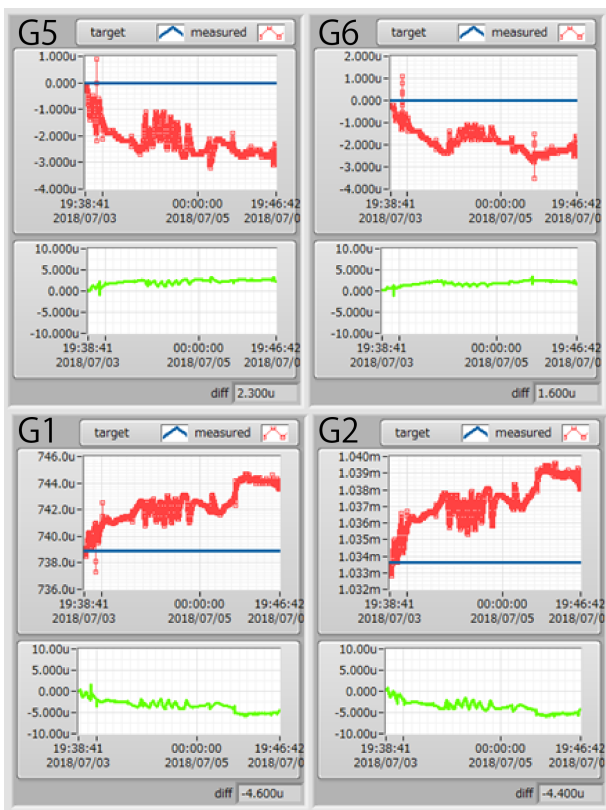


Figure 7: Stability for 2 days when motors were not moved.

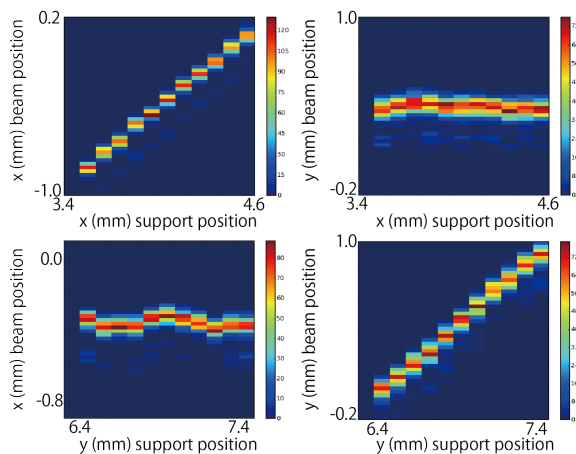


Figure 8: Beam position as a function of support position. In the case support is moved  $x$  direction (top) and  $y$  direction (bottom).

#### 4. まとめ

モーター制御により、 $z$  方向並進以外の 5 軸が制御可能な電磁石架台を制作し、性能評価を行った。高精度リニアゲージを用いた測定から、機構的には  $1 \mu\text{m}$  以下の位置決め精度を有しており、各軸独立に制御できることを確認した。同様の架台は 13 セット入射器に設置されており、動作試験も完了している。2018 年の運転ではビーム軌道を見ながら架台位置を動かして、ステアリングコイルによる補正量が少なくなるように調整するテストを行い、一定の効果があることを確認している。運用に関しては今後のビームチューニングを通しさらなる活用方法を模索していきたいと考えている。

#### 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 500 m 長レーザー長基線の高安定化”, 加速器 **10**, 226, 2013.
- [2] S. Ushimoto *et al.*, “SuperKEKB 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, Japan, Aug. 9-11, 2014, pp. 899-903.
- [3] S. Ushimoto *et al.*, “KEKB 入射線形加速器トンネル床変動の測定 (2)”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 891-894.
- [4] Y. Enomoto *et al.*, “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”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 887-890.
- [5] Y. Enomoto *et al.*, “A NEW PULSED MAGNET CONTROL SYSTEM IN THE KEK ELECTRON POSITRON LINAC”, Proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, 2018, pp. 2121-2123.
- [6] Y. Enomoto *et al.*, “PULSE-TO-PULSE BEAM MODULATION FOR 4 STORAGE RINGS WITH 64 PULSED MAGNETS”, Proceedings of LINAC2018, Beijing, China, 2018, pp. 609-614.