

# ILC クライオモジュール用位置調整機構『アクティブムーバ』の開発 DEVELOPMENT OF ACTIVE MOVER FOR REMOTE POSITION ADJUSTMENT OF ILC CRYOMODULE

阿部優樹 <sup>\*A)</sup>, 鶴沢知弘 <sup>A)</sup>, 藤原康宣 <sup>A)</sup>, 渡辺雅哉 <sup>B)</sup>, 菊地 正 <sup>C)</sup>, 早野仁司 <sup>D)</sup>

Yuki Abe<sup>A)</sup>, Tomohiro Uzawa<sup>A)</sup>, Yasunori Fujiwara<sup>A)</sup>, Masaya Watanabe<sup>B)</sup>, Tadashi Kikuchi<sup>C)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>National Institute of Technology, Ichinoseki college, <sup>B)</sup>Tohothecnos, <sup>C)</sup>NEC platforms, <sup>D)</sup>KEK

## Abstract

International Linear Collider(ILC) is a high luminosity electron-positron accelerator. Cryomodules which consist of a cavity and thermal shields etc are connected to each other to realise 20km long. During running the acceleration facilities, cryomodules equipped in the bunch compressor section require to fine-adjust to the vertical and horizontal direction while monitoring the condition of beams. Currently, a manual alignment system is used in test facilities. But the remote automated alignment system, named ActiveMover, is required in the real structures. It's required the capability to fine-adjust within  $10\mu\text{m}$  under the 12t heavy loads. Hence we propose the two methods of the Active Mover. 1st is 2-CAM method which consists of 2 eccentric cams. 2nd is 2-AXIS method which consists of an eccentric cam and wedge configuration. This paper reports both designed requirements and validation of them based on the results of evaluation by the 1/7 scale mockups.

## 1. はじめに

ILC はクライオモジュールと呼ばれる超伝導空洞等を内蔵した筒形断熱装置を次々と接続し、構成される大型線形加速器である。バンチ圧縮部のクライオモジュールには運転中にビームの応答を見ながら鉛直・水平方向の位置調整が求められている。現在、クライオモジュール試験機に使用されている位置調整機構を Fig. 1 に示す。図中の丸部に位置調整用ボルトが実装されており、ボルトを回すことによって位置調整が行われてきた。しかし、ビーム稼働中は装置周辺が放射線環境下になるため人が立入ることが出来ず、既存の方式ではビーム稼働中の位置調整が不可能であった。そのため、実際に建設される加速器ではクライオモジュールの精密位置決めを可能とする遠隔操作型のアクティブムーバの実装が求められている。アクティブムーバには、重量約 12[t] のクライオモジュールを鉛直・水平方向に  $10[\mu\text{m}]$  の分解能で位置決めを行う性能が要求される。そこで、要求を実現する機構として、2 方式のアクティブムーバを提案する。2 つの偏心カムから成る 2 カム方式と 1 つの偏心カムと 1 つのテーパカムから構成される 2 軸方式と名付けた。評価に当たり、我々は 1/7 スケールのモックアップと自動測定システムを作製し、3 種の性能実験を行った。本研究では、各実験結果を基に両方式の設計要件および実現可能性について報告する。

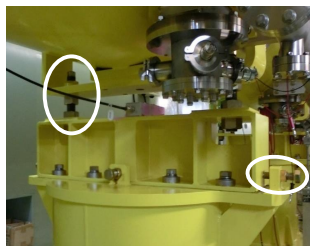


Figure 1: Manual adjustment system in the test module

## 2. 提案する位置調整機構

Table 1 に実装予定のクライオモジュールと開発したモックアップの仕様を示す。クライオモジュールは非常に大きな装置であり、実物での実験・評価等を行うことが困難である。そこで本研究では、実機の約 1/7 スケールのモックアップを用いて機構の評価を行うことにした。Figure 2 に開発したモックアップの外観を示す。クライオモジュール実機には X, Z 軸それぞれ  $\pm 10[\mu\text{m}]$  の位置精度が求められる。本研究でのモックアップの要求精度は  $\pm 5[\mu\text{m}]$  とした。

Table 1: Specifications of a Cryomodule and Mockup

Real scale		Mockup(1/7 scale)
1,000	Diameter[mm]	139.8
12	Length[m]	1.68
12,000	Weight[kg]	37

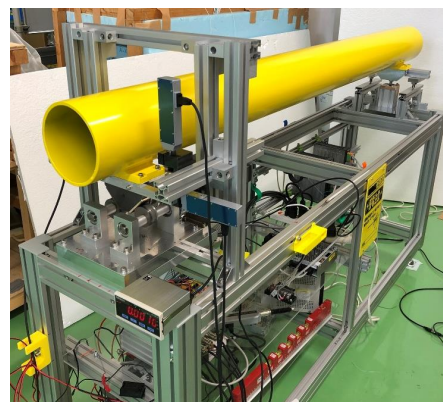


Figure 2: Entire view of mockup.

## 2.1 2カム方式

Figure 3 に 2 カム方式の機構図を示す。円板の中心点から距離  $h$  偏心させた点を回転軸とする偏心カムを距離  $L$  の間隔で配置し、その間に頂角  $\alpha$  であるカムフォロワをカムと接触させるように配置する。2つのカムの回転角を制御することにより、 $X$ 、 $Z$  方向の位置決めを実現する。その回転角と変位の関係は  $\alpha=90[\text{deg}]$  の時、次式で表される [1].

$$\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = h \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) & -\sin(\pi/4) \\ \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) & \sin(\pi/4) \\ -\sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \quad (2)$$

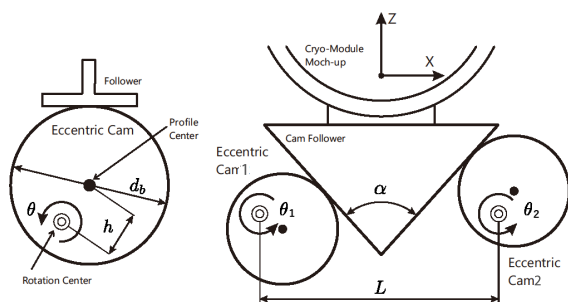


Figure 3: Mechanism schematics of 2-CAM method.

Figure 4 に開発した 2 カム方式のモックアップ外観を、Table 2 にその仕様を示す。摩擦を軽減するために、偏心カムとカムフォロワの間に無給油プレートを実装した。カムの駆動には、分解能 1000[step/rev] と減速比 50 のステッピングモータを使用し、変位の理論分解能は  $0.057 \leq \Delta X, \Delta Z \leq 1.2[\mu\text{m}]$  を実現する。

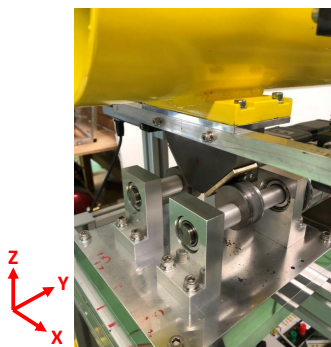


Figure 4: Mockup of 2-CAM method.

Table 2: Parameters in a 2-CAM Method

Param	Detail	Value
$h$	: Eccentricity[mm]	5.0
$\alpha$	: Follower angle[deg]	90
$d_b$	: Cam diameter[mm]	20
$L$	: Distance between 2 shafts[mm]	80

## 2.2 2軸方式

Figure 5 に開発した 2 軸方式の機構図を示す。この方式では、2つの軸方向を異なった機構で独立に動かすことができるという特徴を持つ。 $X$  軸方向は偏心カム、 $Z$  軸方向はテーパカムを用いることで位置決めを実現する。 $Z$  軸方向は角度  $\beta$  のくさび型カムがボールねじを介して駆動され、それに接触しているフォロワが追従することにより変位を生み出す。2軸方式における各モータの回転角と、変位の関係は次式で示される。

$$x = h \cos \theta_x, \quad z = (p \tan \beta) \theta_z \quad (3)$$

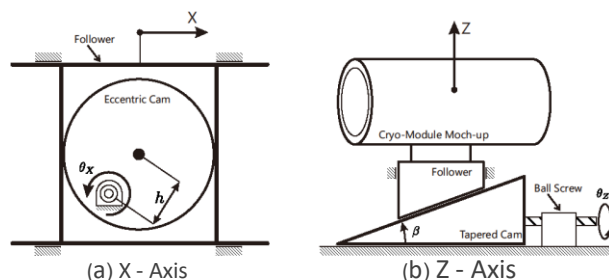


Figure 5: Mechanical schematics of 2-AXIS.

Figure 6 に開発した 2 軸方式の外観を、Table 3 にその仕様を示す。 $X$  軸方向の機構の上に  $Z$  軸方向の機構が搭載されるため、それぞれの動作を独立して行うことができる。 $X$  軸方向、 $Z$  軸方向とも分解能 1000[step/rev] のステッピングモータで駆動する。そのため、各軸の分解能は  $0.07 \leq \Delta X \leq 22[\mu\text{m}]$ ,  $\Delta Z=0.175[\mu\text{m}]$  である。

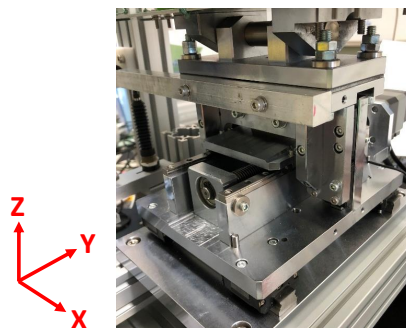


Figure 6: Mockup of 2-AXIS method.

Table 3: Parameters in a 2-AXIS Method

Param	Detail	Value
$h$	: Eccentricity[mm]	3.5
$p$	: Lead pitch[mm/rad]	0.318
$\beta$	: Angle of tapered cam[deg]	5.0

### 3. 性能評価

#### 3.1 実験装置

提案した2つの機構の位置決め精度を確認するために、評価実験を行った。Figure 7に示すように、機構のX軸およびZ軸変位を接触式の変位計で直接測定し、目標位置との誤差を評価した。測定は機構を駆動するステッピングモータと接触式変位計を連携させた計測システムにより自動で行われる。Table 4に使用した変位計の仕様を、Fig. 8に開発した自動計測システムのブロック図を示す。

なお実験では、2カム方式ではクライオモジュールのモックアップを、2軸方式では2.5[kg]を負荷として与えた。また実験中の室温は、 $25.5 \pm 1.0$ 度である。

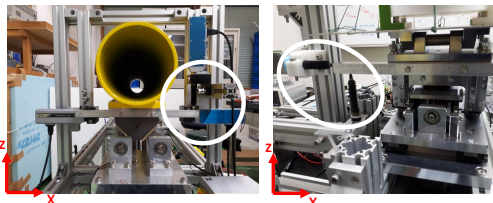


Figure 7: Measurement point.

Table 4: Specification of Using Sensors

Method	Counter	Sensor	resolution[ $\mu\text{m}$ ]
2-CAM	EV-16Z	LGF-0525ZL	0.5
2-JIKU	EF-12PRH	LGF-125L	1

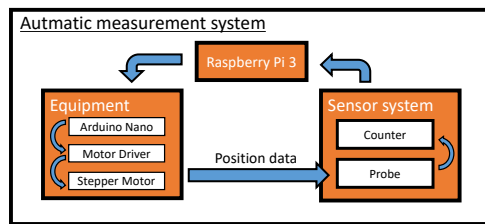


Figure 8: Automatic measurement system.

#### 3.2 実験1：位置決め精度評価

開発した機構の位置決め精度を確認するため、設定した目標点に移動するために必要な操作量（パルス）をモータへ入力し、実際の機構の変位量と目標値との差を誤差として評価した。

Figure 9, 10にそれぞれ2カム方式および2軸方式の結果を示す。同図から、両方式において全体的な分布のばらつきが一様であることが分かる。そこで、 $Z=-2.5[\text{mm}]$ の時のX, Z軸方向への誤差に注目することにした。Figure 11-14にその誤差を示す。Figure 13から、2軸方式X軸方向への誤差量が顕著であることが分かる。一方で、Fig. 14から、2軸方式Z軸方向への誤差

量が最も小さいことが分かる。しかし、結果としてみると両方式とも求める位置決め精度を満足していないと言える。

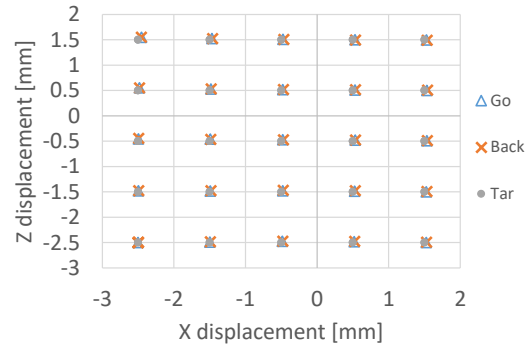


Figure 9: Measurement results of 2-CAM.

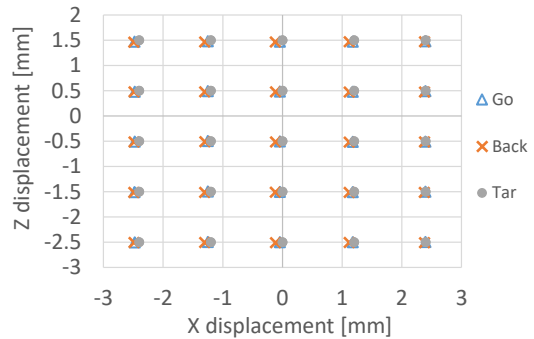


Figure 10: Measurement results of 2-AXIS.

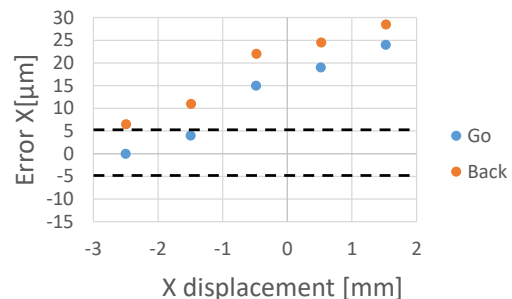


Figure 11: Error to X axis in 2-CAM.

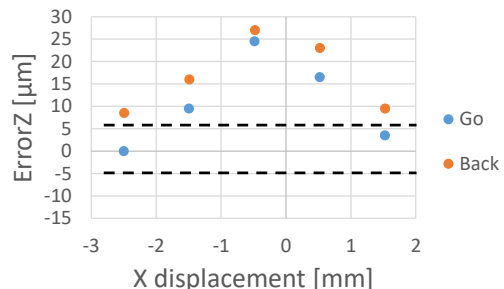


Figure 12: Error to Z axis in 2-CAM.

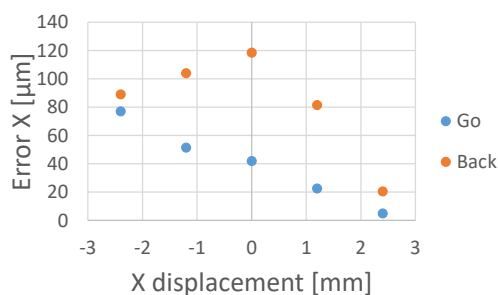


Figure 13: Error to X axis in 2-AXIS.

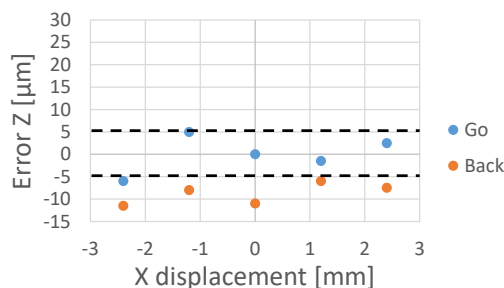


Figure 14: Error to Z axis in 2-AXIS.

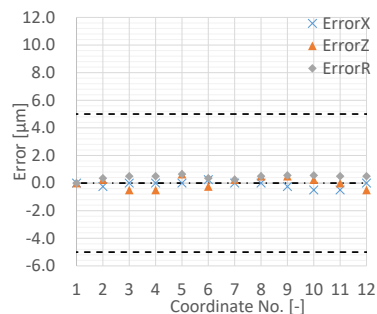


Figure 16: Relative position error in 2-CAM system.

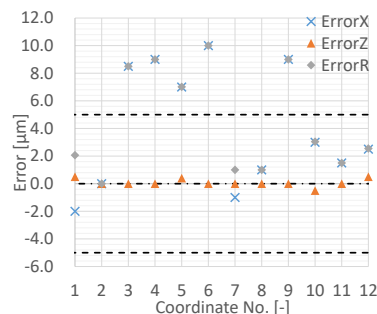


Figure 17: Relative position error in 2-AXIS system.

### 3.3 実験2：変位量のフィードバックによる誤差補正

実験1において、目標点へ行くために必要な操作量を一度入力しただけでは、位置決め精度を満足出来ないことが分かった。そこで機構の変位量をフィードバックすることで、位置決め誤差を小さくできるか確認する実験を行った。Figure 15 にそのブロック図を示す。変位量から誤差を計算し、その誤差がある一定の範囲内に収束するまで機構を駆動する方式となっている。

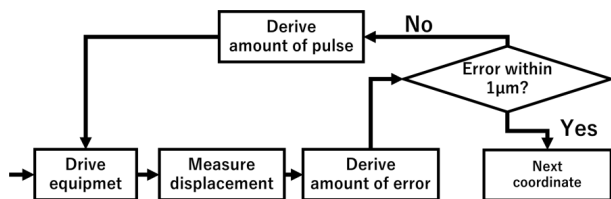


Figure 15: The flow of error adjustment system.

Figure 16, 17 に実験から得られた各点における誤差量を示す。図には、 $X$ 、 $Z$  軸方向と半径方向  $R$  の誤差を表し、破線は要求仕様である  $\pm 5.0[\mu\text{m}]$  を表す。今回、2 軸方式  $X$  軸方向に関して当初の収束条件では測定を終えることが出来なかった。そのため、2 軸方式のみ収束条件を  $X$  軸方向に  $20[\mu\text{m}]$ 、 $Z$  軸方向に  $1[\mu\text{m}]$  と改めた。実験1より得られた結果を踏まえると、誤差補正制御の恩恵から全体として位置決め精度の向上が見られる。加えて、2 カム方式と 2 軸方式  $Z$  軸位置調整機構の位置決め精度が要求仕様を満たすことが明らかになった。一方で 2 軸方式  $X$  軸位置調整機構の位置決め精度が未だに要求仕様を満たさないことが判明した。原因として分解能の不足が考えられるため、対策として偏心カムのオフセット量  $h$  を検討する必要がある。

## 4. おわりに

実際に用いられるバンチ圧縮部の ILC クライオモジュールには、ビーム稼働時においても鉛直・水平方向に  $10[\mu\text{m}]$  の位置調整が行える遠隔操作型アクティブムーバの実装が求められている。本研究では、2 カム方式、2 軸方式のアクティブムーバの提案と 2 つの実験による精度評価を行った。実験結果から、誤差補正制御を実装することによって、位置決め精度を向上できることが判明した。制御を実装した段階で 2 カム方式と 2 軸方式  $Z$  軸方向の位置決め精度が要求仕様を満たす事が示された。一方、2 軸方式  $X$  軸方向の位置決め精度においては要求仕様を満たさないことが明らかになった。原因として分解能の不足が考えられるため、今後、分解能と出力トルクの観点から偏心カムの再検討を行いたいと考えている。また、実験における試行回数と条件設定を見直し、実験の質を向上していく必要がある。現在、実寸大 2 軸方式アクティブムーバの開発も進めており、位置精度評価用の駆動・測定系の環境構築や装置の固有振動数、強度等の解析にも着手していく予定である。

## 参考文献

- [1] Uzawa Tomohiro, "Development of active mover for ILC cryomodule", 平成 29 年度特別研究論文集, National Institute of Technology, Ichinoseki College, Mar. 2017, pp.22-27.
- [2] J. Kempainen, F. Lackner, H. Mainaud Durand, "Validation Test of a Cam Mover Based Micrometric Pre-Alignment System for Future Accelerator Components", MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 12, No. 5, 2012; <http://www.measurement.sk/2012/Kempainen.pdf>