PASJ2018 WEP003

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 *A), 鵜沢知弘 A), 藤原康宣 A), 渡辺雅哉 B), 菊地 正 C), 早野仁司 D)

Yuki Abe^{A)}, Tomohiro Uzawa^{A)}, Yasunori Fujiwara^{A)}, Masaya Watanabe^{B)}, Tadashi Kikuchi^{C)}, Hitoshi Hayano^{D)}

^{A)}National Institute of Technology, Ichinoseki college, ^{B)}Tohothecnos, ^{C)}NEC platforms, ^{D)}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 10μ 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[µm] 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±10[µm] 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±5[µm]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 α 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 α =90[deg] の時,次式 で表される [1].

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



Figure 3: Mechanism shematics 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 $\leq \Delta X, \Delta Z \leq 1.2 [\mu m]$ を実現する.



Figure 4: Mockup of 2-CAM method.

| Param | | Detail | Value |
|----------|---|-------------------------------|-------|
| h | : | Eccentricity[mm] | 5.0 |
| α | : | 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 β 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.

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



Figure 5: Mechanical shematics of 2-AXIS.

Figure 6 に開発した 2 軸方式の外観を, Table3 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 $\leq \Delta X \leq 22[\mu m]$, $\Delta Z=0.175[\mu m]$ である.



Figure 6: Mockup of 2-AXIS method.

Table 3: Parameters in a 2-AXIS Method

| Parar | n | Detail | Value |
|---------|---|---------------------------|-------|
| h | : | Eccentricity[mm] | 3.5 |
| p | : | Lead pitch[mm/rad] | 0.318 |
| β | : | Angle of tapered cam[deg] | 5.0 |

PASJ2018 WEP003

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.Figure7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.Table4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±1.0度である.



Figure 7: Measurement point.

| Table 4: | Specific | ation of | Using | Sensors |
|----------|----------|----------|-------|---------|
|----------|----------|----------|-------|---------|

| Method | Counter | Sensor | resolution[μm] |
|--------|----------|------------|-----------------------|
| 2-CAM | EV-16Z | LGF-0525ZL | 0.5 |
| 2-JIKU | EF-12PRH | LGF-125L | 1 |



Figure 8: Autmatic 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[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.



Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan

PASJ2018 WEP003



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



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

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 ±5.0[μ 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[μ m], Z 軸方向に 1[μ 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.



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



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

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[µm] 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

- 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. Kemppinen, F. Lackner, H. Mainaud Durand, "Validation Test of a Cam Mover Based Micrometric Pre-Alignment System for Future Accelerator Components", MEASURE-MENT SCIENCE REVIEW, Volume 12, No. 5, 2012; http: //www.measurement.sk/2012/Kemppinen.pdf