

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420854

研究課題名(和文)球形ホイールシステムによる小型人工衛星の姿勢制御

研究課題名(英文)Attitude Control for a Small Satellite Using Spherical Rotor

研究代表者

内山 賢治 (UCHIYAMA, Kenji)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：90281691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、球状ホイールによる人工衛星の姿勢を制御する手法を提案した。計画当初において、圧電素子による球状ホイールの駆動を行い、一定の成果を得ることができたが、回転方向の制御性能や消費電力など、新たな問題が生じた。そこで、球状ホイールの駆動方法を見直し、回転速度や回転方向の制御性が向上したほか、消費電力も改善することができた。提案した姿勢制御装置を衛星モデルに取り付け、浮上盤を用いた検証実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：A reaction wheel system has been one of the effective method for a satellite attitude control. However, the attitude control system generally becomes huge and heavy. Novel attitude control system using a spherical rotor is proposed for an artificial satellite. Although the system has ability to miniaturize an attitude control system, a driving mechanism for a spherical rotor tends to be huge due to difficulty of three dimensional rotation. In proposed system, small DC motors are used to drive a spherical rotor to realize a small and lightweight attitude control system. We conduct experiments on attitude control of a satellite model with a spherical rotor by applying two-degree-of-freedom controller.

研究分野：制御工学

キーワード：球状ホイール 姿勢制御 小型人工衛星 浮上盤 2自由度制御 スライディングモード制御 消費電力

1. 研究開始当初の背景

日本における宇宙開発については、内閣に設置された宇宙開発戦略本部において十分議論されている。その中でも、準天頂衛星システム事業のような人工衛星技術が、我が国の公共安全確保や産業振興のために、重要な社会インフラとして期待されている。その他に、総務省では通信衛星技術の開発、文部科学省では「はやぶさ」後継機や観測衛星の活用、国土交通省では気象衛星の高機能化などの計画が挙げられており、23年度概算要求(宇宙関係予算)の全府省総額は3,397億円にも上っている。

これまでの人工衛星は、質量数トン、寸法も数メートルに及んでいたが、JAXA(宇宙航空研究開発機構)では2000年頃から小型衛星の開発・打上も行っている。小型衛星の定義は必ずしも明確にされていないが、質量100kg以下、寸法1m以下のものを指すことが多い。さらに経済産業省では、「衛星の小型化などによる先進的宇宙システムの研究開発」に予算を計上するなど、小型衛星の具体的な利用法について国家プロジェクトとして検討されつつある。また、NASA(アメリカ航空宇宙局)のFASTSAT(Fast, Affordable, Science and Technology Satellite)やESA(欧州宇宙機関)のPROBA(Project for On-Board Autonomy)など、世界的に小型衛星を利用したミッションが遂行されている。これまでの人工衛星開発は特別な機関で行われていたが、現在では世界中の大学で小型衛星の製作が行われている。しかし、衛星の小型化が進んでいるにも拘らず、姿勢制御技術に関して大きな進歩は見られない。通常、姿勢精度1度未満を満足する方法として、リアクションホイールによる姿勢制御法を採用している。3軸姿勢制御を行うためには、フェイルセーフの観点から冗長系を組むことを考え、ホイールは4スキュー配置にするなどの方法も取られている。しかし、搭載する機器の寸法に厳しい制約を持つ小型衛星などには、リアクションホイールによる3軸姿勢制御は寸法と質量の面から適切ではない。一方、地球磁場を利用した磁気トルカは、構造的に機械部を持たないことから、構造・質量の点において小型衛星に適している。しかし、発生するトルクが小さく、多様なミッションに対応できない。

そこで申請者は、「球体の回転反力を利用して衛星の姿勢を制御する」という着想に至った。球体の回転運動を利用すれば、各軸方向に姿勢制御装置を設置する必要はない。同様の発想は、Mueller等が取得した特許(1963年, US3105657)に見られる。しかし、流体の圧力で球体を浮上・回転させる方法を採用しており、宇宙での利用は現実的ではない。一方、JAXAでも球体を利用した衛星の姿勢制御研究が行われている。駆動原理は、球形ホイールに回転磁場を任意にかけ、発生する反力を利用して3軸姿勢制御を行うというものである。この方法には、「摩擦による経年劣化がな

い」という利点があるものの、磁場の制御が難しくシステムも複雑になり実用化には至っていない。基本的に、浮上させた球体の回転運動を制御することは難しく、また、回転する球体の位置を保持することも同様に困難と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、申請期間中に以下の点について明らかにし、小型衛星用に新たな姿勢制御システムを構築することを目的とする。

- ① 球状ホイールに適した駆動方法の確立
- ② 実験によるシステム動特性の評価及び球状ホイールの回転制御
- ③ 衛星モデルによる球状ホイールシステムの動作評価

3. 研究の方法

球状ホイールの駆動原理については、圧電素子の使用を含め球状ホイールの駆動方法に適した手法を確立する。具体的には、圧電素子や直流モータを用いた球状ホイール用駆動装置を構築し、球状ホイールの回転方向及び回転速度における制御性能を比較する。

最後に、球状ホイールシステムを搭載した衛星モデルを作製し、浮上盤を用いた姿勢制御実験により本装置の有効性を検証する。

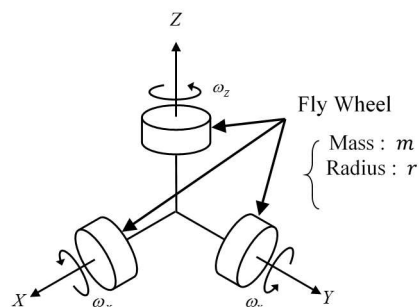


図1 従来のフライホイールシステム

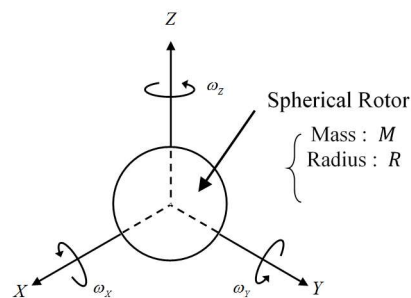


図2 球状ホイールシステム

4. 研究成果

(1) 駆動原理

球状ロータを適用した場合の小型・軽量化における利点は、フライホイールと球状ロータの慣性モーメントを基準に比較することにより確認できる。図1に従来のフライホイールを用いたときの構成、図2に球状ロータを用いたときのシステム構成の概念図を示す。

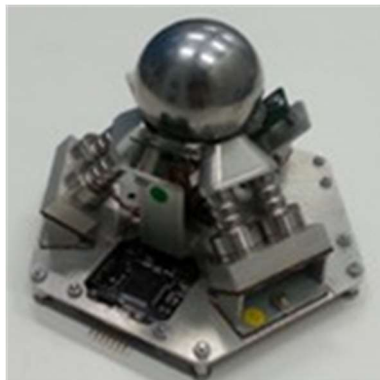
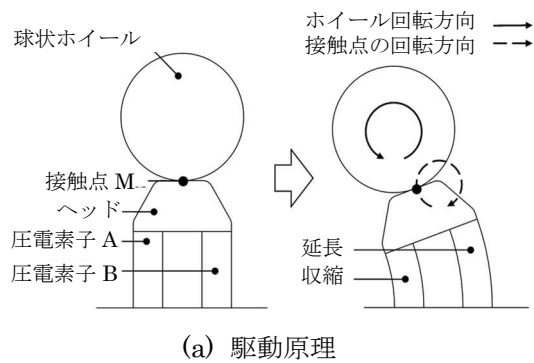


図3 圧電素子を用いた駆動装置

同一慣性モーメントかつ同一半径の場合、システムの総質量比は  $M:3m = 1:0.471$  となる。また、フライホイールと球状ロータが同一慣性モーメントかつ同一質量の場合、フライホイールの半径と球状ロータの半径の比は、 $R:r = 1:0.645$  となる。したがって、球状ホイールシステムが従来のシステムに比べ小型化・軽量化に有利な構造であることが分かる。

球状ホイールシステムによる小型人工衛星姿勢制御装置の小型・軽量化の可能性について示したが、これには、小型かつ軽量の球状ホイール駆動方式が必要不可欠である。しかし、前述したように従来提案されてきた駆動方式は、回転原理の複雑さから小型化・軽量化が困難であった。

そこで、駆動方式として圧電素子を用いた方法と、直流モータを用いた方法を検討してみた。図3に圧電素子を用いた駆動装置、及び図4に直流モータを用いた駆動装置を示す。図3(a)には圧電素子を用いたときの球状ホイール駆動原理を、図3(b)には開発した球状ホイール駆動装置を示す。同様に、図4(a)に直流モータを用いたときの球状ホイール駆動原理を、図4(b)には開発した駆動装置の外観を示す。

球状ホイールの駆動方法に圧電素子を用いる場合は、図3(a)に示すように、圧電素子を平行に並べる。2本の圧電素子をヘッドと呼ばれる部品で固定し、接触点Mで球状ロータを接触させる。圧電縦効果を利用してアクチュエータをそれぞれ延長・収縮させることで2本の圧電素子の長さに差が生じ、これにより

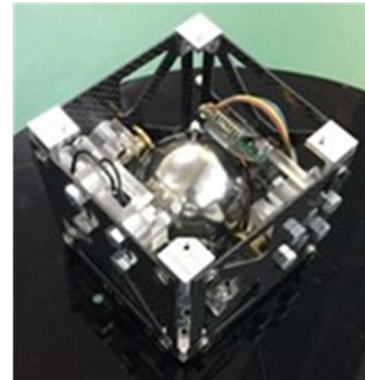
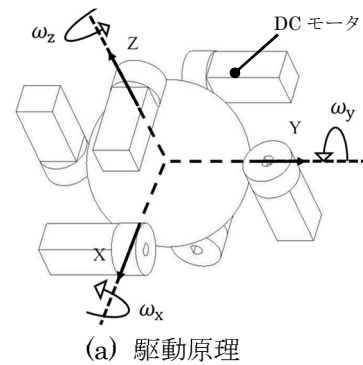


図4 直流モータを用いた駆動装置

ヘッドの接触点Mが移動し、接触する球が回転する。この2本のアクチュエータとヘッドの1セットをステータと呼ぶ。このステータは球の回転機構であると共に球の支持機構としても有効である。

図4に直流モータを用いたときのアクチュエータの配置を示す。ホイール固定された直交3軸の各軸にアクチュエータを配置し、発生するトルクの組み合わせにより、ロータを任意の軸周りに回転させる。また、各軸に2つつづつアクチュエータを配置することによって、トルクの向上やシステムの冗長性が加わり、さらに、アクチュエータ自身がロータを固定するため、ロータ支持などの機構を必要としない。

## (2) 球状ホイール回転制御

球状ホイールの回転方向及び回転速度の制御について、圧電素子を用いた場合と直流モータを用いて直径50 [mm]の球状ホイールを駆動した実験を行った。実験結果をそれぞれ図5と図6に示す。なお、球状ホイールの回転数は、光学センサを用いた非接触による測定を行った。

圧電素子を用いて球状ホイールを駆動した場合、図5(a)を見ると、目標回転速度  $0.2\pi$  [rad/s] に対して、定常偏差無く回転制御が行われている。また、任意の回転方向制御の結果(図5(b))を見ると、目標回転速度を  $x$  軸周りに  $0.2\pi$  [rad/s]、 $y$  軸周りに  $0.2\pi$  [rad/s] としたとき、目標値近傍で球状ロータの回転数が制御されていることが確認できる。

一方、直流モータを用いた球状ロータの回転制御実験では、図 6(a)及び図 6(b)から回転速度及び回転方向の制御において良い制御結果が得られていることが分かる。

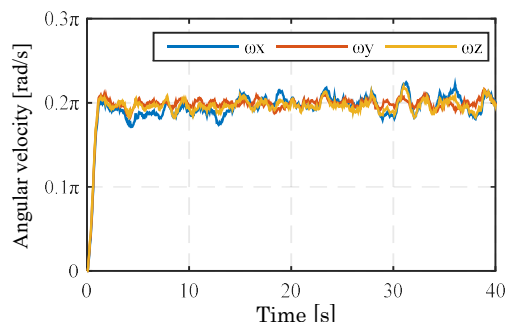
両駆動方法による球状ホイールの回転制御の結果を比較すると、圧電素子を用いた場合、目標値付近で角速度の応答に振動が見られる。特に任意軸方向の回転数を制御する場合、球状ホイールの回転運動に振動が顕著に現れている。これは、ヘッド部と球状ホイールの摩擦力による影響が振動を励起する要因と考えられる。これに対し、直流モータにより球状ホイールを駆動した場合、目標値付近において球状ホイールは安定して回転していることが分かる。また、圧電素子の場合、安定した回転制御が行えるのは目標値が  $0.2\pi$  [rad/s]以下のときで、直流モータの場合、 $2$  [rad/s]程度までは安定した回転制御が実現できている。さらに、圧電素子を駆動するための電源システムは、球状ホイールシステムの2倍以上の面積を必要とし、小型衛星用の姿勢制御装置としては適していない。

以上の結果より、球状ホイールシステムの駆動方法としては、図 4 に示した直流モータを用いた手法を採用することとした。

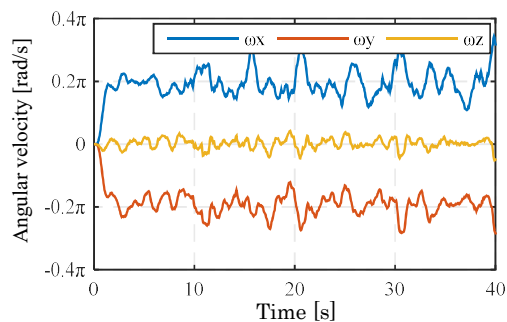
### (3) 小型人工衛星モデルの回転速度制御

図 7 に、本研究で開発した球状ホイールシステムを搭載した小型人工衛星モデル（以下、衛星モデル）の外観を示す。ここでは、安定した球状ホイールの回転制御が行えているのかを確認するために、衛星モデルの回転速度制御実験を行った。本実験では、ジャイロセンサが読み取る衛星の角速度を観測量として、2自由度制御系を設計した。本実験で用いた浮上盤は、カーボン多孔質体エアベアリングを用いて製作されたもので、コンプレッサから供給される圧縮空気を表面から噴出させる。これにより浮上盤上の物体が浮き、摩擦力の影響をほとんど受けない環境が得られる。衛星モデルの回転速度制御では、鉛直1軸周りの角速度制御を行った。実験は衛星モデルの初期角速度を  $0$  [rad/s]とした状態で行った。

図 8 に実験結果を示す。衛星モデルの目標角速度は  $-0.2$  [rad/s]とした。そのときの、衛星モデルの角速度の時間履歴を図 8(a)に示す。衛星モデルの角速度は、オーバーシュート無く、かつ定常偏差無く目標値に到達していることが分かる。そのときの球状ホイールの角速度の時間履歴を図 8(b)に示す。球状ホイールの  $x$  軸周りの角速度は、 $4$  [rad/s]以上となっているが、球状ホイールは安定して回転していることが分かる。図 8(c)に直流モータへの入力電圧の時間履歴を示す。図 8(a)と図 8(b)の結果から、球状ホイールと衛星モデル本体の間には角運動量保存則が成り立っているが、入力電圧は上昇している。この現象は、浮上盤と衛星モデルの間に生じる粘性抵抗が、衛星モデルの運動に対して外乱として影響しているためである。つまり、実際の

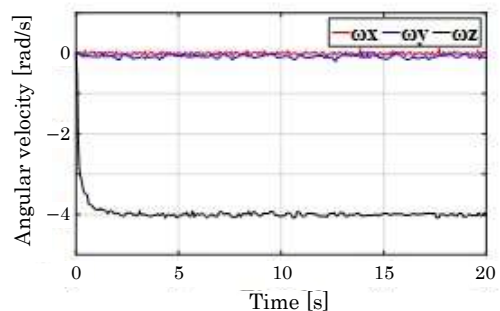


(a) 回転速度制御

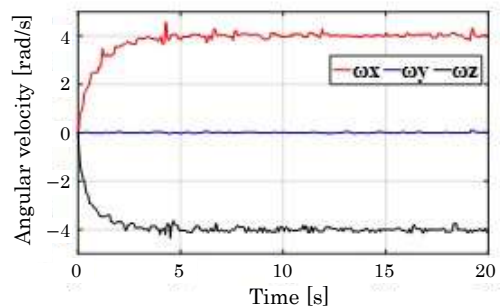


(b) 回転方向制御

図 5 圧電素子による球状ホイールの回転制御実験結果



(a) 回転速度制御



(b) 回転方向制御

図 6 直流モータによる球状ホイールの回転制御実験結果

宇宙空間において、何らかの外乱が衛星に生じた場合でも、本装置が姿勢制御装置として有効に機能することが確認できる。本実験から、提案した駆動方式による球状ホイールシステムが、小型衛星の姿勢制御装置として有効であることが確認できた。

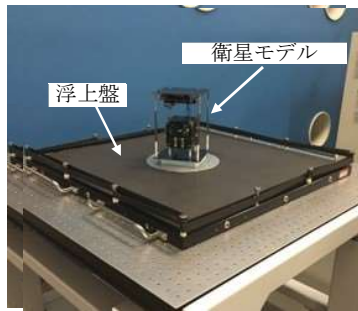
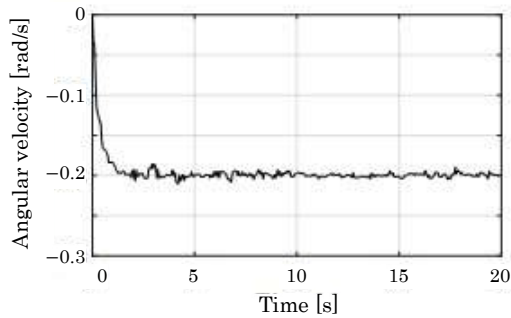
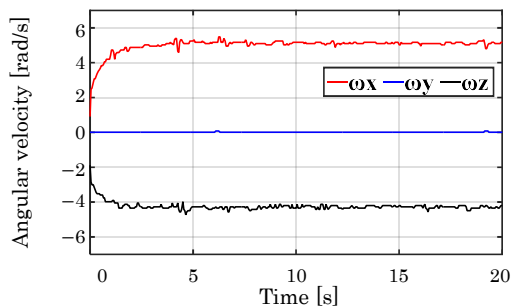


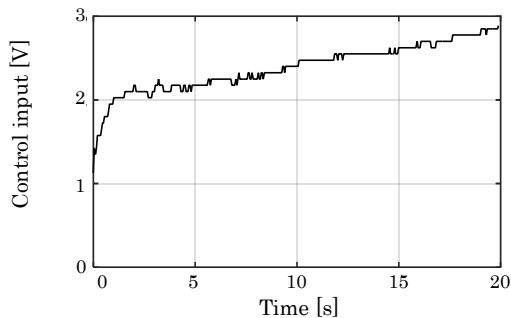
図7 小型人工衛星モデル



(a) 衛星モデルの角速度



(b) 球状ホイールの角速度



(c) 直流モータへの制御入力

図8 衛星モデル回転制御実験結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Hidehiko Paku and Kenji Uchiyama: Spherical Reaction Wheel System For Satellite Attitude Control, AIAA Science and Technology Forum and Exposition, 査読有, AIAA 2016-0693, 2016
- ② Hidehiko Paku and Kenji Uchiyama: Satellite Attitude Control System using a Spherical Reaction Wheel, Applied Mechanics and Materials, 査読有, Vol. 798(2015), pp.256-260, 2015
- ③ Hitoshi Watanabe, Kai Masuda and Kenji Uchiyama: Satellite Attitude Control System Using Three - Dimensional Reaction Wheel, AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2015, 査読有 AIAA 2015-1782, 2015
- ④ 増田開, 内山賢治: 球状リアクションホイールによる三軸姿勢制御, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, Vol.62., No.3, pp.85-92, 2014.

[学会発表] (計 3 件)

- ① Ryo Takehana, Hidehiko Paku, and Kenji Uchiyama: Spherical Reaction Wheel for three-axis Satellite Attitude Control, Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology, APISAT-535, 25 November 2015, Cairns (Australia).
- ② 朴成彦, 内山賢治: 球状リアクションホイールを用いた小型衛星の姿勢制御, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会プログラム, JSASS-2014-4445, 2014.11.13, 長崎ブリックホール (長崎県・長崎市).
- ③ 増田開, 内山賢治: 球状ロータを用いた 3 次元リアクションホイール, 宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2013-4370, 2013. 10.10, 米子コンベンションセンター (鳥取県・米子市).

[その他]

ホームページ等

<http://www.aero.cst.nihon-u.ac.jp/~uchiyama/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

内山 賢治 (UCHIYAMA, Kenji)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号 : 90281691