

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13924

研究課題名(和文) スケール依存性を意識した外乱補償による小型衛星の姿勢制御高精度化

研究課題名(英文) Accurate attitude control in small satellites by disturbance compensation considering scale dependency

研究代表者

稲守 孝哉 (Inamori, Takaya)

名古屋大学・工学研究科・講師

研究者番号：50725249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球周回衛星の搭載磁性体により生じる磁気姿勢トルクについて研究を行った。一般に非対称形状の搭載磁性体は磁気形状異方性によりトルクが発生し姿勢を乱す要因となる。本研究では、まず、単一の磁性体に対する磁性体トルクのモデルを定式化した。次に、実際の衛星のトルク特性を調べるため、複数の磁性体による磁性体トルクの定式化を実施した。これにより回転対称性を持つ配置では、磁性体によるトルクを大幅に低減させることが分かった。最後に有限要素法(FEM)を用いた数値シミュレーションを行い、定式化された磁性体トルクのモデル評価を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により小型になるほど影響を大きく受ける磁気トルクを利用することで、より小型な衛星でも高精度な姿勢変更と維持を達成することができる。これにより小型の衛星で地球観測や理学観測など、高解像度の画像や観測データ取得が必要なミッションを達成できると期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research investigated the magnetic attitude disturbance torque caused by on-board magnetic substances in an Earth orbiting satellite. On-board magnetic substances with an unsymmetrical shape generally cause an attitude disturbance torque due to the magnetic shape anisotropy. To understand satellite attitude dynamics and to achieve precise attitude control, this magnetic torque should be precisely investigated. In this research, first, the model of the magnetic substance torque for a single magnetic substance was formulated. Second, to investigate the torque characteristics in real satellites, the magnetic substance torque caused by multiple magnetic substances was also formulated and investigated. Specifically, in a symmetrical arrangement, the magnetic substance torque can be dramatically decreased. Then, with numerical simulation results using the finite element method (FEM), the formulated model of the magnetic substance torque was evaluated.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：剛体姿勢運動 磁気トルク 人工衛星

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、1 kg - 100 kg の小型衛星において高解像度の画像や観測データ取得といった理学や地球観測を目的とする様々なミッションが検討されている。これらのミッションでは衛星姿勢外乱を低減し望遠鏡などの観測機器を、高精度に指向・安定化させる技術が重要となる。そのため軌道における姿勢外乱の理解が重要となるが、小型衛星では小さな慣性モーメントから影響を受ける外乱が従来の大型衛星と異なり、軌道上でどのような姿勢運動を行うのか正確に理解されていない。

(2) 特に衛星コンポーネントや電子回路から生じる残留磁気モーメントによる磁気姿勢トルクの影響は、小さな慣性モーメントより小型サイズの衛星に顕著であり、重力傾斜トルクや空力トルク、太陽輻射圧トルクよりも大きな影響が生じることがある(Inamori 2011)。

(3) さらに、従来衛星でよく検討されてきた、残留磁気モーメントによる磁気トルク、重力傾斜トルク、空力トルク、太陽輻射圧トルクを考慮しただけでは説明できない姿勢運動が生じることが報告されている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では「衛星スケールにより姿勢ダイナミクス・運動がどのように異なるのか」を解明し、小型になるほど影響を大きく受ける環境力を理解し低減する手法を構築することを目指して研究を進めた。

(2) 本研究では特に非対称形状の磁性体が地球環境磁場環境下においてはたらく姿勢トルク(形状磁気異方性による姿勢トルク)の影響を明らかにすることを目的とした。

(3) さらに導き出した非対称形状の磁性体トルクの特性より、磁性体配置などにより効果的な磁気トルクのキャンセル方法の構築を試みる。

## 3. 研究の方法

本研究では衛星搭載磁性体の形状異方性により生じる磁気トルクを検討する。

(1) 最初に理想的な楕円体形状の磁性体に生じる磁気トルクの考察を行う。さらに任意形状、複数の磁性体が搭載される場合の磁性体トルクの考察を行う。衛星姿勢角や外部磁場強度に対するトルク強度を明らかにし、磁気外乱モデルを構築する。得られたモデルを図1の小型衛星を解析対象として磁気FEMの計算結果と比較して検証する。

(2) 得られた磁気トルクのモデルから衛星姿勢運動を低減する手法を構築し、開発した姿勢軌道運動を模擬するシミュレータにより姿勢運動をシミュレートし衛星スケールにより姿勢運動がどのように異なるのかを検討する。

(3) 得られたモデルから搭載磁性体の配置などにより磁気トルクを効果的にキャンセルする手法を構築する。

## 4. 研究成果

搭載コンポーネントの磁性体において形状磁気異方性により生じる磁性体トルクの強度について検討した。最初に磁気FEMを用いてトルクの大きさを計算し姿勢角や外部磁場強度に対するトルク強度を明らかにし、磁気外乱モデルを構築した。

(1) 楕円体形状の磁性体より生じるトルク強度は地球磁場強度の二乗に比例すること、また地球磁場方向の変化周期の1/2周期で強度変化することを明らかにした。さらに小型衛星の搭載コンポーネントから生じる磁気トルクについて、磁場強度が強い領域においては一般的によく考慮される残留磁気モーメントの外乱トルクよりも大きな姿勢トルクが生じることを明らかにした。

(2) 任意形状の磁性体において磁気飽和を生じない場合、楕円体形状のときと同じくその強度は地球磁場強度の二乗に比例すること、また地球磁場の方向変化周期の1/2周期で強度変化することを明らかにした。

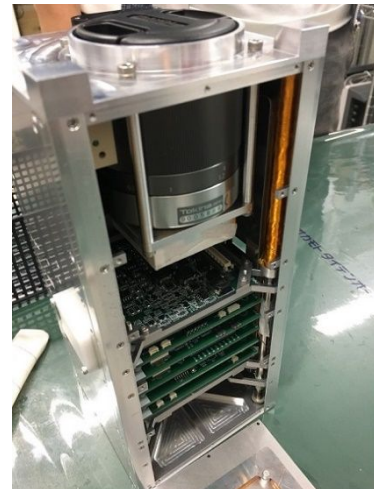


図1 解析対象とした小型衛星

(3)磁性体の配置が  $n$  相回転対称 ( $n>2$ ) である場合、対称軸周りのトルクが生じないことを示した。これにより対称軸が異なる方向に3軸以上持つといかなる方向の磁場に対しても磁気トルクをキャンセルできることを示した。これにより単体磁性体が非対称な形状で磁性体から姿勢トルクを生じる場合でも、正六面体や正四面体を構成するように磁性体を配置すれば磁気トルクを効果的に低減できることを示した。

#### 参考文献

T. Inamori, N. Sako, and S. Nakasuka, "Compensation of time-variable magnetic moments for a precise attitude control in nano- and micro-satellite missions," *Advances in Space Research*, vol. 48, no. 3, pp. 432-440, 2011.

T. Inamori, P. Saisutjarit, N. Sako, Y. Terao, and S. Nakasuka, "Magnetic attitude disturbance caused by asymmetrical magnetic substances in LEO satellites," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 1-12, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Inamori, P. Saisutjarit, N. Sako, Y. Terao, and S. Nakasuka	4. 巻 32-6
2. 論文標題 Magnetic attitude disturbance caused by asymmetrical magnetic substances in LEO satellites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/ (ASCE)AS.1943-5525.0001082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Yamada, T. Inamori
2. 発表標題 Propellantless Close Range Guidance and Docking for Small Satellites using Simple Electromagnetic Devices
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yamada, T. Inamori, Y. Satou
2. 発表標題 A fuel-free and agile attitude maneuver of space membrane structures using electromagnetic force in LEO
3. 学会等名 The 70th International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yamada, T. Inamori, M. Tomooka
2. 発表標題 Propellantless Close Range Rendezvous and Docking Using a Single Electromagnetic Device for Small Spacecraft
3. 学会等名 The 69th International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----