

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

○大里優一郎(都市大), 新谷昌人(東大), 東尾奈々(JAXA), 渡邊力夫(都市大)

Study on the six- DOF control for a neutral atmospheric density measurement accelerometer

Yuichiro Osato (Tokyo city university), Akito Araya (The university of Tokyo), Nana Higashio (JAXA), and Rikio Watanabe (Tokyo city university)

A low-orbit spacecraft receives large air drag because neutral atmosphere gets denser in lower earth orbit. A thermosphere model NRL-MSIS00 was established based on measurement data of neutral atmospheric density and it is currently used for spacecraft drag estimation. However, the model is unable to be applied to the super low Earth orbit because measurement of neutral atmospheric density at this altitude is difficult due to high density of air. In order to obtain neutral atmospheric density, an accelerometer is used to detect deceleration of spacecraft due to air drag. In the case of super low altitude air density estimation, highly sensitive and wide-range accelerometers that can detect 10^{-8} ~ 10^{-2} m/s² is required. Thus a new type of accelerometers which consists of contactless optical displacement sensors and a magnetic actuators that has enough controlling force is proposed. This research investigates of elemental technology of the new type accelerometer. An experimental model of the new type of accelerometer demonstrated detection of two-DOF acceleration. A six-DOF accelerometer extended from the two-DOF will be constructed.

Key words: Space, Neutral atmospheric density, Accelerometer, Six-DOF control

1 研究背景

地球を周回する衛星は、高度が下がるにつれて非重力外乱の1つである中性大気抵抗による影響を受け衛星の速度が減少し高度が下がる。大気抵抗は中性密度を計測することによって求めることができる。計測データを基にした経験モデルのNRL-MSIS00^[1]があるが低高度でのモデルは計測がデータが不足しておりモデルの精度が悪いと言われている。低高度での大気密度の計測はESAなどで行われておりCHAMP衛星^[2]は高度450km付近の計測を行った。CHAMP衛星に搭載された加速度計は静電容量の変化によって変位を6自由度で検出し、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。より低高度での計測を行うためには、大きい大気抵抗を検出する必要があり強い制御力が必要であるが、CHAMP衛星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、最大で並進方向 10^{-4} m/s²、回転方向 10^{-3} rad/s²までしか計測できず、低高度の加速度の計測が行えない。

現在、低高度での衛星の運用及び再突入、デブリの観測が増え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200km以下の超低高度での中性大気密度の計測をすることで大気密度モデルの改善がされ、衛星の高度補償や再突入時の軌道計算のデータの向上につながると期待されている。超低高度での計測を行うための加速度計には最大加速度 10^2 m/s²の性能が要求されており、かつ衛星の自由度に対応した6自由度で、高度400kmにおける大気変動(±10%)を検出できるような 10^{-8} m/s²の高分解能、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使用した加速度計^[3]による大気密度計測が提案されている。目標スペックをTable1に示す。

Table1 Accelerometer spec

Altitude	100km-400km
Measurement range	1×10^{-2} m/s ²
Resolution	1×10^{-8} m/s ²
Size	10cm × 10cm × 20cm (Input power supply)
Mass	~5kg
Parameters	6DOF
Power consumption	~20W
Sample rate	1Hz

2 研究目的

光による高分解能の非接触変位検出、磁気アクチュエータによる強い制御を組み合わせた零位法による高精度な加速度検出を衛星の自由度に対応する全ての並進成分と回転成分を含む6自由度に適用する制御に関する研究を行う。

3 計測原理

3.1 大気密度

大気抵抗は中性密度を計測することによって求めることができ衛星の質量 m [kg]、加速度 a [m/s²]、大気密度 ρ [kg/m³]、表面積 A [m²]、速度 v [m/s]、無次元数の抗力係数 C_D を用いて式(1)で表すことができる。

$$ma = \frac{1}{2} \rho v^2 AC_D \quad (1)$$

このうち加速度と大気密度以外は、衛星の設計や軌道計画によって定めることができるパラメータとなっており中性大気密度は、加速度の計測によって求められる。

3.2 加速度

加速度は Fig.1 に示す重さ m [kg] の振り子が外部の変位 y [m] によって振り子が x [m] 変位し力 f_e [N] 発生したときの関係は減衰率 γ を用いて運動方程式から以下のように表される^[4]。

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

外部の変位とおもりの変位の差を d とおいて周波数領域で考えると式(2)になり伝達関数 $H(\omega)$ は式(3)とする。

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

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

変位差 d を 0 にするためにフィードバック制御の伝達関数 $F(\omega)$ を加える。このときの関係をブロック線図で表すと Fig.2 になり加える制御力は以下ようになる。

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

よって制御力を加えることによって外部からの加速度はゲイン $|H(\omega)F(\omega)|$ を大きくとった時に式(7)となり求めることができる。

$$-\omega^2 y(\omega) = \frac{1 + H(\omega)F(\omega)}{H(\omega)F(\omega)} \frac{f_e(\omega)}{m} \quad (6)$$

$$-\omega^2 y(\omega) = \frac{f_e(\omega)}{m} \quad (7)$$

初期位置に戻すときの力を検出する零位法^[5]では振り子が糸による復元力の影響を受けず高精度に加速度の検出を行うことができる。

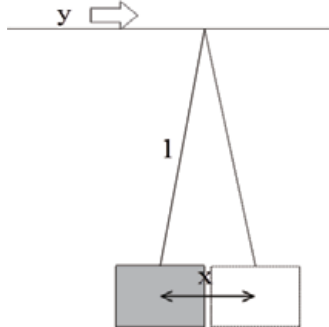


Fig.1 Principle of accelerometer

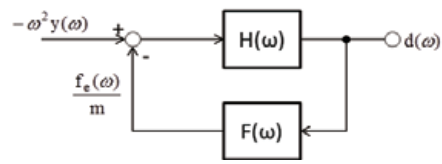


Fig.2 Block diagram

4 6 自由度加速度計の構成

変位の検出器を Fig.3, Fig.4 に示す。LED からの光をビームスプリッターで参照部とおもり先端のナイフエッジ部のフォトダイオードに分割して照射する。ナイフエッジに照射された光は、振り子に動きが生じたときの受光量の変化を受光素子で電圧変化として検出し増幅する。エッジの入っていない一定の光量を受光した電圧との差をとって検出結果として出力する。これにより LED による光量の変化を受けずにエッジの変位を検出できる。出力結果を制御回路に通してコイルドライバによって電流を増幅させコイルに電流を流し磁石との間に磁力を働かせ光の受光量を一定にするように振り子を初期位置に戻す。制御で加えた力を電圧として検出し加速度を計測する。1 自由度の加速度を計測する手法を Fig.5 に示す。同一平面に 2 つ変位検出器を取り付けることによって並進と回転の運動による 2 自由度の加速度を検出でき、他の軸に拡張することで 6 自由度の加速度を検出できる。

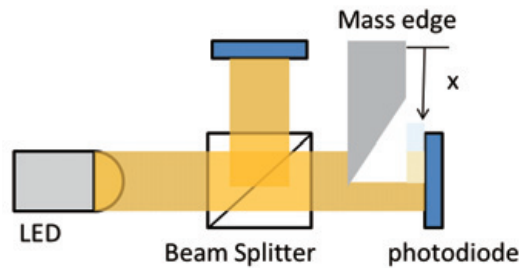


Fig.3 Principle of photo detector

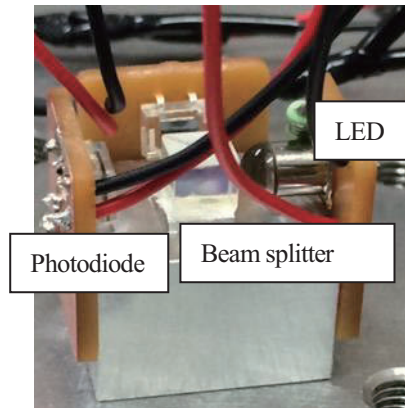


Fig.4 Photo detector

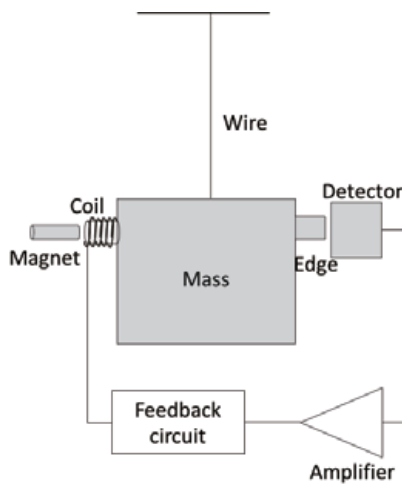


Fig.5 1-DOF accelerometer model

5 実験結果

5.1 伝達関数

1 自由度での構成から振り子の伝達関数を実験的に求めた。実験構成を Fig.6 に示す。伝達関数のモデル式は検出器の電圧と距離の比例定数 α [m/V]、コイル電流と磁力の比例定数 β [N/A] と入出力の電圧出力から以下のように表せる。

$$H(\omega) = \frac{1}{-\omega^2 + j\omega\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} = \frac{md}{F} = \frac{mR\alpha}{\beta} \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (8)$$

入力電圧の周波数を 6.4 [Hz] まで変化させた結果を Fig.7 に示す。伝達関数のモデル式と 1.6[Hz] までほぼ一致した結果が得られた。

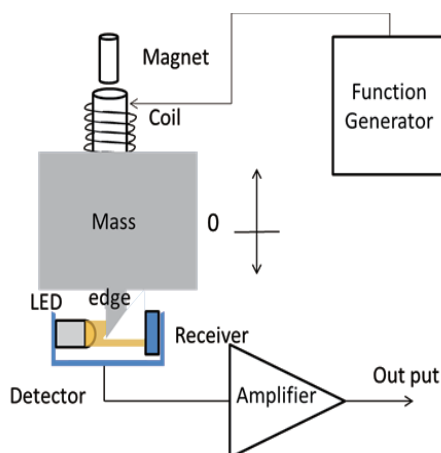


Fig.6 Measurement of the pendulum transfer function

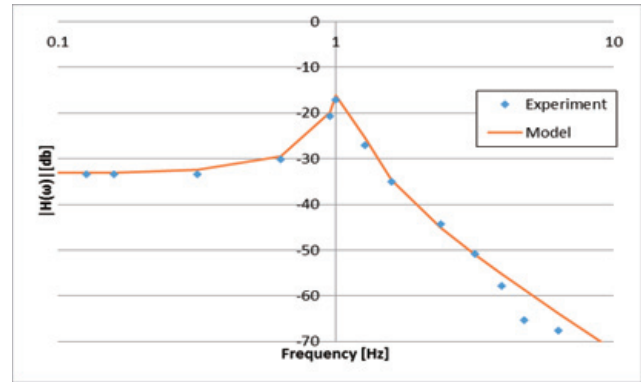


Fig.7 Relation of frequency and transfer function

5.2 フィードバック制御

並進、回転成分の 2 自由度での制御の実験を行うため、制御を二系統とした。実験構成図を Fig.8 に 実験結果を Fig.9 に示す。いずれの変位検出も 0[V] 付近に収束しているので制御が行えていることが分かる

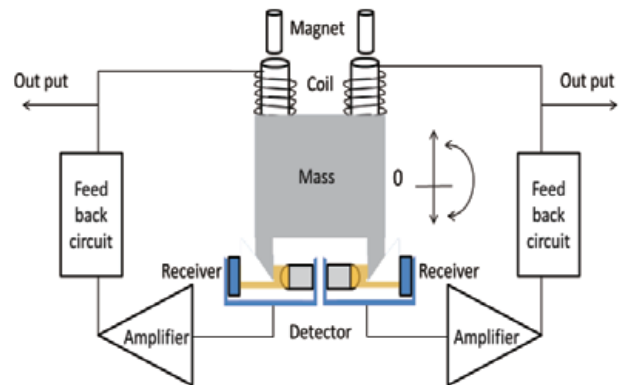


Fig.8 Setup of 2-DOF control experiment

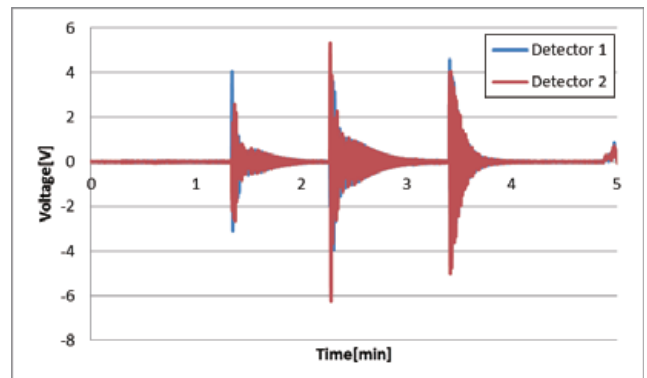


Fig.9 Output of the photo sensors

6 6 自由度加速度計へ拡張するにあたっての課題

2 自由度加速度計から 6 自由度加速度計に拡張するには、他軸に検出器とコイル、磁石、フィードバック回路からなるシステムを取り付けることで 6 自由度加速度計となる。本システムは Fig.4 に示すように、おもりに磁

場による影響を与えないために振り子側にコイルを取り付けている。そのためコイルから伸びる線が振り子を吊るすワイヤー以外の支点となり振り子の動きに影響を与えている。Fig.6 に示す構成でコイルを2つに増やしたときの伝達関数の計測結果である Fig.10 に影響が現れており、構成上ではコイルを増やしても伝達関数は変化しないが、計測値はコイルを1つのときと比べて低周波と共振周波数において値が小さくなっていた。これはコイル線によって新たな減衰力が発生していることを示している。モデル式では、コイル線による減衰力を考慮していないため値に誤差が生じてしまったと考えられる。自由度の拡張により新たな支点ができるためコイル線による減衰力を考慮して伝達関数のモデルを補正する必要がある。

小型化を考慮しながら6自由度に拡張するにあたって検出器の配置も課題として挙げられる。重心と変位検出器間の配置が角加速度の測定値に影響を及ぼすためである。

宇宙環境での計測に対応できるようにするため材料の温度変化による依存性を考慮した選定や打ち上げ時の振動などについても影響を考えていく必要がある。

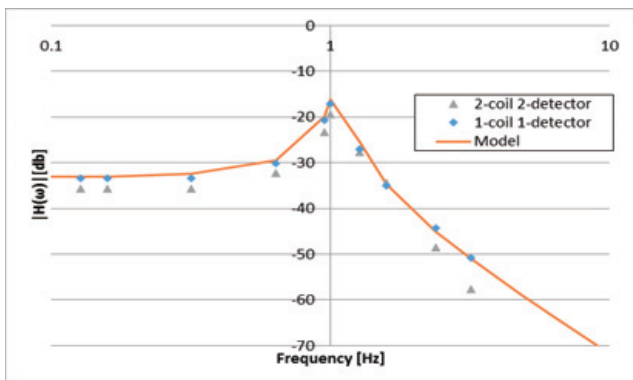


Fig.10 Difference of transfer function for the number of coils

7 結論

従来の静電容量による変位検出と静電アクチュエータによる制御を用いた加速度計では計測できない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る加速度計の要素技術研究を行った。

1 自由度での加速度計の振り子の伝達関数を求めフィードバック回路を導入し2自由度での制御を行い結果から1軸上での並進成分と加速度成分を求めることができた。求められた加速度は既知の力を加えたものと比べて誤差が大きいため精度を向上させるために、加速度計の振り子に掛かる力について検討し直し力学モデルを補正することが求められる。

参考文献

- [1] Alan E. Hedin, "MSIS-86 THEMOSPHERIC

MODEL" JOURNAL OF GEOPHYCAL RESEARCH ,
MAY 1,1987, VOL92 , NO A5 p4649-4662

- [2] 大久保 修平ほか, "衛星搭載型加速度計開発",
精密衛星測位による地球環境監視技術の開発研究成果の
詳細報告
- [3] S. Bruinsma et al, "Atmospheric densities derived from
CHAMP/STAR accelerometer observations", Planetary and
Space Science , 2004, vol.52, PP. 297-312
- [4] A.Araya et al, "Highly sensitive wideband seismometer using a
laser interferometer", Review of Scientific Instruments 64, 1993
- [5] T.Kawasaki, Theory and technology of astronautics,
CHIJINSYOKAN, P125