

# シンプルな可動機構を用いた加速管ムーバシステムの開発

吉村 尚秀<sup>1,A)</sup>、大塚 美智夫<sup>A)</sup>、松本 浩<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 株式会社オオツカ

〒300-3253 茨城県つくば市大曾根 607-1

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

加速管ムーバは、ビームが加速管の中心軸を通るよう加速管の位置・姿勢を機械的に補正するための精密可動機械である。

本開発では、偏心軸と自動調心玉軸受を用いた非常に簡潔な可動機構を使用し、アライメント範囲 $\pm 1$  mm 程度、位置決め分解能 $\pm 1 \mu\text{m}$  以下を目標とした加速管ムーバの開発を行っている。また周辺システムとして、加速管ムーバを Ethernet 越しに PC から遠隔操作するための制御システム、およびユーザインタフェースの構築を同時に行っている。

本報告では、開発中の加速管ムーバシステムの概要、また性能評価として加速管のダミーを使用した簡易的な位置決め実験について示し、今後の課題についてまとめる。

## 1. はじめに

加速管の機械的位置・姿勢の $\mu\text{m}$  レベルでのアライメント手法は、加速管を通過する電子ビームのエミッタンスを抑える上で重要であり、今までに種々の手法<sup>[1,2]</sup>が開発されている。特に SLAC FFTB で使用されている 3 本の偏心軸を使用した FFTB magnet remote positioner<sup>[1]</sup>は、主に以下の有用な特徴をもっている。

- ・重力のみで構造物を固定するため、構造物のクランプ等による変形が無い
- ・構造物の取り外し、取り付けが再調整無しで容易に行うことができる
- ・駆動範囲が偏心軸の偏心量に応じたものであり、オーバートラベルの心配が無く安全

よって本開発ではこの機構を参考にし、加速管を直接移動させるさらに簡潔化した機構による加速管ムーバシステムの開発を行っている。

## 2. 設計

図 1 に本加速管ムーバで用いる可動機構の概略を示す。全長が 1.8 m 程度の加速管を対象とし、管のたわみが最小となるベッセルポイント部分に支点とするカラーを位置付ける。このカラー部分を前後それぞれ 2 本の偏心軸に設置した自動調心玉軸受でそれぞれカラーを支える。ここで偏心軸を回転させれば、

偏心量の範囲内で加速管の  $x, y$  方向の位置および  $x, y$  軸周りの姿勢をアジャストすることが出来る。

なお、加速管の  $z$  方向の位置および  $z$  軸周りの姿勢の自由度は、別途機械的に制限する。

以上の機構を用いて、1 本の加速管毎に 2 台の加速管ムーバを取付け、アライメントを行う。

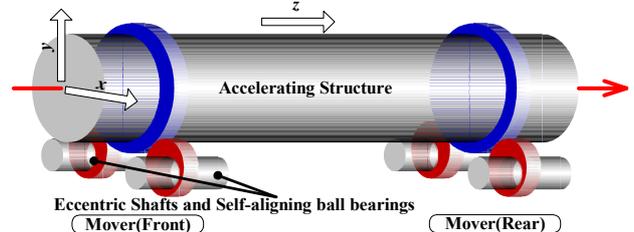


図 1 可動機構概略

また、設計目標は主に以下の項目とした。

- ・位置決め分解能が $\pm 1 \mu\text{m}$  以下
- ・アライメント範囲が $\pm 1$  mm 程度
- ・250 kg 程度の加速管の駆動が可能
- ・ムーバの機械的構造が簡潔
- ・低コスト
- ・メンテナンス性に優れる
- ・PC による Ethernet を介した操作が可能

## 3. システムの概要

本加速管ムーバシステムは、加速管ムーバ本体と、制御システム、ユーザインタフェースから構成される。以下これらの概要について示す。

### 3.1 加速管ムーバ

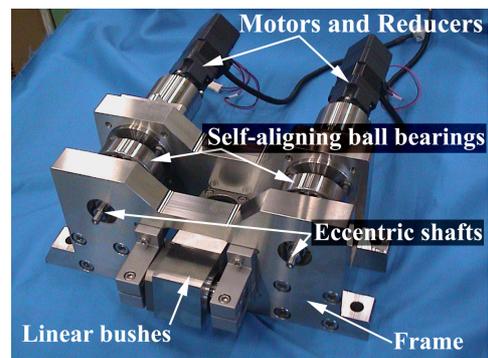


図 2 加速管ムーバ外観

<sup>1</sup>E-mail: yoshimura@ohtsuka.org, URL: <http://www.ohtsuka.org/>

製作した加速管ムーバの外観を図2に示す。

本加速管ムーバは、動力となるステッピングモータ(AS46MA-H100 オリエンタルモータ株式会社製)、加速管を支えかつ駆動させる偏心軸・自動調心玉軸受、z軸方向・周りの自由度を制限するためのリニアブッシュ、そしてこれらを支えるフレームから構成される。構成部品の素材は、特別な理由がある場所以外は全てSUS304の非磁性体を使用した。また、メンテナンス性を考え、偏心軸部周辺をモジュール化し、加速管ムーバのフレームからの容易な着脱を可能とした。

次に本加速管ムーバの機構モデルを図3に示す。図3左図で示す偏心軸・軸受と加速管の関係により、偏心軸の回転 $A, B$ により加速管をアライメントする。図中の寸法は以下となる。

- ・加速管のカラー半径  $R = 100 \text{ mm}$
- ・自動調心玉軸受の半径  $r = 36 \text{ mm}$
- ・偏心軸の偏心量  $lecc = 1 \text{ mm}$
- ・偏心軸間距離/2  $laxis = 96 \text{ mm}$

ここで、位置決め分解能 $\pm 1 \mu\text{m}$ を十分保証する $0.2 \mu\text{m}$ 以下とするには、偏心軸のステップ角が約 $0.0115 \text{ deg/step}$ 以下となるよう減速する必要があることが分かっている。本加速管ムーバではバックラシの無いハーモニックギアを用いステッピングモータの回転を大幅に減速させることによって、先に挙げた高分解能を満し、かつ精度が高い構造としている。

図3左図に示す加速管と偏心軸および軸受の関係は、図3右図に示すダブルクランク機構に一致する。よって、加速管中心の可動領域は図3右図に斜線で示すひし形に近い領域となる。本加速管ムーバの寸法において、このひし形の $x, y$ 方向の移動範囲は約 $\pm 1.41 \text{ mm}$ となっている。

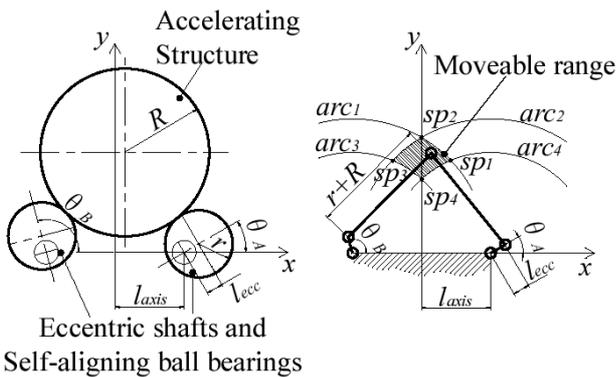


図3 機構モデル

### 3.2 制御システム

加速管ムーバを Ethernet 越しに遠隔操作するために図4に示すシステムを構築した。システムは、モータドライバ、PLC(FA-M3 横河電機株式会社製)、PC等から構成される。PLCはEthernet通信モジュール、4軸モータコントローラ、リレーモジュールから構成される。

PCのユーザインタフェースへ加速管の位置を入力し、図3右図に示す機構モデルのインバースキネマティクスによってモータの回転数を算出する。その

後その値をPLCへ送り、PLCは与えられた指令値分だけモータドライバを介しモータを動作させる。

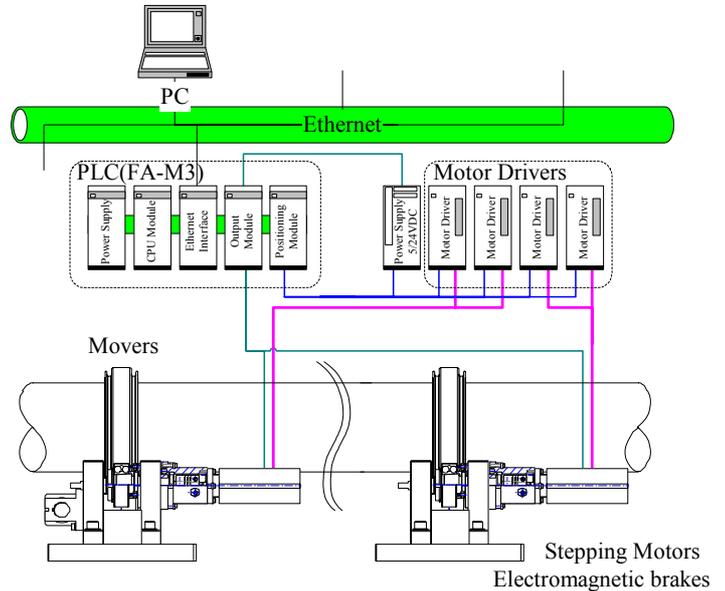


図4 制御システム

また、各モータには電磁ブレーキが搭載されており、モータの非動作時、停電時等はモータの回転をロックする構造となっている。そのため、電磁ブレーキを動作させる命令も同様にPLCへ送り、PLCのリレーモジュールによって電磁ブレーキを動作させる。

### 3.3 ユーザインタフェース

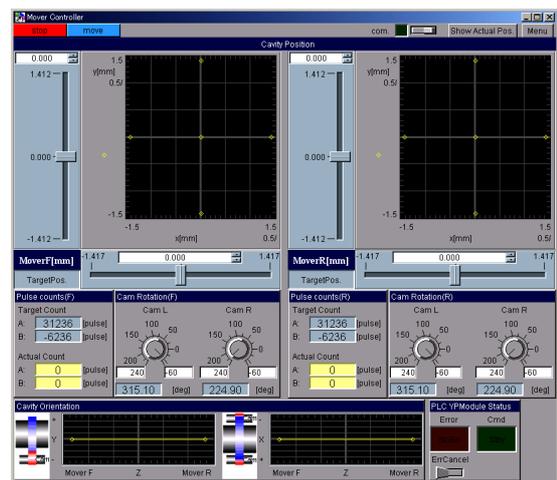


図5 加速管ムーバユーザインタフェース

R&Dを効率よく進めるため、加速管ムーバを操作するユーザインタフェースを構築している。使用環境はビジュアルプログラミング言語であるHP-VEE4.0 for Windows95/NT (Hewlett-Packard社)である。図5に開発中のユーザインタフェース外観を示す。このインタフェースによって、前後の加速管ムーバ上の加速管中心座標をスライダにより入力すれば、“move”ボタンを押下するのみで加速管を移動させることが出来る。

## 4. 位置決め性能簡易評価実験

製作した加速管ムーバの実質分解能を調べるために、加速管ムーバを動作させた時の、加速管を模倣したダミーウエイトの移動量を計測した。以下評価実験について示す。

### 4.1 実験方法

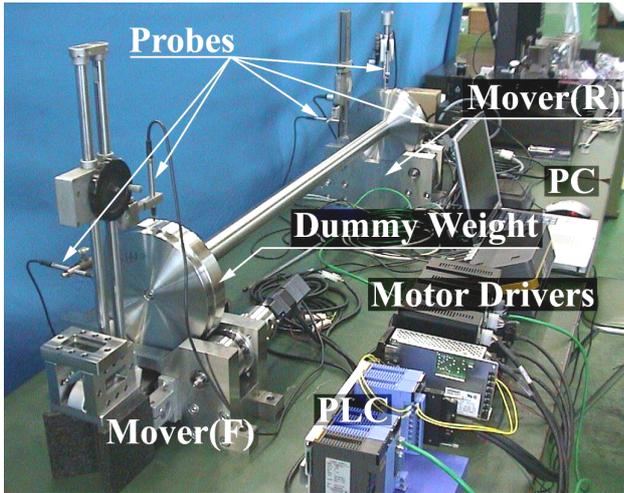


図6 実験環境

図6に実験環境を示す。計測は加速管のカラーを模倣した2枚のディスクを1本のバーで固定したダミーウエイト(質量33kg)を用いて行った。このダミーウエイトの位置検出には静電容量型の測定プローブ(P5 Sylvac社製)を用いた。ディスク(前)の位置  $x, y$  およびディスク(後)の位置  $x, y, z$  の5軸を計測対象とした。

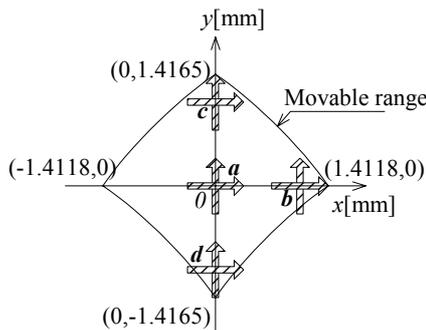


図7 可動範囲内の計測部

加速管の駆動範囲のうち図7左図に示す  $a, b, c, d$  の各計測部において  $0.5 \mu\text{m}$  ステップの移動量の指令を  $5 \mu\text{m}$  にわたって加速管ムーバ(前)のみに与えダミーウエイトの移動量を3回ずつ計測した。

### 4.2 計測結果

各計測部位におけるムーバの位置の指令値  $0.5 \mu\text{m}$  からのずれ、すなわち標準偏差を計測結果として表1に示す。また、同様の場合における誤差の最大値を表2に示す。

表1 標準偏差 (単位  $\mu\text{m}$ )

	計測部a		計測部b		計測部c		計測部d	
	x方向移動	y方向移動	x方向移動	y方向移動	x方向移動	y方向移動	x方向移動	y方向移動
x(front)	0.054	0.071	0.088	0.050	0.058	0.083	0.058	0.054
y(front)	0.054	0.088	0.050	0.071	0.058	0.079	0.033	0.092
x(rear)	0.083	0.050	0.063	0.079	0.038	0.033	0.050	0.042
y(rear)	0.092	0.088	0.063	0.046	0.096	0.104	0.088	0.096
z(rear)	0.054	0.063	0.054	0.075	0.088	0.063	0.042	0.054

表2 誤差の最大値 (単位  $\mu\text{m}$ )

	計測部a		計測部b		計測部c		計測部d	
	x方向移動	y方向移動	x方向移動	y方向移動	x方向移動	y方向移動	x方向移動	y方向移動
x(front)	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$					
y(front)	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$
x(rear)	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$
y(rear)	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$
z(rear)	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$

### 4.3 考察

$0.5 \mu\text{m}$  ステップでの計測では、表1より計測値がほぼ追従した。よって、設計目標である位置決め分解能  $\pm 1 \mu\text{m}$  はこのステップの倍であるということから達成されたと考えられる。また、表2より  $x, y$  方向の位置決め誤差は最大でも  $\pm 0.3 \mu\text{m}$  となった。

ここで発生する位置決め誤差の大部分は、計測システムの系統誤差および偶然誤差が影響していると考えられる。また一方加速管ムーバ側では、モータと軸を接続するカップリング等のねじれ剛性が低いパーツが原因で誤差が発生していると考えられる。よってさらに性能を上げることが必要な場合は、これらの原因を考慮し改良することが可能である。

## 5. おわりに

本稿では、偏心軸によるシンプルな可動機構を用いた加速管ムーバシステムの概要、および加速管ムーバの簡易的な評価実験について述べた。この簡易評価実験により、本加速管ムーバシステムは設計目標を満たしていることを確認した。さらに性能を上げる場合はねじれ剛性の点で改良可能であり、剛性の高いパーツを使用する、または制御上で重力補償をするなどの改良が可能である。

今後、実際の加速管と同等質量のダミーウエイトを用意する等、実際の環境に可能な限り近い状態で、分解能および精度の評価計測を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] Robert E. RULAND, "A Design Library of Magnet Supports -A Proposal-", Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Accelerator Alignment, KEK, August, 1995, URL: [http://www.slac.stanford.edu/grp/met/TOC\\_S/1995conf.htm](http://www.slac.stanford.edu/grp/met/TOC_S/1995conf.htm)
- [2] S. Takeda, et al., "Active Mover Using Air-Spring and MLRB", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Accelerator Alignment, ANL/FNAL, October 13 - 17, 1997, URL: <http://www.aps.anl.gov/conferences/iwaa97/>
- [3] H. Matsumoto, S. Takeda, N. Sato, T. Shintake, H. Kitamura, A. Suzuki, H. Yoshioka, M. Ohtsuka, N. Yoshimura, "Development of Stable Support Stands for Accelerators", Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Particle Accelerator, Conference (EPAC 2002), Paris, 3-7 June, 2002