

令和元年6月17日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18428

研究課題名(和文)磁気軸受と電磁ブレーキを用いた高角運動量・高トルク小型リアクションホイールの開発

研究課題名(英文)Development of high angular momentum, high torque small reaction wheel using magnetic bearing and electromagnetic brake

研究代表者

茂渡 修平(Shigeto, Shuhei)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：60769537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：小型衛星向けのリアクションホイール(RW)の軸受を磁気軸受とし、回転速度を向上させることによって、RWを30mm程度まで小型化しながら角運動量を高めることを試みた。まず、ボールベアリングを用いた従来型のRW構造について、構造と制御回路の最適化を行い小型化を実現した。また、小型化によって減じるトルクを補うため、電磁ブレーキを用いることにより、瞬発的な高トルクを可能とした。次に、軸受けの一部に永久磁石を用いた一軸制御型磁気軸受を設計した。高トルクを実現するために用いている電磁ブレーキを磁気軸受のアクチュエータとしても利用することで、小型かつ簡素な構造であり、今後その性能を評価していく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型衛星においては、規格化され限られた大きさの中に様々な機能を搭載する必要がある。姿勢制御は衛星のミッションを実現するために必須の機能であるが、これの性能を保ちながら小型化することができれば、より多くの機能を一つの衛星に搭載することができる。本研究で試作した小型モジュールは、磁気軸受化による高角運動量化には至っていないものの、世界最小サイズの姿勢制御機能を有するモジュールとなり、今後人工衛星やロボットを含む幅広い分野での応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：I tried to increase the angular momentum while miniaturizing RW to about 30 mm by using the bearing of reaction wheel (RW) for small satellite as a magnetic bearing and improving the rotational speed. First, with regard to the conventional RW structure using ball bearings, the structure and control circuit were optimized to realize miniaturization. In addition, in order to compensate for the torque that is reduced due to the miniaturization, the use of an electromagnetic brake enables instantaneous high torque.

Next, a single-axis control type magnetic bearing was designed in which a permanent magnet was used in part of the bearing. The electromagnetic brake used to realize high torque is also used as an actuator for a magnetic bearing to realize a small and simple structure.

研究分野：制御工学

キーワード：姿勢制御 小型化 磁気軸受

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

人工衛星において、一般的に姿勢制御で用いられるリアクションホイール（RW）は、角運動量を人工衛星本体と交換することで姿勢を変更するアクチュエータである。近年、人工衛星に搭載される観測機器の小型化・高性能化に伴い、小型衛星の需要が爆発的に増大し、同時に小型衛星向けの RW も開発が進んでいる。小型衛星の大きさは規格化が進んでおり、ある一定サイズの中に全ての機能を搭載する必要がある。RW の大きさ当たりの角運動量を高めることができれば、衛星に占める RW の大きさを減らし、衛星に搭載するミッション機器を増加させることができる。しかしながら、単純な構造の小型化だけでは、角運動量は大きさの 3 乗に比例して小さくなってしまう。小型化しても制御性能を保つためには、小型化で失った慣性モーメントを補うほどに高速で回転させる必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、磁気軸受と電磁ブレーキを用いて、世界最小サイズ(30mm 立方程度)に小型化しながら、高角運動量・高トルクな RW を実現しようとするものである。

30mm 立方のサイズに、姿勢センサ、モータ、制御回路等を全て納めようとする、大幅な小型化が必要となる。また、内部は非常に狭く配線や部品配置に大きな制約がある。まずは制御回路と構造設計の最適化を行う。

従来のボールベアリングを用いた RW では、熱や寿命の観点から回転速度を制約するのが一般的である。高角運動量を得ようとする、回転速度を速める必要がある。そこで、本研究では、磁気軸受を用いて非接触でホイールを浮上させることで、回転数を飛躍的に高めることを試みる。磁気軸受を小型化するにあたっては、狭い範囲の中に、モータを駆動するための磁石、コイル、浮上のための磁石などが密集するため、配置の最適化と構造の簡素化が必要となる。

最後にロボットや衛星等への適用を行い、実用化に向けた実験と評価を行う。

### 3. 研究の方法

従来、人工衛星の姿勢制御機器をワンパッケージ化した 10cm 立方サイズの姿勢制御モジュールが開発されていた。本研究にあたっては、まず、三軸制御に必要な姿勢センサ、計算機、アクチュエータを一体化した姿勢制御モジュールを 31mm 立方にまで小型化する。単純な小型化では全ての機器を搭載することは難しいため、制御回路の構成、構造、組立方法に至るまで最適化を行う。

高角運動量を得るため、小型化したモジュールに入る磁気軸受を検討する。磁気浮上に必要な 6 自由度を全てアクティブに支持すると、制御回路が大型化し、小型化が難しくなる。そこで、永久磁石反発型の軸受を用いた 1 軸制御型の磁気軸受について、その磁石の配置と構造の最適化し、シミュレーションによる成立性検討を実施する。

### 4. 研究成果

(1) 三軸制御に必要な姿勢センサ、計算機、アクチュエータを一体化したモジュールの小型化を試みた。従来構造の設計では制御回路やセンサを全てモジュール内部に配置することが難しい。そこで、発想を改め、電子回路基板そのものを構造として利用し、内部配線も含めて構造と回路を一体化して設計することで、部品点数の大幅な削減と一辺 31mm 立方という小型化を実現した。この大きさは、単体で姿勢制御可能なモジュールとしては世界最小クラスである。

①機械的な構造については、組み立ての手順まで考慮して最適化するため、立方体の展開図として部品の配置を考え、回路を構成した(図 1)。制御基板と RW のユニットは立方体の一面として構成され、まず平面状態で配線を行う。そして最後に折り紙のように折りたたみながら組み上げることにより、一つのモジュールとして機能する。基板が立方体の構造そのものであるため、制御回路の実装面積を十分に確保することができ、小型化しながらセンサや計算能力は失われない。

②内部の制御回路は、SoC を採用することでほとんどの機能をワンチップに実装している。単純に実装面積を削減するだけでなく、後から内部配線を再プログラムすることで書き換えが可能となり、より幅広い応用が可能となる。これらの工夫により、小型化に必要な構造、制御回路の構成、システムを確立した。

③また、小型化によって減じるトルクを補うため、電磁ブレーキを用いることにより、瞬発的な高トルクを可能とした。このトルクは、通常のモータが出す力と比べ、200 倍以上の高トルクを瞬時に発生させることができる。回転体とブレーキを使った高トルクを発生させる機構はこれまでも研究されてきたが、小型化には向いていなかった。ブレーキの機構は、過去に我々の研究グループが提案していた電磁ブレーキ機構を用いることで、大幅な小型化を実現している(図 2)。

(2) 試作したモジュールを用いて、宇宙ステーション内で浮遊するロボットの姿勢制御の実験を行い、その評価を実施した。慣性センサだけでは検知することができない位置や相対姿勢は、外部のセンサから取り込みつつ、内部の慣性センサと統合した姿勢推定計算を行い、RW を駆動して任意の姿勢制御ができることを示した。また、SoC を用いた柔軟な回路構成により、外

部の推進用ファンを駆動することも可能であり，制御モジュール1つで位置・姿勢を駆動する機能をロボットに適用することに成功した．ロボットのサイズは15cmほどの球体であり，姿勢制御装置が31mmという小型でなければ全ての機能（カメラ，通信，電源，他）を搭載することは実現しえなかった．姿勢制御機器を小型化することで他の機器を多く搭載することができるようになるという当初の目的を達成したと言える．

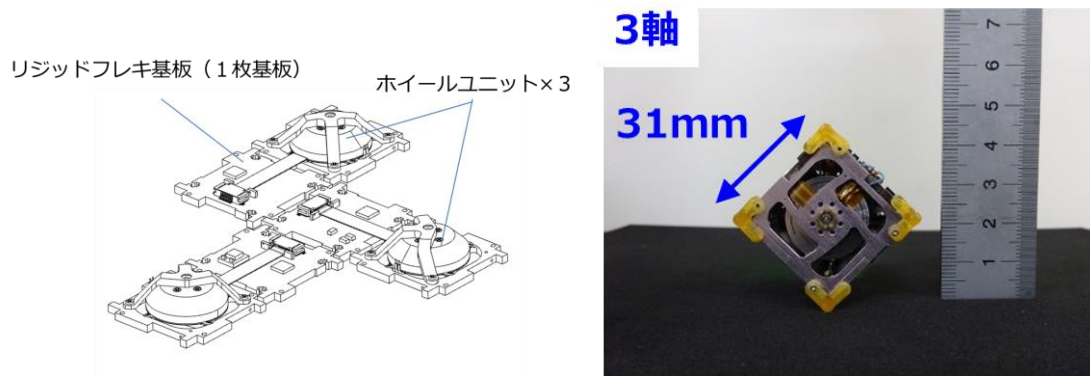


図1 立方体型姿勢制御モジュールの展開図と組み立てた姿勢制御モジュールの外観．制御基板が構造を兼ねており，制御基板（リジッドフレキ基板）とホイールユニットを接合し，組み立てるだけで一つのモジュールとして機能する．

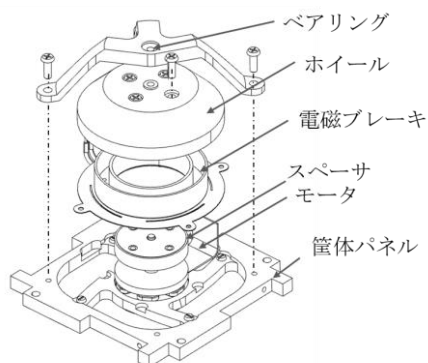


図2 ホイールユニットの内部構造．モータと電磁ブレーキを搭載しながら，小型化を実現している．

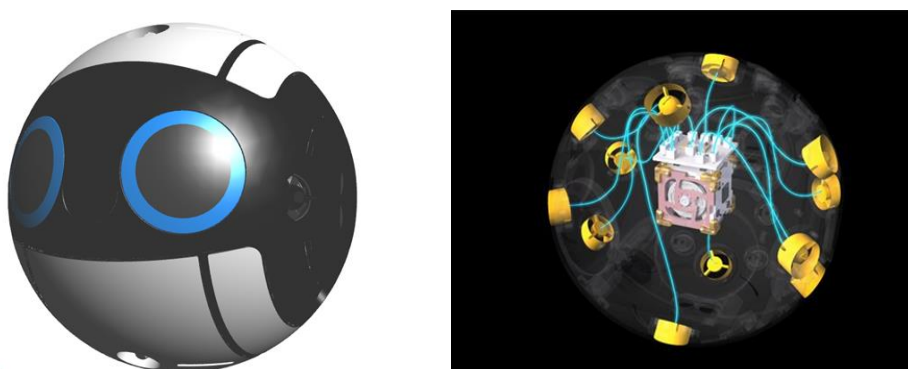


図3 ロボットへの適用検討．球体型ロボット（左図）の内部に制御モジュールが搭載され（右図），姿勢制御機能を提供している．推進用のファンも同時に駆動できるなど，柔軟性を有する．

(2) (1) で大幅な小型化のための制御回路と構造設計の最適化を実現した。続いて、RW の磁気軸受化による高性能化を試みた。

①当初、ホイールの自由度のうち、回転を除く 5 自由度全てをアクティブ制御し、浮上させる方法を検討した。しかしながら、ホイールの位置と姿勢を正確に検出するためのセンサやインバータ回路を全て小型化し、一体化することが難しいと分かった。そこで、軸受けの一部に永久磁石を用いたパッシブな永久磁石反発型軸受を用い、スラスト方向への一軸制御型磁気軸受を設計した。

永久磁石を磁気双極子としてモデル化し、スラスト方向、ラジアル方向それぞれに働く復元力を計算し、必要となる磁気双極子の磁荷の大きさを求めた(図 3)。軸受の永久磁石位置によっては、ラジアル方向のホイールの傾きに対する復元力が不十分となるため、軸の長さ、軸受部の永久磁石スラスト方向位置について、十分な復元力を有するよう配置を最適化し、同時に必要となる永久磁石の大きさを求めた。

②従来の磁気軸受では、制御力を出すアクチュエータを、モータの設計を磁気軸受と一体化することで複雑化し、あるいはホイール外周部に電磁石を設置するなどし、ホイール用途としての小型化が難しかった。そこで、本研究では、高トルクを実現するために用いている電磁ブレーキを磁気軸受のアクチュエータとしても利用することで、小型かつ簡素な構造を提案した。ベアリング式の小型 RW と同様の構造で、既に電磁ブレーキを使う構造を提案しており、構造を大きく変えることなく実装できるのが利点である(図 4)。電磁ブレーキの出せる推力を電磁解析により求め、①で設計した永久磁石の反発型軸受が出す力と十分につり合い制御できる力を出せる配置と間隙を計算し、反映した実験装置を設計・製作した(図 5)。今後、その性能を評価していく予定である。

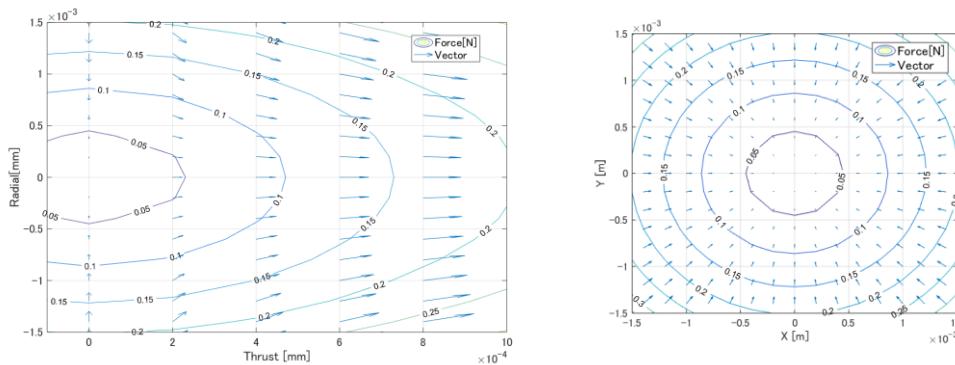


図 3 磁気双極子モデルによる解析例。ある磁荷を仮定した時、左がスラスト方向への位置ずれ、右がラジアル方向への位置ずれをした時にホイールが軸受から受ける力ベクトルを表したもの。

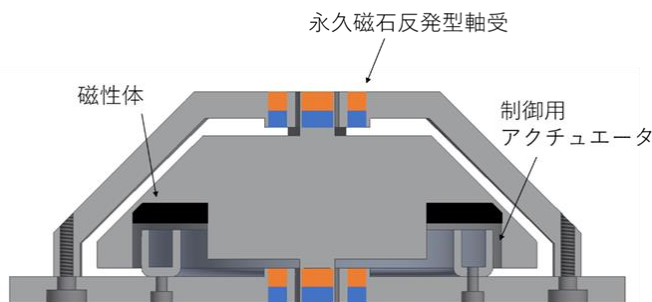


図 4 提案した一軸制御型磁気軸受を含む RW の断面図



図 5 作成した 1 軸磁気軸受実験装置

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 茂渡修平, 他, 1/30U サイズ三軸姿勢制御モジュールの開発と JEM 自律移動型船内カメラロボットへの応用, 第 61 回宇宙科学連合講演会, 2017
- ② 茂渡修平, 他, 磁気軸受を用いた小型高角運動量リアクションホイールの基礎検討, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2018
- ③ S.Shigeto, et al, Development and evaluation of the 1/30U small - sized 3 - axis attitude control module, and its application for the JEM Internal Ball Camera Robot, Small Satellite Conference (workshop), 2018
- ④ 茂渡修平, 他, 磁気軸受リアクションホイールの超小型化ため浮上方式に関する基礎検討, スペースエンジニアリングコンファレンス, 2018

〔図書〕 (計 件)

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

研究代表者氏名：茂渡修平

ローマ字氏名：Shigeto Shuhei

所属研究機関名：宇宙航空研究開発機構

部局名：研究開発部門

職名：研究開発員

研究者番号 (8 桁)：60769537

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。