

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	大阪公立大学 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 LPV 制御適用による制御性能検証

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。先行研究では、数値実験による制御性能の検証にとどまっていた。我々は二重ジンバル可変速 CMG の実用性検証を目指し、これまでに、重力下での 3 軸姿勢制御を実現し、運動モデルの妥当性および最適制御適用による制御性能を確認した。

二重ジンバル可変速 CMG は、ホイールの回転角速度および回転軸の向きに依存して動特性が変化する。そこで、先行研究ではホイールの回転角速度および回転軸の向きをスケジューリングパラメータとした LPV モデルを構築した。数値実験により、古典制御よりも高い精度で制御できることを示した。本研究では、実機実験により、LPV 制御理論の適用検証を行う。実機実験では、重力が影響するため、数値実験で想定したモデルは直接利用できず、LPV モデルの再検討が必要となる点が課題である。

3. 研究内容及び成果

これまでの研究では、二重ジンバル可変速 CMG の実機について、重力の影響を考慮した運動モデルを導出し、これに基づく制御系設計を行った。3 軸姿勢制御の検証実験を遂行し、数値シミュレーション結果と比較した結果、いずれの姿勢角も 10^{-3}rad オーダの差に収まることを確認した。単純化した運動モデルおよびそれに基づく制御系設計、マイコンでの制御系構築が期待通り動作したことが確認できた。ただし、2 通りの方法で導出した動力学モデルが一致しないという問題があった(疑問点 1)。また、検証実験をまとめて 2021 年 11 月に論文投稿し、査読者から実験結果にのみ振動がみられるとの指摘を受けた(疑問点 2)。今年度はまず、これらの課題解決に取り組み、平行して、当初予定していた研究課題に取り組んだ(研究課題 1)。

疑問点 1. 動力学モデルの不一致

これまでに、2 通りの方法で動力学モデルを導出したが、これらが一致せず、問題であった。両者の導出を見直した結果、片方で回転行列が不適切であったこと、アクチュエータの運動エネルギーを二重に考慮したことの 2 つの誤りがあった。これらを修正することで、2 通りの方法による導出結果が一致した。

疑問点 2. 実験結果にのみ振動が存在

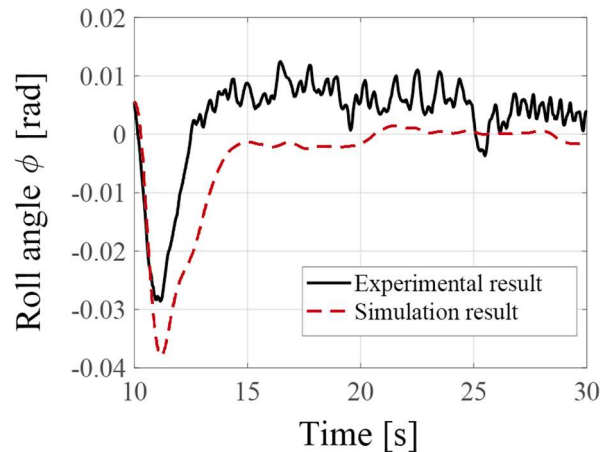
図 1 に示すように、以前の結果では、実験結果(黒の実線)には振動がみられ、数値実験結果(赤の破線)は振動がみられなかった。確認したところ、数値実験で想定したジャイロセンサのノイズ分散($\sigma_g^2 = 10^{-5}$)が実際のものより小さすぎたことが分かった。実際の実験機では、 $\sigma_g^2 = 10^{-3}$ オーダの分散であり、この値に数値実験のパラメータを合わせたところ、図 2 のように両者の応答が同等となった。

研究課題 1. LPV モデルの構築

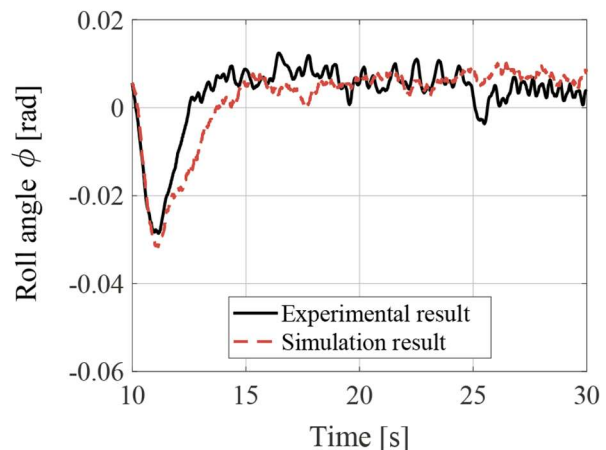
ホイールの回転角速度 Ω を変数とした LPV モデルについて、重力影響下での検討を行った。その結果、宇宙空間でのモデルに比べて、重力項が加わる簡単なモデルで近似可能であるとの見通しがたった。

なお、今回の実験の結果、図 3 に示すように、ホイール回転角速度 Ω について数値実験の値と実験値には乖離があることが分かった。このことは、LPV モデルでパラメータ変動に応じたゲイン調整をするにも関わらず、実際のパラメータ Ω との乖離から、期待したような性能向上は見込めない可能性があり、問題であることが明らかとなった。

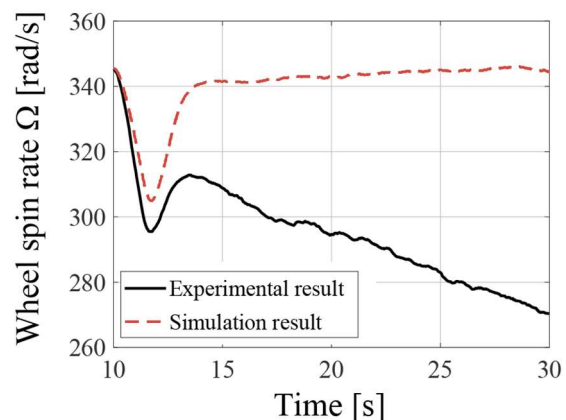
2022 年 10 月に修正原稿を投稿した。



[図 1: 姿勢角(roll)の制御結果:要因検討以前]



[図 2: 姿勢角(roll)の制御結果:KF におけるプロセス雑音の分散値を修正した結果]



[図 3: LPV モデルにおいて肝となるパラメータ(角速度 Ω)の実験値と数値実験値の乖離]

4. 今後の研究の見通し

今後は、大きく3つのサブテーマに取り組む必要がある。

サブテーマ1. 実験結果と数値実験におけるパラメータ Ω の差の解明

ホイールの回転角速度 Ω は、LPVモデルのパラメータとなる重要なパラメータである。数値実験における値が実際の値と乖離がある課題について、まず、原因を究明する。実際のホイールは摩擦が生じ、角速度レート $\dot{\Omega}$ は同程度に見えたとしても、積分値 Ω が減少する可能性もある。この点について確認する。万が一、原因が究明できないとしても、LPVモデルに基づく制御系設計を搭載し、期待した性能向上を望むのであれば、なんらかの角速度 Ω の予想モデルを構築する必要がある。この問題について取り組む。

サブテーマ2. 構築したLPVモデルに基づく実証実験

1.の課題を解決し、実機にLPVモデルに基づく制御系を搭載して実証実験を行う。現状はロール、ピッチの2変数に対する最適制御、ヨー角についてのサーボ系設計をマイコン(mbed)に実装し、制御を実現している。LPVモデルに基づく制御では、回転角速度 Ω に基づき、制御ゲインを時々刻々、適切に調整する必要があることから、マイコン実装による実現は困難である可能性がある。ボードPCへの置き換え、行列演算による制御実装を行う。

サブテーマ3. 制御性能の定量的評価

LPVモデルに基づく制御により、これまでの最適制御による制御性能より高い精度で制御が実現できると期待される。しかし、現状の実験装置は、9軸の慣性センサ(3軸ジャイロ、3軸加速度、3軸磁場センサ)からカルマンフィルタにより姿勢角を推定している。このため、推定された姿勢角には誤差が含まれる。このために、制御系の違いが性能向上をもたらした、と断定できない。実験装置を固定カメラで撮影し、高いサンプリングレートで姿勢角推定を行うことで、より高い精度の姿勢推定が期待できる。このカメラによる推定姿勢を用いて、制御性能の定量的評価を行い、我々が提案するLPVモデルに基づく制御系の性能評価を行いたい。

2023年3月までサブテーマ1に取り組み、2023年度からマイコンをボードPCへ置き換える検討ならびにサブテーマ3のカメラによる姿勢推定システムの導入を試みる予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

・学術論文(査読付)

日本航空宇宙学会英文誌(Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences)へ投稿(査読結果に対する修正原稿投稿)

・国内発表(予定・査読無)

第67回宇宙科学技術連合講演会での口頭発表