

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

藤原康宣^{#, A)}, 石川歩^{A)}, 阿部優樹^{B)}, 早野仁司^{C)}

Yasunori FUJIWARA^{#, A)}, Ayumu Ishikawa^{A)}, Yuki Abe^{B)}, Hitoshi Hayano^{C)}

^{A)} National Institute of Technology, Ichinoseki College

^{B)} Graduate University for Advanced Studies

^{C)} 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 realize 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 ActiveMovie, 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

岩手県一関市に建設が予定されている ILC(International Linear Collider)は、クライオモジュールとよ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、全長 20km もの直線型加速器を実現する。クライオモジュールの接続部には鉛直・水平 2 方向の精密な位置決めが求められ、かつこの位置決めを加速器運転中のビーム出力をモニタしながら行うことが要求されている。現状のクライオモジュール試験機の位置調整は調整用ボルトの操作により行われているが、実際の ILC ではこれを自動で行える装置『アクティブムーバ』の開発が求められている。アクティブムーバには重量約 12t 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える性能が要求されている。筆者らの研究グループでは、これを満たすためにカムを用いた二つの方式を提案し、クライオモジュールの 1/7 モックアップで性能評価を行った[1]。両方式とも要求仕様を満足することと、フルスケール装置への展開可能性を示すことができた。一方この方式で採用された偏心カムはカムの回転角とクライオモジュールの変位の関係が非線形のため、位置決め分解能が一樣にならないという性質があり、これが位置決め性能に影響を及ぼすことも明らかになった。本研究ではこれらの課題を解決する新しいカムの提案と、その位置決め性能に対する効果について報告する。

2. 提案する位置調整機構とその課題

クライオモジュールの位置調整について、可動範囲

10mm, 分解能 $10 \mu\text{m}$ の性能が求められており、12t のクライオモジュールを駆動することが要求される。この課題に対し、筆者らはカム機構による 2 つの方式、2 カム方式および 2 軸方式を提案した[2]。Figure 1 に 2 カム方式の機構図を示す。2 つの偏心カム(偏心量 h)を距離 L の間隔で配置し、その間に頂角 α であるカムフォロアを配置する。2 つのカムの回転角(θ_1, θ_2)を制御することにより、X,Z 方向の位置調整を実現する。

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

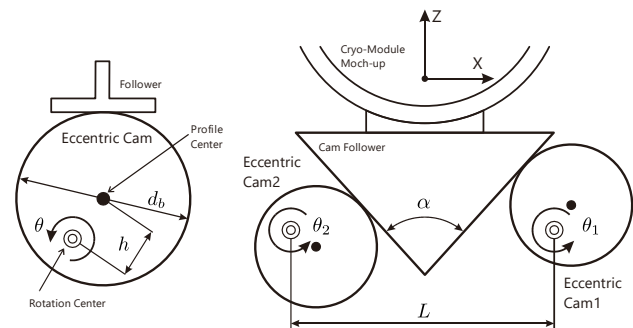


Figure 1: Proposed mechanism 2-cam method.

Figure 2 に 2 軸方式の機構図を示す。X 方向は偏心カム、Z 方向はテーパカムにより位置調整を行うことができる。モータの回転角と変位の関係は次式となる。

$$x = h \cos \theta_x \quad (2)$$

$$z = (p \tan \beta) \theta_z$$

fujiwara@ichinoseki.ac.jp

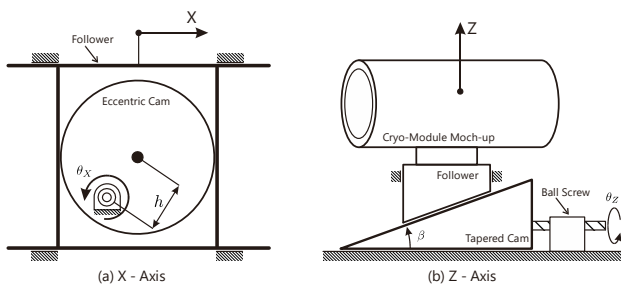


Figure 2: Proposed mechanism 2-axis method.

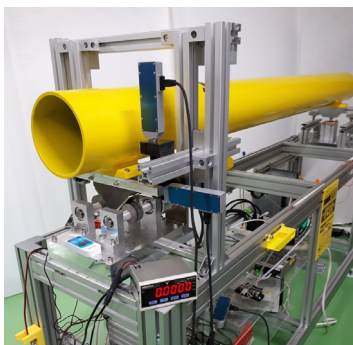


Figure 3: 1/7 mockup.

2カム方式は制御式は複雑となるが、大荷重への対応が比較的容易である。一方2軸方式は2つの方向を独立して制御することができるため、位置調整精度に優位である。性能評価のため、Fig. 3に示す1/7モックアップ試験機を開発した。接触式変位計によりXおよびZの2方向の変位を $0.5\mu\text{m}$ の分解能で読み取ることができる。この装置による性能評価をおこなったところ、両方式とも、要求される分解能および位置誤差を実現することを確認した。一方、分解能がカムの位置によって変化すること、また位置誤差を調整する際の制御方法の複雑さが明らかになった。これは偏心カムの回転角と変位の関係が非線形であることが原因である。本研究では、回転角と変位の関係が直線となる線形カムを用いることで、上記の課題を解決することを目的とする。評価は1/7モックアップでおこなうためそれに合わせた設計とする。

3. 2カム方式における線形カムの適用

2カム方式に線形カムを適用した場合のカムの回転角と変位の関係は次式となる。

$$\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \frac{R}{A} \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) & -\sin(\pi/4) \\ \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここでRは変位量、Aはカムの有効回転角である。一般的にカムは回転角 360° 全てを使用できるようにプロフィールを設計するが、本研究では使用する回転角を制限することで、位置決め分解能を高めることにした。

Figure 4に1/7モックアップに適用するために設計したカム線図を、Fig. 5にそのプロフィール(カム外形)を示す。基礎円直径は従来の偏心カムと同じ35mmとし、移

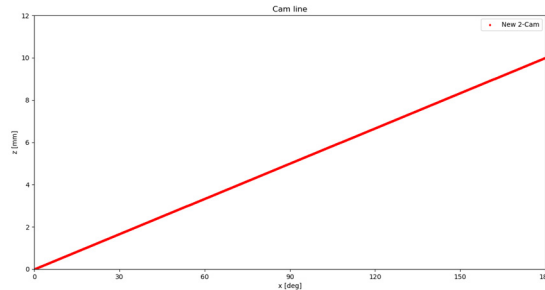


Figure 4: Linear cam diagram for 2-cam method.

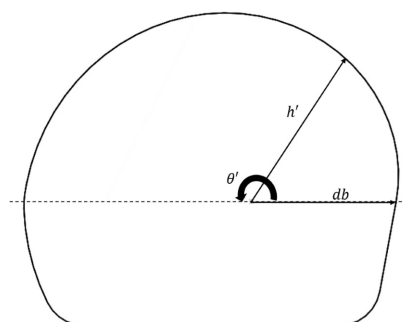


Figure 5: Profile of proposed linear cam.

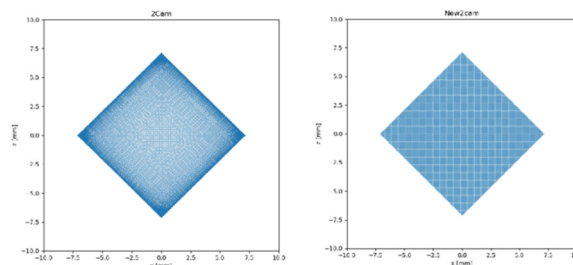


Figure 6: Resolution of mover positioning of 2-cam method.

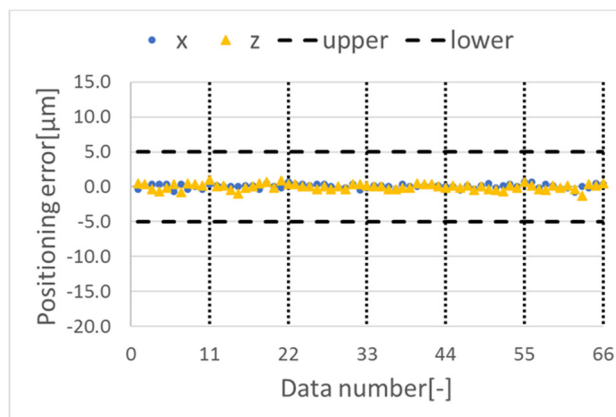


Figure 7: Position error in 2-cam method.

動量 10mm を有効回転角 180° で実現することにした。

Figure 6 に分解能の解析結果を示す。これは回転角を一定の角度で変化させた時の変位をプロットしたものである。2 カムの方式の移動範囲は菱形となるが、同図左に示す偏心カムではその中央部と移動限界のところで、変位の分布が異なっていることがわかる。これは、Eq. (1) の非線形の関係から、分解能に差が現れていることを示めている。モックアップに使用しているステッピングモータの最小分解角を与えたところ、分解能は 0.075 μm から 0.89 μm の間で変化することが分かった。一方同図右に示す線形カムの場合では、移動範囲内で一定の分布となり、その分解能は 0.57 μm であった。両方式とも分解能は要求性能を満足しているが、線形カムではどの位置あってもそこから移動できる分解能は一定となるため、位置誤差補正時には制御しやすいことが分かる。

Figure 7 に線形カムにおける位置決め性能評価を示す。これは接触式変位計を使用し、フィードバックにより位置誤差を打ち消すよう制御をした場合の結果である。要求性能である 5 μm 以下の位置決め性能を有していることが分かる。

4. 2 軸方式における線形カムの適用

2 軸方式では、X 方向の位置調整に偏心カムを使用している。そのため、前節で説明した分解能の分布が発生し、特定の位置で位置決め精度に影響を与えることが分かった。2 カム方式と同様、線形カムを適用することでこの問題を解決することとした。Figure 2 に示すように、2 軸方式の X 方法は、偏心カムをガイドで挟み込むような形式になっている。2 カム方式では、カムとフォロアはある面でのみの接触していたのに対し、2 軸方式では、移動の方向によりカムが押しつけるガイドが切り替わる。このため、押しつけ側と逆側のガイドでは、移動量と同じ変位だけカムの変位量を減少させ、ガイド間にはまるようなプロファイルが求められる。そこで、有効回転角の逆側で同じ傾きをもつ直線で変位が減少するような線形カムを設計した。このときのカム回転角と変位の関係は次式となる。

$$x = \frac{R_x}{A_x} \theta_x \quad (4)$$

Figure 8 に、1/7 モックアップ用に設計した線形カムのカム線図を、Fig. 9 にプロファイルを示す。有効回転角を 120° (30° ~150°) とし、その間で 5mm の移動量を実現するような設計とした。一方その逆位相側 (210° ~ 330°) では、同じ変化量で減少するようにした。

設計した線形カムを 1/7 モックアップに取り付け、性能評価を行った。Figure 10 に線形性を確認した結果を示す。非接触式変位計で X 方向の変位を確認したところ、線形性が確保できていることがわかる。またカムは時計回転および反時計回転ともスムーズに回転することが分かった。提案したカム線図が、2 軸方式の X 方向にも適用可能である事が分かった。Figure 11 に位置誤差フィードバック制御による位置決め精度の評価を示す。概ね要求性能を満足しているが、誤差が大きく発生する場面があることが分かった。これは、誤差補正の際に目

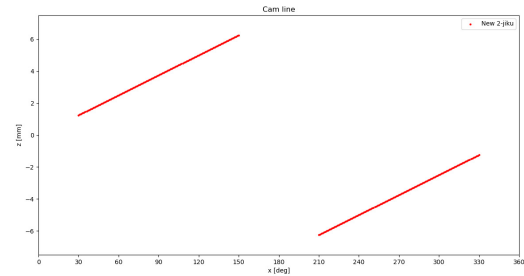


Figure 8: Linear cam diagram for 2-axis method.

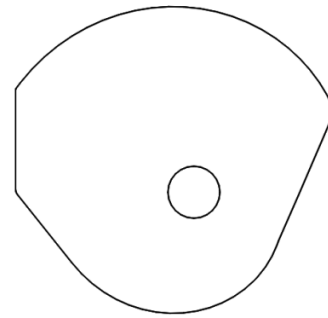


Figure 9: Profile of proposed linear cam for 2-axis method.

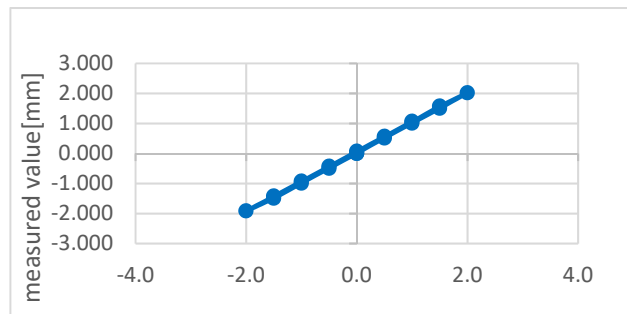


Figure 10: Linearity of proposed linear cam.

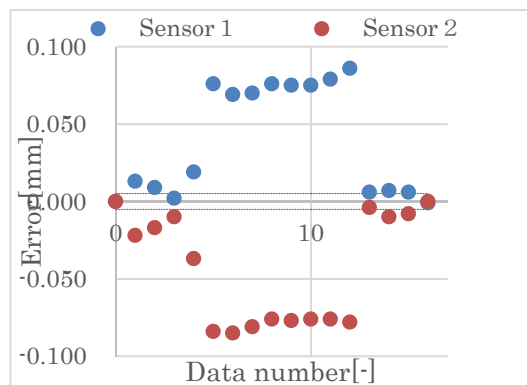


Figure 11: Position error in 2-axis method.

標値を行き過ぎ、逆回転で補正を行う場合にみられ、カムとフォロワの間のバックラッシュによる影響であると考えられる。

5. おわりに

ILC クライオモジュール位置調整機構『アクティブムーバ』について、カムプロファイルの最適化による位置決め性能への効果について報告した。カムの回転角とムーバの変位が直線の関係となる線形カムを提案した。これにより関係式が簡単になること、分解能が一樣になることを確認し、制御性の向上に効果があることが分かった。関係式の線形化は、フィードバックによる位置誤差補正をより容易にすることも期待できる。一方従来の偏心カムでは影響がなかったバックラッシュが、特に 2 軸方式の位置誤差に顕著に表れることが分かった。

今後の展望として、バックラッシュ考慮した位置誤差補正フィードバック機能の実現と、フルスケール装置への適用に取り組む予定である。

参考文献

- [1] 阿部優樹, 鶴沢知弘, 藤原康宣, 渡辺雅哉, 菊地正, 早野仁, " 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", 第 15 回日本加速器学会年会, WEP003, (2018-8-8);
<http://www.jacow.org/index.php?n=Authors.MSWord>
- [2] J. Kemppinen, 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.