

2020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特異点回避に関する実験的検証

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。これまでの研究により、二重ジンバル可変速 CMG の実現を目的とし、実機による3軸の姿勢制御の検証として倒立振り子として制御実現を目指した。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。これまでの研究で、特異姿勢を回避する方法について提案し、数値実験によりその有効性を検証した。本研究では、実機による検証を行い、その実用性を確認する。

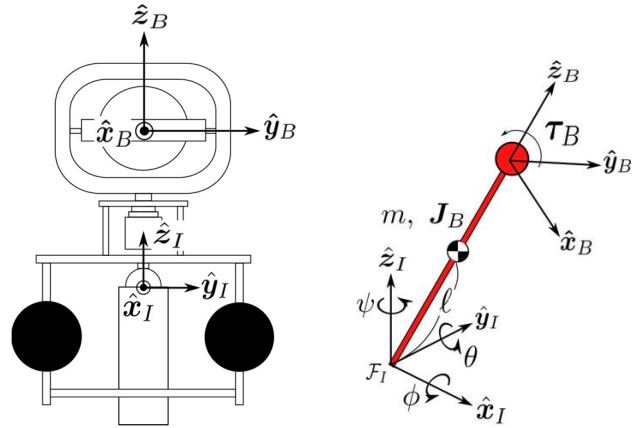
3. 研究内容及び成果

(研究内容)

既存研究では、宇宙空間を想定した運動モデルによる数値実験であった。本研究では、地上実験による実証のため、実験機を3軸倒立振り子としてモデル化し、3軸姿勢制御を行うことを考えた。しかし、重力の影響が大きく、既存の実験機の構造では制御が困難であった。そこで、重力の影響を小さくするために、実験機下部におもりを追加し、重心位置を下げた。この工夫により、姿勢制御が可能となった。下記のサブテーマに沿って研究を遂行した。

1. 地上実験に向けた運動モデルの導出

実験機を倒立振り子として実現させるために、図1に示すような座標系を定義し、2つの方法で運動モデルを導出した。1つ目は、Lagrange法を用いて、実験機の運動エネルギーを考え、運動モデルを導出したもの、2つ目は、角運動量保存則を用いて、機体座標系で運動モデルを導出したものである。



[図1: 倒立振り子モデル (左)実験機のスケッチ (右)力学モデル]

2. 制御系設計

導出した運動モデルに対し、3軸姿勢制御系を設計した。3軸独立であったため、水平軸(rollおよびpitch軸)まわりに関して最適レギュレータを、垂直軸(yaw軸)まわりに関しては最適サーボ系として分離した。これは、マイコン(mbed)実装時に行列計算を使わないための工夫である。

3. 姿勢制御性能の検証実験

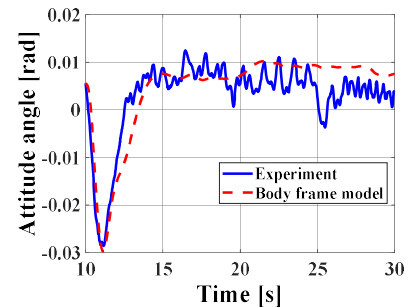
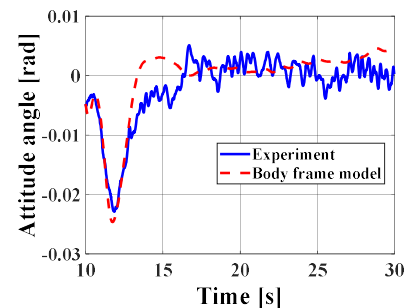
設計した制御系を実装し、実機により検証した結果、実験機は倒立姿勢を保持し、垂直軸まわりに姿勢変更を行うことを確認した。検証実験は数値シミュレーションと近い結果が得られ、すべての姿勢角において、目標値に収束し、その差は 10^{-3} オーダーであった。図2に2軸の結果を示す。

4. LPV 制御理論の適用検討

先行研究[1]では、宇宙機に搭載した二重ジンバルCMG装置に線形パラメータ変動システム(LPVSシステム)としてのモデル化とゲインスケジュールト制御を適用した制御法を提案していた。本実験機には重力が影響する点が先行研究と異なるため、この点を考慮したLPVモデルの作成を試みた。

なお、課題3までのDGVSCMG実験機の3軸姿勢制御を最適制御により検証した結果をまとめて、日本航空宇宙学会の英文誌(Transactions of JSASS)へ2021年11月に投稿した。

[1] T. Sasaki and T. Shimomura: Attitude Control of a Spacecraft with a Double-Gimbal Variable-Speed Control Moment Gyro via LPV Control Theory, *Advanced in the Astronautical Sciences*, 153 (2015), pp. 707-723.

(a) roll 角 ϕ ,(b) pitch 角 θ

[図2: 角度制御の比較: 赤破線が数値実験の値, 青実線が実験値]

4. 今後の研究の見通し

課題 1. 設計した LPV 理論に基づく制御系性能の実機検証 申請時点では、2020 年度のうち、二重ジンバル可変速 CMG について、重力の影響を考慮した LPV モデルを構築し、その数値実験を行う予定であった。2021 年度には、構築した LPV モデルに基づく制御系を実機に実装し、制御性能を検証する予定である。

課題 2. 特異点回避則の適用検証 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。本課題は当初、2020 年度に計画していたものである。特異点回避則の実証の前に、LPV 制御理論に基づく制御系設計とその検証を行う必要があることが明らかになり、そのために 2020 年度は計画を変更した。2021 年度の研究課題として取り組む。

[表 1. 実験計画]

2021 年 9 月-12 月	2021 年 1 月-3 月	4 月-6 月	7 月-9 月
課題 1. LPV モデルに基づく 制御系の実装	課題 1. 数値実験との比較	課題 2. 特異点回避則の実装	課題 2. 検証実験

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

学術論文 (査読付)

・ S. Kanata, F. Hayashida, and T. Shimomura, “Experimental Verification for Attitude Control of Spacecraft with Double-Gimbal Variable-Speed Control Moment Gyros,” Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. (投稿済)

国際会議 (査読付)

・ F. Hayashida, S. Kanata, and T. Shimomura, “Experimental Verification of Attitude Control of a Spacecraft with Double-Gimbal Variable-Speed Control Moment Gyro.” SICE International Symposium on Control Systems (ISCS) 2021, Paper ID: 1A1-4, March 1-4, 2021 (Presentation: March 2) (online symposium due to COVID-19) .