

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560817

研究課題名（和文）

CMGを用いた宇宙機姿勢制御の高精度化に関する研究

研究課題名（英文）

Study on Precise Attitude Control of Spacecraft Using Control Moment Gyros

研究代表者

山田 克彦 (YAMADA KATSUHIKO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：30402481

研究成果の概要（和文）：宇宙機の姿勢制御アクチュエータとして大トルクの出力できるCMG(Control Moment Gyro)が注目されている。CMGはジンバル軸に摩擦が存在するため、この摩擦の影響を実験的に調べる実験装置を製作し、ある制御パラメータのもとで姿勢角の制御結果にリミットサイクルと呼ばれる特有の振動現象が見られることを確認した。また、ジンバル軸の摩擦モデルから得られるリミットサイクルを解析し、解析式と実験結果が整合することを検証した。さらにリミットサイクルを抑制する制御方式を提案し、その効果を実験装置により実証した。

研究成果の概要（英文）：A control moment gyro (CMG) has become a popular device for an attitude control of spacecraft. However, the friction torque in the gimbal axis of the CMG may cause a small oscillation (limit cycle) of the spacecraft attitude. In order to examine the limit cycle, an experimental setup has been developed, and the limit cycle by the CMG is confirmed by the experiments. The limit cycle is also analyzed by using a describing function, and the good agreement between the experimental and analytical results is obtained. Furthermore, a method to suppress the limit cycle oscillation is proposed, and its effectiveness is also validated by the experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航法・誘導・制御，CMG，姿勢制御，リミットサイクル

## 1. 研究開始当初の背景

CMGとは回転するホイールの角運動量をジンバル軸回りに駆動トルクを発生させる装置のことで、高トルクを発生できる姿勢制御装置として近年注目を集めている。これまでは国際宇宙ステーションのような大型の宇宙機の姿勢制御装置として実用化されてきたが、観測衛星の姿勢制御の高速化にともない、中小型の宇宙機においても採用されつつある。す

でに米国のWorldViewや欧州のPleiadesのような小型で機動性の高い宇宙機ではCMGが搭載されて軌道上運用を行っている。これらはCMGの高トルクをいかして宇宙機を高速に姿勢変更させることが目的であり、このようなCMGを用いた高速姿勢変更の制御アルゴリズムについては数多くの研究がなされている。その一方でCMGを用いる場合の姿勢制御精度についてはこれまであまり研究がなさ

れていない。ところが、CMGを中小型の宇宙機に適用する場合には、CMGのジンバル軸に存在する摩擦の影響で、宇宙機の姿勢に周期的な運動（リミットサイクル）が発生する可能性がある。中小型宇宙機においては必ずしもその振幅が小さいとは限らず、CMGを用いた姿勢制御におけるきわめて重要な問題と考えられる。本研究では、このようなCMGのジンバル摩擦による姿勢のリミットサイクルを対象とする。

## 2. 研究の目的

CMGを用いた中小型宇宙機の姿勢制御の高精度化を達成することが本研究の最終的な目標であり、そのために、CMGのジンバル軸摩擦によるリミットサイクルに注目して、リミットサイクルの発生する条件、リミットサイクルの振幅と周波数、リミットサイクルを抑制するための制御方法などを明らかにする。とくに、リミットサイクルと宇宙機姿勢制御系のパラメータとの間の相関を調べ、簡単な解析式でリミットサイクルの性質を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験的方法

CMGのジンバル軸の摩擦に起因する宇宙機の姿勢のリミットサイクルを実験的に検証する。CMGのジンバル軸の摩擦は比較的小さく、この影響を実験的に調べる場合には、実験装置の有する摩擦やケーブルロストルクなどが支配的となり、ジンバル軸摩擦の影響を抽出するのは困難であった。ここでは図1に示すようなCMGによる宇宙機の姿勢制御実験装置を製作し、ジンバル軸摩擦の影響を地上実証可能なものとした。この装置は空気軸受で浮上することができ、浮上部にバッテリーや制御回路など制御に必要なものはすべて搭載しているため、鉛直軸回りの回転を拘束なしに行うことができる。この浮上部が宇宙機本体に相当し、宇宙機の姿勢角に相当する浮上部の回転角はエンコーダにより精度よく検出することができる。以上のような、拘束のない運動を高精度に計測できる装置で、リミットサイクルの地上検証が可能となる。

この実験装置によりCMGを用いた鉛直軸回りの姿勢制御実験を行い、宇宙機の姿勢におけるリミットサイクルの有無を実験的に検証する。

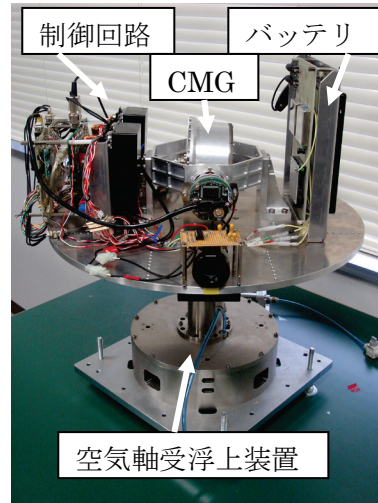


図1 CMGによる姿勢制御実験装置

### (2) 解析的方法

CMGのジンバル軸摩擦を考慮した姿勢制御系のブロック線図を図2に示す。この図で $\phi$ はCMGのジンバル角、 $\theta$ は宇宙機の姿勢角、 $h$ はCMGのもつ角運動量である。図でNとある部分がCMGのジンバル摩擦を含むジンバル部のダイナミクスを表す。ジンバル摩擦としてもっとも簡単な、大きさ一定のクーロン摩擦を対象にする場合にも、ジンバル角速度の符号によって符号が異なり、ジンバル静止時にはジンバル出力以上の摩擦力は働かない、などの非線形特性がある。そのため、この姿勢制御系の解析には、Nで示した部分をまとめて記述関数で表す方法を用いる。この方法により、この系でリミットサイクルが発生する条件や、リミットサイクルの性質を調べることができる。

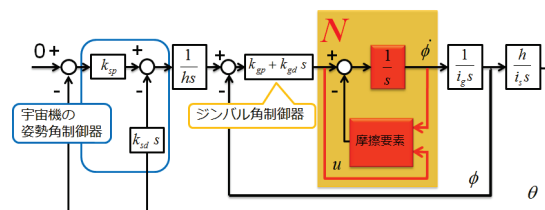


図2 CMGによる姿勢制御系のブロック線図

## 4. 研究成果

(1) 実験装置における角運動量保存則の確認  
CMGによる宇宙機の姿勢制御では、CMGのもつ角運動量と宇宙機のもつ角運動量の和は慣性空間で一定であり、CMGのジンバル角を傾けることによってCMGのもつ角運動量が慣性空間で変化した分は、宇宙機のもつ角運動量となる。この角運動量保存則をもとに実際の宇宙機の姿勢制御を行うために、CMGを用いた実験装置では角運動量保存則の成立していることが前提となる。そのため、実験装置の角運動量保存則の成立性について確認

した。その結果を図3に示す。この図において太線がジンバル角から求めた鉛直軸回りのCMGの角運動量の変化であり、細線が浮上部の回転角から求めた宇宙機のもつ角運動量の変化である。宇宙機のもつ角運動量は宇宙機の姿勢角の時間微分から求めているため、ノイズ状の信号が重畳している。この両者の一致が、実験装置の角運動量保存則の成立を意味する。この図からわかるようにCMGの角運動量の変化と宇宙機の角運動量変化はほぼ等しく、この実験装置において、鉛直軸回りの角運動量保存則が精度よく実現されていることがわかる。

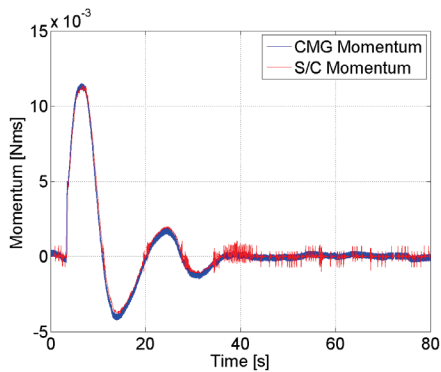


図3 実験装置の角運動量変化の比較

### (2) リミットサイクルの実験的確認

上記の実験装置を用いてCMGを用いた宇宙機の姿勢制御実験を行った結果、宇宙機の姿勢角に振動現象の見られることがわかった。この一例を図4に示す。

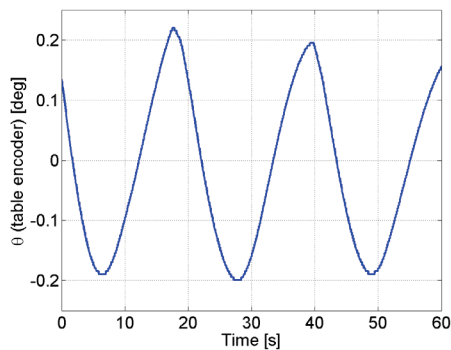


図4 実験的に観測されたリミットサイクル

この得られた姿勢角の振動が、CMGのジンバル摩擦に起因するリミットサイクルであることを検証するために、実験装置と同じパラメータで図2のブロック線図のシミュレーションを行った。この結果を図5に示す。この図に示すように実験装置で観測されたリミットサイクルはシミュレーションによるリミットサイクルと比較的似通った波形であり、観測されたリミットサイクルがCMGのジンバル摩擦に起因するものであると結論で

きる。

CMGのジンバル摩擦によって宇宙機姿勢に現れるリミットサイクルを地上実験で検証した例は世界的にもなく、本研究の成果といえる。

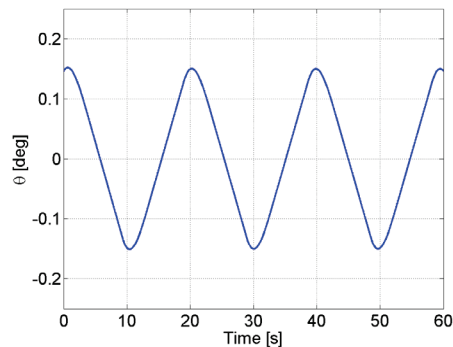


図5 シミュレーションによるリミットサイクル

### (3) リミットサイクルの解析的検討

リミットサイクルの実験的検証と並行して図2のブロック線図に対して記述関数法に基づくリミットサイクルの解析的検討を行った。その結果以下のことが明らかになった。

①図2のブロック線図においてジンバル軸にクーロン摩擦を仮定するとき、宇宙機姿勢角には安定なリミットサイクルが生じる。

②リミットサイクルの振幅と周波数は、ジンバル軸の角度制御系(図2で内側のループを形成している制御系)の時定数が、宇宙機の姿勢制御系(図2で外側のループを形成している制御系)の時定数よりも十分に短いという仮定のもとに、簡単な解析式で表すことができる。この結果によれば、リミットサイクルの周波数は、宇宙機の姿勢制御系の帯域と比例関係にあり、リミットサイクルの振幅は、クーロン摩擦の大きさとCMGの角運動量に比例し、ジンバル軸の角度制御系の帯域の2乗と宇宙機の姿勢制御系の帯域の1乗に反比例する。

③これらの結果は本研究を通して初めて導かれたものであり、宇宙機の姿勢に現れるリミットサイクルの振幅や周波数を推定できるため、宇宙機の姿勢精度に及ぼす影響を簡単に評価でき、工学的な利用価値が高い。

### (4) 実験結果と解析結果の比較

解析結果の妥当性を検討するために、宇宙機の姿勢制御系の帯域を変化させて実験を行い、得られたリミットサイクルの振幅と周波数を解析結果と比較した。振幅を比較した結果を図6に、周波数を比較した結果を図7に示す。いずれも横軸は宇宙機の姿勢制御系の帯域であり、点で示すのが実験結果、実線で示すのが解析結果である。これらの図から明らかのように、解析結果から得られるリミットサイクルの振幅および周波数は、ほぼ実験

結果と整合しており、解析式は妥当であると結論できる。

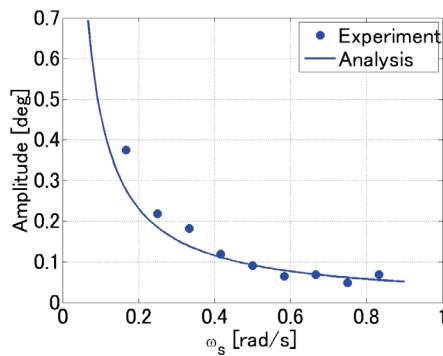


図6 リミットサイクルの振幅の比較

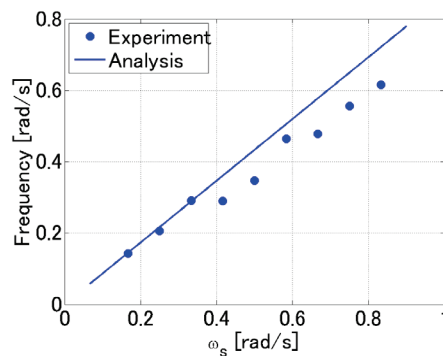


図7 リミットサイクルの周波数の比較

#### (5) リミットサイクルの抑制実験

CMGによる宇宙機の姿勢制御において宇宙機の姿勢にリミットサイクルが現れる場合に、その振幅や周波数が宇宙機の要求姿勢精度に対して無視できない場合には、リミットサイクルをなんらかの手段で抑制する必要がある。この抑制にはいろいろな手法が考えられるが、解析式からリミットサイクルの振幅とクーロン摩擦の大きさは比例することがわかるので、リミットサイクルの振幅が観測可能であれば、ジンバル軸に働くクーロン摩擦の大きさを推定することが可能になる。その場合、クーロン摩擦の影響をキャンセルするように、ジンバル軸駆動トルクを調整することで、リミットサイクルを抑制できると考えられる。この方法でリミットサイクルの抑制を行った実験結果を図8に示す。

この図は宇宙機の姿勢角の時間履歴を示し、リミットサイクルの生じている状況下で、その振幅からクーロン摩擦の大きさを推定し、時刻48[s]以降においてクーロン摩擦をキャンセルするように、ジンバル軸駆動トルクを調整したものである。図から明らかなように、宇宙機の姿勢角は、48[s]以降に若干の過渡応答を示すが、それ以降はほぼ0に収束しており、この方法を用いることで、宇宙機に生

じたリミットサイクルを抑制できることが実験的に示された。この方法は、原理的に単純なものでありながら抑制効果は顕著であり、実際の宇宙機にも適用しうる実用性に富んだものである。

以上、本研究により、CMGを用いる宇宙機の姿勢制御における、CMGのジンバル摩擦に起因するリミットサイクルについて、その影響の推定方法や抑制方法が明らかになった。これらの結果は、工学上応用価値の高いものである。

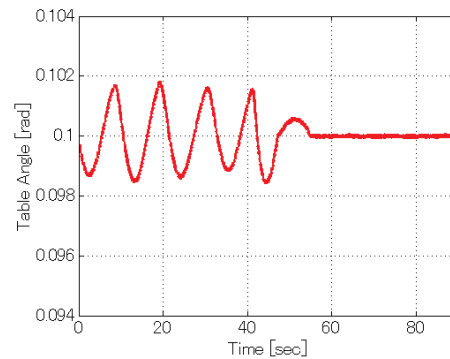


図8 リミットサイクルの抑制実験結果

#### 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1件)

- ① Y. Fujii, K. Yamada, T. Shima, Analysis and Suppression of Limit Cycle Oscillation Induced by CMG Gimbal Friction, Transactions of the Japan Society of Aeronautical and Space Sciences, 査読有, Vol.8, No. ists27 (2010), pp. Pd\_61-Pd\_67, DOI:10.2322/tastj.8.Pd\_61

[学会発表] (計8件)

- ① 服部友哉, 山田克彦, CMGのジンバル摩擦による宇宙機姿勢への影響の実験的評価, 計測自動制御学会第12回制御部門大会, 2012年3月16日, 奈良県文化会館
- ② 服部友哉, 山田克彦, CMGのジンバル摩擦による宇宙機姿勢への影響の実験的評価, 第55回宇宙科学技術連合講演会, 2011年12月1日, 愛媛県県民文化会館
- ③ T. Hattori, K. Yamada, R. Terabe, T. Kimata, Analysis and Experimental Validation of CMG Gimbal Friction Effects on Spacecraft Attitude Control, 28<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2011年6月7日, 沖縄コンベンションセンター
- ④ 寺部亮祐, 山田克彦, CMGのジンバル摩擦

による宇宙機姿勢への影響について，日本機械学会東海学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会，2011 年 3 月 10 日，豊橋科学技術大学

- ⑤ 寺部亮祐，山田克彦，CMG におけるジンバル摩擦の宇宙機姿勢への影響について，第 47 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会，2010 年 11 月 26 日，名城大学
- ⑥ 寺部亮祐，山田克彦，CMG におけるジンバル摩擦の宇宙機姿勢への影響について，第 54 回宇宙科学技術連合講演会，2010 年 11 月 18 日，静岡県コンベンションアーツセンター
- ⑦ 木全敏章，山田克彦，CMG のジンバル摩擦から生じるリミットサイクルの宇宙機の姿勢制御に対する影響について，第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会，2009 年 11 月 27 日，京都大学
- ⑧ 木全敏章，山田克彦，宇宙機の姿勢制御に対する CMG のジンバル摩擦の影響について，第 53 回宇宙科学技術連合講演会，2009 年 9 月 9 日，京都大学

[その他]

ホームページ等

<http://jupiter.nuae.nagoya-u.ac.jp/cmgh.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 克彦 (YAMADA KATSUHIKO)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号：30402481

### (2) 研究分担者

軸屋 一郎 (JIKUYA ICHIRO)  
名古屋大学・工学研究科・助教  
研究者番号：90345918

### (3) 連携研究者

吉河 章二 (YOSHIKAWA SHOJI)  
三菱電機(株)・先端技術総合研究所・専任  
研究者番号：40470322  
小出来 一秀 (KODEKI KAZUHIDE)  
三菱電機(株)・先端技術総合研究所・専任  
研究者番号：50470323