

中性大気密度計測用 6 自由度加速度計の制御結果 及び較正方法について

○大里優一郎（東京都市大学），新谷昌人（東京大学），東尾奈々（宇宙航空研究開発機構），
渡邊力夫（東京都市大学）

Control and calibration of the 6-DOF accelerometer for neutral atmospheric density measurement
Yuichiro Osato (Tokyo city university), Akito Araya (The university of Tokyo), Nana Higashio (JAXA),
and Rikio Watanabe (Tokyo city university)

Key Words: Neutral atmospheric density, Accelerometer, 6-DOF control, Calibration

Abstract

To estimate neutral atmospheric density in the super low earth orbit by measuring drag of a spacecraft, a highly sensitive and wide-range accelerometer is required. Thus a new type of the accelerometer which consists of 6 sets of contactless optical displacement sensors and magnetic actuators is proposed. The breadboard model of the accelerometer achieved 6-DOF control with detectable acceleration of $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}^2$ and the measurement accuracy improved by the proposed calibration method for the magnetic actuators.

1. 目的および背景

地球を周回する衛星は、重力以外の外乱の 1 つとして大気抵抗による影響を受けている。大気抵抗の原因は大気密度であり高度が下がるにつれて密度が大きくなる。大気密度はリモートセンシングや大気抵抗の計測によって把握することができる。中性大気密度を把握する手段として計測データを基にした経験モデルが多く用いられている。経験モデルには MSIS¹⁾などがあるが、計測データの不足している低高度ではモデルの精度に不確かさが多い。一方で、低高度での大気密度の計測は、SETA²⁾や CHAMP³⁾などが行った。CHAMP に搭載された加速度計 STAR は静電容量の変化によって変位を検出し、静電アクチュエータで制御をかける仕組みとなっている。CHAMP を用いて高度 450 km 以下で衛星が周回し計測した結果は近年公開されつつある。

現在、低高度での衛星運用、デブリの軌道予測の必要性が増してきており正確な中性大気密度の計測が求められている。特に計測データが不足している高度 200 km 以下の超低高度での中性大気密度の計測を行うことで大気密度モデルとの比較が可能になり、モデルが改善し、衛星やデブリの軌道予測向上につながると期待されている。しかし、CHAMP などの加速度計の制御力として用いられている静電アクチュエータは制御力が弱く、高度 200 km 以下の超低高度

での加速度計測はできない。超低高度での加速度を計測するためには、大きな大気抵抗に対応するより強い制御力が必要である。そこで、本研究では現在技術的に確立している地震計の原理を基にし、従来計測された高度 400 km 付近から大気密度のデータが不足している超低高度までの広い範囲での計測ができる加速度計の開発を目標とする。新たな加速度計⁴⁾には、我々が提案している高分解能の非接触変位検出が行える光センサと強い制御力を持つ磁気アクチュエータを用いる。試験モデルを製作し、目標仕様の最大加速度及び 6 自由度での検出が可能であることを実証する。

本加速度計の目標とする仕様を表 1 に示す。6 自由度検出は衛星の剛体運動の全自由度に対応しており、最大加速度は目標とする最低高度 (120km) から求めたものである。分解能は、CHAMP など従来計測されている高度 400 km 付近での大気密度変動による 10^{-7}m/s^2 オーダーの加速度について $\pm 10\%$ の精度で検出するためである。構成要素の 1 つである磁気アクチュエータのカップリング定数は加速度の検出精度を決めるが、制御中に正確な値を求めることが困難であり、誤差の要因として大きな割合を占めていた。そこでカップリング定数を較正する手法について考案した。

表 1 目標とする加速度計の仕様

Detection	6DOF
Measurement altitude	120-400km
Maximum acceleration	$1 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$
Resolution	$1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$
Size	100mm × 100mm × 200mm

2. 計測原理

2.1 大気密度⁴⁾

大気密度は、衛星の質量 m ，大気抵抗による加速度 a ，大気密度 ρ ，速度 v ，表面積 A ，無次元数の抗力係数 C_D を用いて (1)式で表すことができる。 a を除く右辺は、衛星の設計や軌道情報によって定まるため、加速度の計測によって大気密度が求められる。

$$\rho = \frac{2m}{v^2 AC_D} a \tag{1}$$

2.2 加速度の計測方法⁴⁾

図 1 に示す質量 m の振り子が吊り下げ点の変位 y によって x 変位し力 f_e が加えられたときの関係は減衰率 γ を用いて以下のように表される⁵⁾。

$$\ddot{x} + 2\gamma(\dot{x} - \dot{y}) + \frac{g}{l}(x - y) = \frac{f_e}{m} \tag{2}$$

吊り下げ点と振り子の変位差を d とおいて周波数領域で考えると(3)式で表され、ここで伝達関数 $H(\omega)$ は(4)式である。

$$H(\omega) \left(-\omega^2 y(\omega) - \frac{f_e(\omega)}{m} \right) = d(\omega) \tag{3}$$

$$H(\omega) = \frac{1}{-\omega^2 + j\omega \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \tag{4}$$

変位差を 0 に近づけるためにフィードバック回路(伝達関数 $F(\omega)$)を加えると(5)式になり、制御力から加速度が求められる。

$$\frac{f_e}{m} = \frac{H(\omega)F(\omega)}{1 + H(\omega)F(\omega)} (-\omega^2 y(\omega)) \tag{5}$$

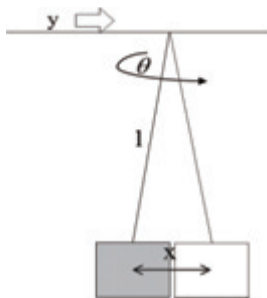


図 1 加速度計の原理

2.3 6 自由度加速度計の検出器の構成、配置

本加速度計は人工衛星への搭載を目的とし小型化を実施するため、1 ユニット内で 6 自由度同時観測できる装置を前提とした。そのため 1 つの参照マスから全ての自由度の加速度を計測する方法を採用した。各自由度の 1 軸加速度計を複数組み合わせる方法では検出する加速度が極めて小さいため各軸のマスを 1 自由度のみ弱く束縛することが困難であるためである。試験モデルでは z 軸方向の復元力を弱くするために、振り子をバネ係数の小さい長いバネで吊るした。また、コイル及びエッジの取り付けによる振り子の偏りをなくし重心で吊るすために x, y, z 各軸 (yz, zx, xy 各面) に 2 つずつ配置する変位センサとアクチュエータを重心対称に配置した。この配置により各軸の並進成分及び対応する回転軸の計測が他の軸に影響を及ぼすことなく検出、制御ができる。変位センサの配置を図 2 に示す。

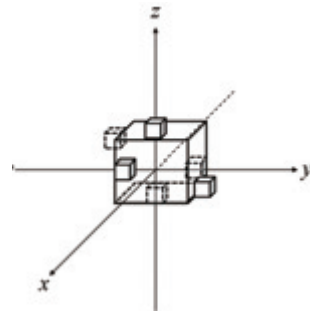


図 2 6 自由度変位センサの配置図

3. 試験モデルによる実験結果

3.1 制御試験結果

制御を掛ける前後の変位センサの時間履歴を図 3 に示す。制御を掛けると変位が減少していき 0 mm に収束している。この結果から 6 自由度制御ができ、6 自由度で加速度計測が可能であること示された。

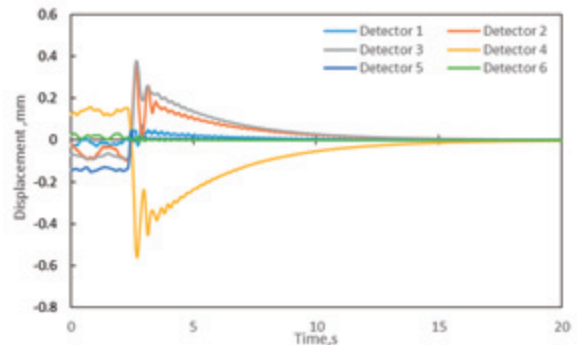


図 3 変位センサの制御履歴

3.2 加速度計測のための理論式と実験式の導出

振り子に図1に示す変位 y 及び回転 θ を与えて並進加速度及びトルクを求めるためにパネ上部にマイクロメータと回転ステージを取り付けた試験モデルを製作した。加えられた擬似加速度及びトルクは振り子のワイヤの長さ l と重力加速度 g 、変位 y 、ワイヤのねじれ剛性率 κ 、回転角 θ を用いて以下のように表される。

$$\ddot{x}_{the} = \frac{g}{l} y \quad (8)$$

$$T_{the} = \kappa \theta \quad (9)$$

6自由度加速度計は2自由度加速度計を各軸平面に拡張したものである。従って各軸平面での2自由度での加速度及びトルクを求めることで6自由度の値を求めることができる。図4に6自由度制御のうちの2自由度部分の構成を示す。各2自由度での加速度及びトルクへの換算式は、計測電圧 V 、磁気アクチュエータのカップリング定数 α 、振り子の質量 m 、コイルの間隔 $2r$ 、電圧変換に用いる抵抗 R で表される。添え字は各変位センサに対応するカップリング定数、コイルドライバの抵抗及び電圧を示す。

$$\ddot{x}_{exp,x} = \frac{1}{m} \left(\frac{\alpha_1 V_1}{R_1} - \frac{\alpha_2 V_2}{R_2} \right) \quad (10)$$

$$T_{exp,x} = \left(\frac{\alpha_1 V_1}{R_1} + \frac{\alpha_2 V_2}{R_2} \right) r \quad (11)$$

$$\ddot{x}_{exp,y} = \frac{1}{m} \left(\frac{\alpha_3 V_3}{R_3} - \frac{\alpha_4 V_4}{R_4} \right) \quad (12)$$

$$T_{exp,y} = \left(\frac{\alpha_3 V_3}{R_3} + \frac{\alpha_4 V_4}{R_4} \right) r \quad (13)$$

$$\ddot{x}_{exp,z} = \frac{1}{m} \left(\frac{\alpha_5 V_5}{R_5} - \frac{\alpha_6 V_6}{R_6} \right) \quad (14)$$

$$T_{exp,z} = \left(\frac{\alpha_5 V_5}{R_5} + \frac{\alpha_6 V_6}{R_6} \right) r \quad (15)$$

カップリング定数は図5に示す装置を用いてコイル磁石間の距離 d を変えながらコイルに電流を流し磁石に与える力を電子天秤で計測した。カップリング定数 α はコイルに電流 I を流した時に磁石にかかる力 F から(16)式で求めることができる。またオームの法則より抵抗 R と入力電圧 V_{in} からも求められる。添え字は各コイルドライバの抵抗及び電圧、与えた力を示し $i=1,2$ が xy 面、 $i=3,4$ が yz 面、 $i=5,6$ が zx 面に対応する。コイル磁石距離間とカップリング定

数 α_2 の関係結果を図6に示す。カップリング定数はコイル磁石間の距離に依存していることがわかった。

$$\alpha_i = \frac{F_i}{I_i} = \frac{F_i R_i}{V_{in_i}} \quad (16)$$

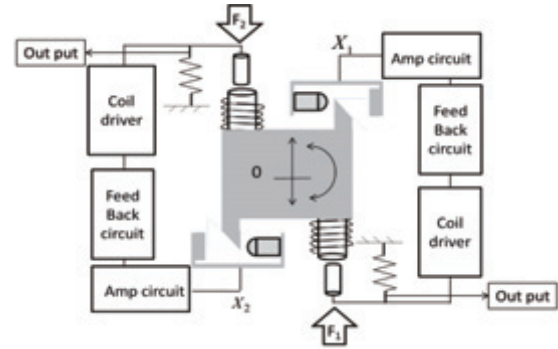


図4 2自由度加速度計の構成

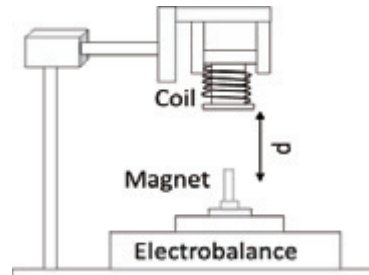


図5 カップリング定数計測装置

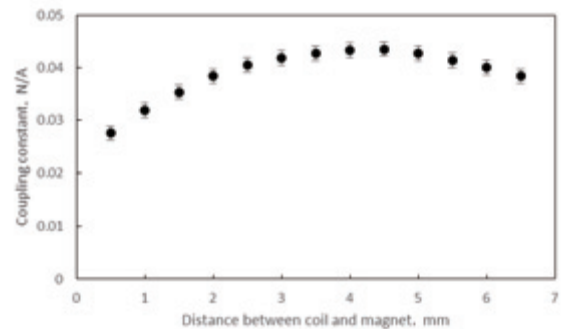


図6 カップリング定数 α_2 の計測結果

3.4 擬似加速度による最大加速度計測

6自由度制御下において並進方向に擬似加速度を段階的に与えた結果を図7に示す。理論値は(8)式、実験値は(10)式を用いている。試験モデルでは、コイル磁石間の調節を手動で設定し正確な距離が不明なためカップリング定数が図6の測定結果の最大値を用いていた。結果、実験値が理論値より15%程大きな値を示しているが目標加速度 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}^2$ が計測可能である結果が得られた。誤差の主要因は正確に計測できていないカップリング定数であると考えられるため正確な計測を考える必要がある。

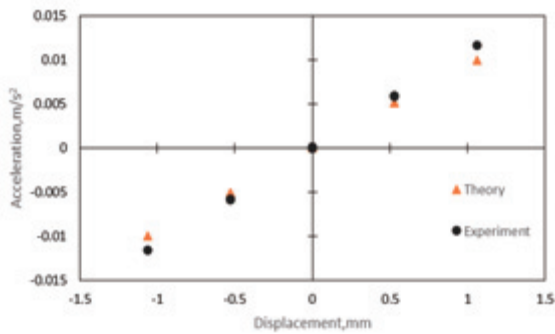


図7 加速度計測結果

4. カップリング定数の較正

6自由度加速度計は3組(xy面, yz面, zx面)の2自由度制御によって構成されている。従って2自由度制御状態でカップリング定数の計測することで較正ができる。そこでコイルへの入力電流に発振器で信号を加え、振り子の周波数応答からカップリング定数を求める方法について考案し検討を行った。以下3組の内の1つであるxy面の制御について扱う。図4に示す2自由度制御下において磁気アクチュエータが振り子に与える力 F_1, F_2 を受けたときに各変位センサが検出する変位を X_1, X_2 、伝達関数を $H_{i,j}(\omega)$ ($i=1,2; j=1,2$)と置いたとき(17), (18)式で表される。伝達関数の添え字は、アクチュエータの力 F_1 を受けて変位 X_1 に出力する場合を H_{11} 、 F_2 をうけて X_1 に出力する場合 H_{12} 、 F_1 をうけて X_2 に出力する場合を H_{21} 、 F_2 をうけて X_2 に出力する場合を H_{22} とする。図9に(17)式での入出力と伝達関数の対応関係を示す。

$$X_1 = H_{11}F_1 + H_{12}F_2 \tag{17}$$

$$X_2 = H_{21}F_1 + H_{22}F_2 \tag{18}$$

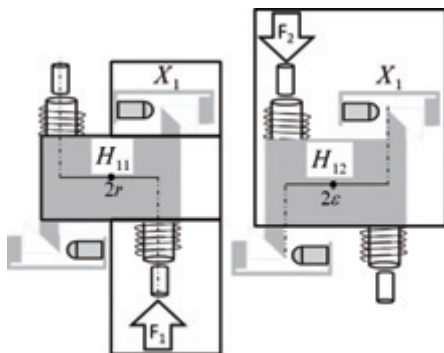


図9 入出力と伝達関数の関係

このときの運動は並進と回転を含むため、伝達関数は並進運動の固有角周波数を ω_{0l} 、Q値を Q_l 、回転運動の固有角周波数を ω_{0r} 、Q値 Q_r 、図9に示すコイルの間隔を $2r$ 、エッジの間隔を 2ε としたとき以下のように表される。

$$H_{11}(\omega) = H_{22}(\omega) = \left\{ \frac{1}{m} \left(\frac{1}{-\omega^2 + j\omega \frac{\omega_{0l}}{Q_l} + \omega_{0l}^2} \right) + \frac{r\varepsilon}{I} \left(\frac{1}{-\omega^2 + j\omega \frac{\omega_{0r}}{Q_r} + \omega_{0r}^2} \right) \right\} \tag{19}$$

$$H_{12}(\omega) = H_{21}(\omega) = \left\{ \frac{1}{m} \left(\frac{-1}{-\omega^2 + j\omega \frac{\omega_{0l}}{Q_l} + \omega_{0l}^2} \right) + \frac{r\varepsilon}{I} \left(\frac{1}{-\omega^2 + j\omega \frac{\omega_{0r}}{Q_r} + \omega_{0r}^2} \right) \right\} \tag{20}$$

アクチュエータに発振器で信号 F_1 を加える。一方のアクチュエータでは、常に X_2 の変位が0になるように制御信号が F_2 として加えられるため制御回路の伝達関数を G とすると(17)式は以下のような。

$$X_1 = H_{11}F_1 - H_{12} \frac{H_{21}G}{1 + H_{22}G} F_1 \tag{21}$$

このとき変位は変換係数 β_i と出力電圧 V_{outi} ($i=1,2$)を用いて(22)式で表すことができるため(16)式に代入すること(23)式のように F_1 のカップリング定数 α_1 が求められる。また同様に F_2 に信号を加えた場合に求められるカップリング定数 α_2 は(24)式となる。(22)式の添え字は(16)式と同様の対応関係である。

$$X_i = \beta_i V_{outi} \quad (i=1,2) \tag{22}$$

$$\alpha_1 = \frac{1 + H_{22}G}{H_{11} + (H_{11}H_{22} - H_{12}H_{21})G} \frac{\beta_1 V_{out1} R_1}{V_{in1}} \tag{23}$$

$$\alpha_2 = \frac{1 + H_{11}G}{H_{22} + (H_{11}H_{22} - H_{12}H_{21})G} \frac{\beta_2 V_{out2} R_2}{V_{in2}} \tag{24}$$

(10)式のカップリング定数に(23), (24)式を用いて実験結果を較正し理論値及び実験値と比較したものを図10に示す。理論値及び実験値は図7と同じである。これにより最大値と仮定して置いていたカップリング定数を較正したものに置き替えた結果加速度の理論値からのずれが15%から2%になった。この結果から同様の手法をyz面とzx面にも用いることで全てのカップリング定数の較正が可能であることが分かった。

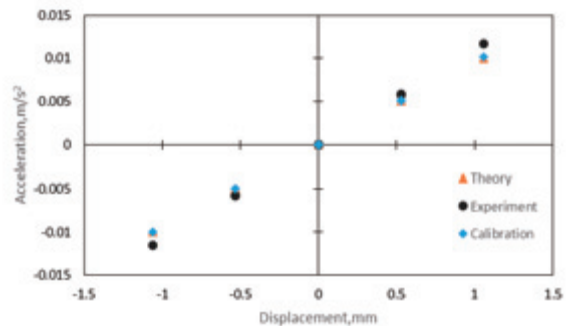


図10 較正後の加速度計測結果

5. 結論

超低高度での大気密度を計測するために、光による変位検出と磁気アクチュエータによる制御を用いた加速度計の要素技術研究を行った。実験結果から6自由度での制御が掛かり加速度の計測が可能であることを示せた。また、特定方向の加速度計測を行い目標とする加速度 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}^2$ を計測できた。考案したカップリング定数の較正により6自由度制御を構成する3組の2自由度制御の1つである xy 面で2つのカップリング係数を較正し加速度計測の正確さを高めることができた。この手法をそれぞれの2自由度制御にも用いることで全てのカップリング定数の較正が可能である。

参考文献

- 1) A.E. Hedin *et al.*, “A Global Thermospheric Model Based on Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Data MSIS 1. N2 Density and Temperature,” *Journal of Geophysical Research*, 82, 16, 2139-2147, 1977.
- 2) F.A. Msrcos *et al.*, “Thermospheric winds from satellite electrostatics triaxial accelerometer system” *Journal of Geophysical Research*, 90, A7, 6543-6552, 1985.
- 3) S. Bruinsma *et al.*, “Atmospheric densities derived from CHAMP/STAR accelerometer observations,” *Planetary and Space Science*, 52, 297-312, 2004.
- 4) 大里優一郎 他, “中性大気密度計測用加速度計に関する6自由度制御の研究,” 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1L01, 2015.
- 5) A. Araya *et al.*, “Highly sensitive wideband seismometer using a laser interferometer,” *Review of Scientific Instruments*, 64, 1337-1341, 1993.