

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	高応答ミラー制御システムの開発
著者(和文)	清水 大輔, 土方 亘, 進士 忠彦
出典(和文)	関東学生会第55回学生員卒業研究発表講演会論文集, , ,
発行日	2016, 3

# 818 高応答ミラー制御システムの開発

## Development of High Response Mirror Control System

○学 清水 大輔 (東工大), 正 土方 亘 (東工大), ◎正 進士 忠彦 (東工大)

Daisuke SHIMIZU, Wataru HIJIKATA, Tadahiko SHINSHI

Tokyo Institute of Technology, 4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama

Key Words: Data relay satellite, Fast steering mirror, Electromagnetic actuator

### 1. 緒言

現在, 人工衛星と地上局との通信を向上させるため, データ中継衛星<sup>1)</sup>が用いられている. 人工衛星が地上局に対し影になる位置に移動した際, データ中継衛星が通信の仲介を行うことで, データ伝送の即時性や大容量化を実現している.

将来, 通信速度のさらなる向上のため通信を電波からレーザー光方式に変更する計画<sup>2)</sup>があり, 人工衛星自身の振動や大気の揺らぎによる光の指向軸ずれ<sup>3)</sup>を補正するための反射ミラーの高精度・高応答制御や, 経年劣化によるミラーの焦点ずれの調整機構が重要となっている. また, 同様なミラー制御システムは, 太陽観測衛星<sup>4)</sup>にも求められている.

本研究では,  $\phi 80$  mm のミラーに対して, 2軸の傾き方向に, 1 kHz の応答性と広い位置決め範囲を有し, さらに, 焦点ずれ調整のための並進駆動も可能とする3軸ミラー制御システムの実現を最終目的とする. 本報では, 1 kHz の応答性と必要なストロークを有するボイスコイルモータの提案と試作, 性能評価を実施したので報告する.

### 2. ボイスコイルモータの要求性能

ミラーの傾き制御を1 kHzの応答性で実現させるアクチュエータに必要な駆動力を概算する. ミラーは円板であり, 直径 $D=80$  mm, 高さ $h=10$  mm, 質量 $M=0.3$  kgと仮定する. 図1のように, ミラー下部には, 4つの直進型ボイスコイルモータ(VCM)を配置し, 2軸方向の傾き, 1軸の並進駆動の実現を目指す. コイルの冷却のため, コイルを固定部に配置可能なムービングマグネット方式を採用する. ミラーの傾き補正のために, 1 kHz, 振幅 $10 \mu\text{rad}$ で正弦波状にミラーを駆動させるトルク $T$ は, 駆動部のX軸周りの慣性モーメント $I_x$ とすると式(1)となる.

$$T = I_x |\ddot{\theta}| = 0.048 \text{ [N m]} \quad (1)$$

ここで,

$$I_x = 1.2 \times 10^{-4} \text{ [kg m}^2\text{]}$$

VCMをミラーの両端の一つずつ配置すると, 必要な駆動力 $F$ は式(2)となる.

$$F = \frac{T}{2 \left(\frac{D}{2}\right)} = 0.60 \text{ [N]} \quad (2)$$

以上より, VCM単体に必要な駆動力は, 0.6 N程度である.

なお, 実際にはVCMの可動部質量や, 駆動部を支持する案内機構の影響を考え, 必要な駆動力を1 N以上とする. また, VCMに必要なストロークは, ミラーの $\pm 1^\circ$ の回転範囲から,  $\pm 0.7$  mm程度である. さらに, 焦点ずれ調整のための並進駆動は $\pm 0.5$  mm程度要求されているので, 合計で $\pm 1.2$  mm程度のストロークが必要である.

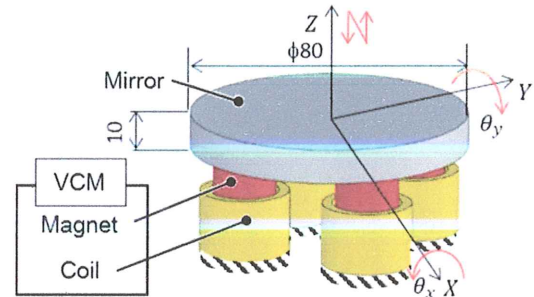


Fig.1 Schematic view of proposed mirror actuator

### 3. VCMの設計

$\phi 80$  mmのミラー下部に配置可能な1 Nの駆動力,  $\pm 1.2$  mmのストロークを有するVCMを設計する. 従来開発された基本的なVCM(以下モデル1)を図2(a)に示す. 1個の空芯コイルと, 2つのネオジウム磁石リング, 電磁コアリングで構成されている.

コイルに供給する電流は, 発熱の影響を考慮し, コイルの単位断面積( $1 \text{ mm}^2$ )あたり最大10 Aとした. 磁場解析ソフト(Maxwell 3D ver.15, Ansys)を用いて静磁場解析を行った結果を図3に示す. モデル1では, 変位が大きい場合, 1 Nの駆動力を達成できない. そこで, モデル1の磁石中心部の磁束を有効活用するため, コイルを磁石内にも配置した図2(b)に示すモデル2を提案する. さらに, 内側コイルの中心部の磁束を増加するための円柱ネオジウム磁石と, 磁石端部の磁気抵抗を低下させるための電磁コアを新たに設けたモデル3を図2(c)に示す. 図3より, モデル2と3では1.2 mmの変位内で, 1 N以上の駆動力を達成している.

表1に, 想定するミラーの下に各アクチュエータ駆動部を4つずつ配置した際の, 可動部全体のX軸周りの慣性モーメント, 個々のVCMで周波数1 kHz, 振幅 $10 \mu\text{rad}$ で駆動するための力( $F_1$ ), 磁場解析で求めたストロークが1.2 mmのときの駆動力( $F_2$ ), ならびに設計の裕度( $F_2/F_1$ )を示す. なお, 慣性モーメントはCADソフト(Solidworks 2013, Dassault Systèmes)より求めた. モデル変更に伴う可動部の慣性モーメントの増加に伴い, 必要な駆動力が増大するが, 発生力の裕度は, モデル3が最大となった. したがって, モデル3を元にVCMの試作を行う.

### 4. VCMの試作と駆動力評価

#### 4.1 VCMの試作

図4に試作したボイスコイルモータのコイルと可動部を示す. コイルの線径は $\phi 0.4$  mmであり, 内・外側は共に83巻である. 2つのコイルは逆回りの方向に電流が流れるように直列で接続されている. また, ネオジウム磁石と電磁コアの組立には, エポキシ系の接着剤を使用した.



## 4.2 駆動力の測定結果

図5のように、引張両用ロードセル(LU-5KSB34D, 株式会社共和電業)にVCMの可動部を固定し、コイル側を微動台で移動することで、軸方向(Z方向)の変位に対する発生力を測定した。実験では、想定する最大電流の約半分の1A(5.40 A/mm<sup>2</sup>)を与えた。実験結果と解析結果を図6に示す。軸方向の変位が小さいときは、解析結果とほぼ等しい発生力を示したが、変位が大きくなるにつれて、差が拡大した。これは、VCMの組み立て誤差の影響と考えられる。コアの飽和が無視できれば、ボイスコイルモータの電磁力はコイルに流れる電流値に比例するため、コイルの単位断面積(1 mm<sup>2</sup>)あたり最大10 Aの電流を流すことで、1.2 mmの必要なストロークの範囲内で、2 N近い駆動力を発生させることが可能であると予想される。

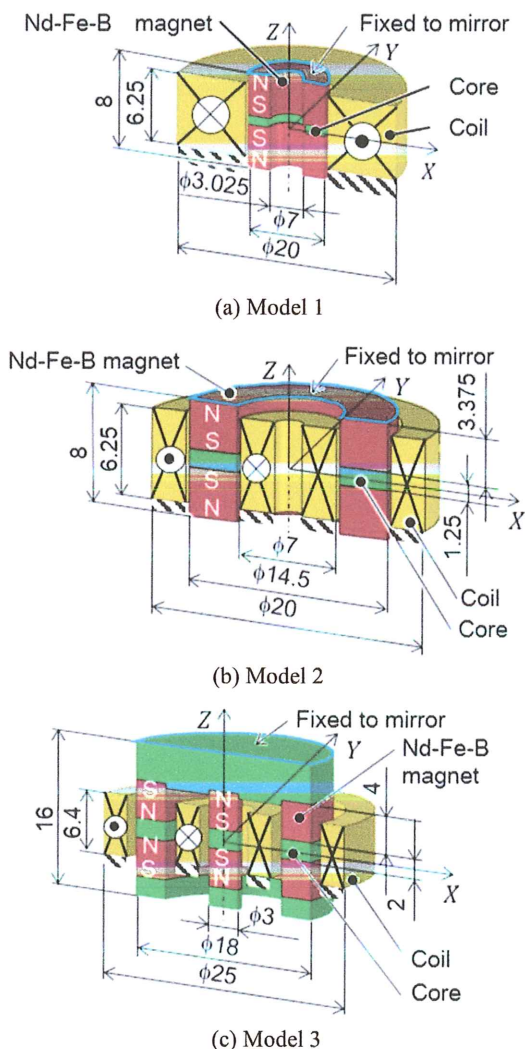


Fig.2 Proposed voice coil motors (Cross-sectional view)

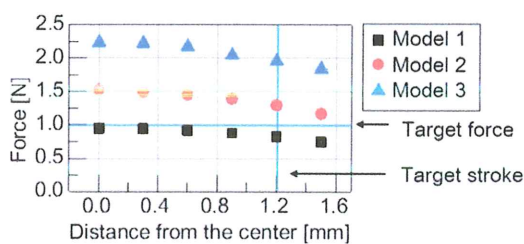


Fig.3 Simulated forces

## 5. 結言

本報では、1 kHzの駆動に必要な発生力とストロークを達成可能なVCMの設計、試作、静的な駆動力の測定を行った。その結果、±1.2 mmの必要なストロークの範囲内で、2 N近い駆動力の発生が見込まれた。今後は、試作したVCMをミラー下部に2つ配置し、1軸の傾き制御実験を行うことで、渦電流などの影響が少なく1 kHzの応答が達成可能か、確認する予定である。

## 参考文献

- 1) 篠原幸一, D R T S「こだま」の実験運用成果, 電気情報通信学会技術報告, SANE2008-13, (2008) pp.1-6.
- 2) 荒木智宏ほか, 光データ中継システムの検討, 電気情報通信学会技術報告, SANE2014-37, (2014) pp.79-83.
- 3) Mario Toyohama et al., In-orbit measurements of spacecraft micro vibrations for satellite laser communication links, Optical Engineering, 49, 8, (2010)pp.1-10.
- 4) 吉田憲正ほか, 人工衛星の擾乱管理技術(太陽観測衛星「ひので」の超高指向安定度実現に貢献したキー技術), 日本機械学会第17回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, (2009) pp.35-38.

Table 1 Comparison of VCM models

	Moment of inertia [kg m <sup>2</sup> ]	Target force (F <sub>t</sub> ) [N]	Simulated force (F <sub>s</sub> ) [N]	F <sub>s</sub> / F <sub>t</sub>
Model 1	6.1×10 <sup>-5</sup>	0.30	0.82	2.7
Model 2	7.0×10 <sup>-5</sup>	0.35	1.29	3.6
Model 3	9.9×10 <sup>-5</sup>	0.50	1.95	3.9

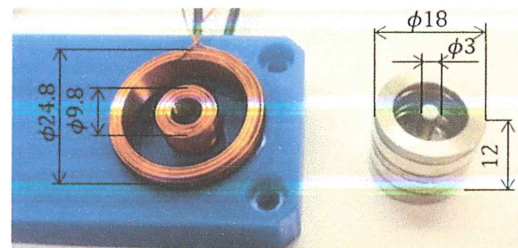


Fig.4 Fabricated VCM(Model 3)

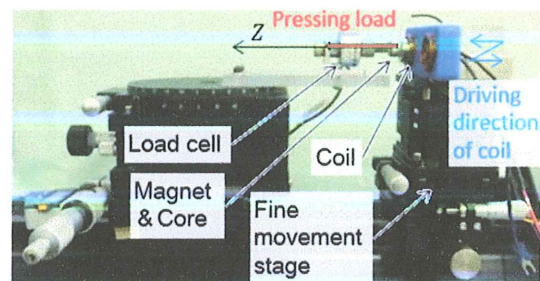


Fig.5 Force measurement setup

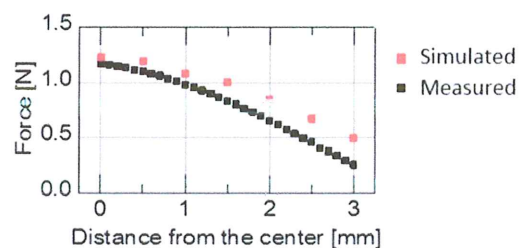


Fig.6 Simulated and measured forces of Model 3