

## 2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	大阪府立大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学分野
職位または役職	講師
氏名	金田さやか

### 1. 研究題目

---

宇宙機用制御アクチュエータの3軸姿勢制御の実験的検証

### 2. 研究目的

---

宇宙機の姿勢制御装置として、二重ジンバル可変速 CMG が注目されている。CMG (コントロールモーメントジャイロ※1) は高トルクを出力できるため、現在、国際宇宙ステーションに4台搭載されている。3軸姿勢制御の実現のために3台が最低必要、1台は故障のための冗長用である。

二重ジンバル可変速 CMG※2は1台で3自由度姿勢変更を実現する、CMGの先進装置である。しかし、駆動原理が複雑なため、運用に至っていない。本研究では、**二重ジンバル可変速 CMG の実現を目的とし、実機による制御検証を行う。**

※1 CMG はフライホイールと呼ばれるコマを回転させ、そのコマの軸方向をジンバルによって変化させ、姿勢変更のための高トルクを出力する装置である。

※2 二重ジンバル可変速 CMG は、ジンバルが二重でコマの軸方向を任意に変更できる。コマの回転速度も変更できることから、3自由度の姿勢制御を1台で実現できる。現時点では、数値実験による検証にとどまる。

3. 研究内容及び成果

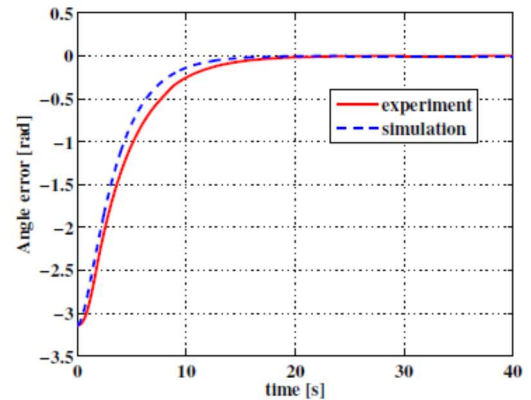
二重ジンバル可変速 CMG の実機検証実験としてまず、ジンバルのうちの1つを制御して、CMGとして駆動、機体 yaw 角(水平軸まわり)の姿勢制御性能について確認した。図 1 のように、数値実験と同程度の精度であることを確認した。水平軸まわりは重力の影響がなく、設計通りの性能が得られることが確認できた。

次に、実験機の 2 つのジンバルを同時駆動させることを試みた。ジンバルの角速度コマンドはアナログ値で与える必要があるが、制御用マイコンとして選定した mbed はアナログ出力ポートは 1 つのみであった。このため、DA コンバータを追加した。アナログ出力ポートによるものとデジタル出力ポートによるジンバル制御に差がないことを確認し、2 つのジンバルの同時駆動が実現できるようになった。

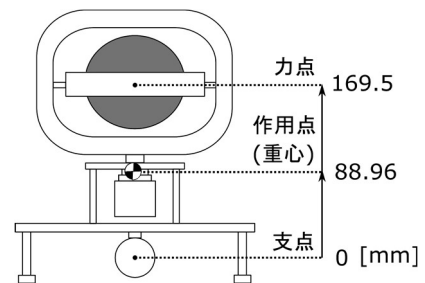
これまでの数値実験では、宇宙機を想定していたため、支点・作用点・力点が同一と考えればよかった。一方、実験機は、図 2 のように、底に付属した球を支点として動く。重力の影響下において、実験機を倒立状態で安定させることができれば、垂直軸まわりの 2 軸制御ができると言える。そこで、実験機を図 3 のように倒立振り子とみたと、数値実験プログラムを修正した。実機の垂直軸まわりの慣性モーメントを計測し、重心位置を求めた。数値実験のパラメータを実機のものに合わせ、機体を倒立安定させるのに十分なトルクが出せることを確認した。

実際の実験機について、鉛直軸まわりの垂直トルクを出し、倒立状態に十分な大きさかどうかを確認した。制御系設計はまだ出来ていないので、オープンループ状態であった。出力できたトルクの大きさは、数値実験の 3 割程度にとどまった。数値実験と実際の実出力トルクとの乖離に関する要因について、様々な検討を行った結果、数値モデルの誤りを発見した。重力項の向きを反対にしていたり、機体系座標軸の定義に誤りがあったりしたため、実験結果より大きな出力トルクを出し、かつ自然と安定化するようなプログラムになっていた。

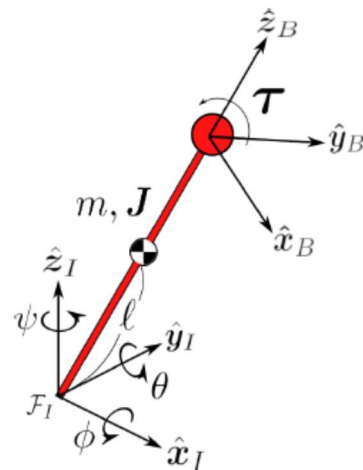
なお、3 月から 5 月まで、コロナ禍のために大学への入構が禁止されていたため、この 3 か月間は研究を進めることができなかった。



[図 1:水平軸まわり制御の結果比較]



[図 2:実験機の支点・力点・作用点]



[図 3:倒立振り子モデル]

#### 4. 今後の研究の見通し

---

下記の2つの課題に取り組む予定である。具体的な計画は表1に示す。

##### **課題 1: 3 軸姿勢制御の実証**

2重ジンバル可変速 CMG の実証実験として、まず倒立振子の実証を行う。これにより、水平 2 軸まわりの姿勢制御性能を検証する。数値実験で構築した最適レギュレータを実機で検証し、数値実験結果と比較、これまでの運動モデルと制御系設計の妥当性を確認する。

次に、垂直軸まわりの制御を追加し、ホイールの角速度変化を加えた、二重ジンバル可変速 CMG として駆動し、水平軸まわりも含めた 3 軸姿勢制御について精度検証を行う。以上の内容を、国際学会にて発表予定である[2]。

その上で、我々が提案した LPV モデルに基づく制御系[1]について、これまでの最適レギュレータによる制御系と制御性能を比較する。これまでに数値実験で確認していた LPV モデルに基づく提案法による制御系による性能が十分高いことを確認する。

##### **課題 2: 特異点回避則の適用検証**

二重ジンバル可変速 CMG は 1 台で 3 自由度姿勢変更を実現する、CMG の先進装置である。しかし、二重ジンバルが重なるとき、出力トルクの自由度が落ちる。この状態は特異姿勢と呼ばれる。過去の研究で、特異姿勢からの距離と、目標姿勢追従に必要な制御入力とに重みをつけることで、特異姿勢を回避しながら目標姿勢へ追従させる制御系を構築した。この手法を実機に組み込み、性能を評価する。実機における適切な重みパラメータを明らかにし、提案手法の有効性を検証する。

[1] T. Sasaki, T. Shimomura and S. Kanata, “Gain-Scheduled Control and Singularity Avoidance with a Double-Gimbal Variable-Speed Control Moment Gyro,” Proc. of AIAA SPACE 2016 Astrodynamics Specialist Conference, 10 pages (2016).

[2] Futa Hayshida, Sayaka Kanata, Takashi Shimomura, “Experimental Verification of Attitude Control of aSpacecraft with Double-Gimbal Variable-Speed Control Moment Gyro,” SICE International Symposium on Control Systems 2021.

[表 1. 実験計画]

2020 年 9 月-12 月	2021 年 1 月-3 月	4 月-6 月	7 月-9 月
3 軸姿勢制御の数値実験プログラムの修正 研究成果発表[2]	実機による検証	LPV モデルに基づく 制御系を実機に搭 載	[課題 2]特異点 回避則の検証

#### 5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

---

・国際・国内会議(査読無)

[1] 林田 風汰, 金田 さやか, 下村 卓: DGVSCMG 搭載宇宙機の垂直軸まわりの姿勢制御を想定した実験的検証, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020, 2P1-B12・5 月 29 日(金)on-line 発表