

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760156  
 研究課題名（和文） 次世代小型人工衛星のアジリティ向上および自律的制御系再構成法の提案  
 研究課題名（英文） Proposal of Autonomous Reconfiguration of Control System for Agile Small-Satellite  
 研究代表者  
 高橋 正樹 (TAKAHASHI MASAKI)  
 慶應義塾大学・理工学部・助教  
 研究者番号：10398638

## 研究成果の概要：

本研究では、実用可能で高分解能な観測センサを搭載した機動性の高い質量数百 kg～1t 程度の小型衛星に対して、高速姿勢変更と高精度指向制御という、相反する要求を同時に実現する姿勢制御系を提案することを目的とした。また、宇宙という過酷な環境において自律で運用するためにはサバイバビリティが必須となるため、冗長構成の姿勢制御用アクチュエータシステムにおける不具合が及ぼす運用へのインパクトを最小限に抑えるための自律的異常検知法の検討、自律的制御系パラメータ調整則の検討を行い、4CMG システムを例として自律的制御系再構成法の提案を行った。具体的なミッションを想定した数値シミュレーションにより提案手法の有効性を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,600,000	0	2,600,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	240,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：振動制御、人工衛星、自律的制御系再構成、コントロールモーメントジャイロ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、人工衛星のミッションは通信・放送、気象、地球観測、航行・測位加えて、小惑星探査や地球温暖化防止、災害監視などグローバルな地球環境モニタシステムなど複雑化・多様化している。このような実利用指向の高分解能ミッションについては高分解能化、アジリティ、すなわち、任意点観測の迅速化が姿勢制御系に対する技術的な課題となっている。さらに、多くの大型宇宙構造物

において、構造系の不具合により制御性能が劣化した事例が報告されている。従来、このような不具合への対処は地上局での情報処理が基本となるため、不具合要因の特定から制御系再構成まで時間を要し、運用性を大きく損ねるものであった。2000 年以降もはやぶさ等を初め、内外で軌道上不具合が発生しており、新しい制御系システムの提案や新たなホイール信頼性向上のための取り組みが必要となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、実用可能で高分解能な観測センサを搭載した機動性の高い質量数百 kg~1t 程度の小型衛星に対して、高速姿勢変更と高精度指向制御という、相反する要求を同時に実現する姿勢制御系を提案することを目的とする。具体的には、CMG を搭載した人工衛星の内部擾乱を考慮した高速姿勢制御則によるアジリティ向上手法を提案し、高速・低擾乱の姿勢コマンド生成も含めたミッションマネジメントアルゴリズムを開発する。さらに、宇宙機姿勢制御用アクチュエータシステムの自律的制御系再構成法を提案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

平成 19 年度は本研究の第一段階として位置づけられ、提案手法の実現性をボトムアップ的に検証するため、要素技術の検討および検証モデルの開発に努める。また、提案手法の検証や問題点の早期発見には実験装置が必要不可欠であることから、平成 19 年度の前半は理論解析・数値解析と並行して、現在、製作・開発段階にある図 4 に示す地球観測衛星実験装置の整備を行い、これをベースに今後の研究を進める。

平成 20 年度は本研究の第二段階として、第一段階の要素技術の更なる改良を行い、各要素技術の統合を図り、特に実験的検証を行う。また、地球観測衛星実験装置についても、平成 19 年度の結果を踏まえて改良を行う。第二段階では具体的に以下の項目について研究を行う。

1. 前年度の数値計算解析および実験検証結果を踏まえて、提案手法および実験装置の改良
2. 提案手法の有効性の実証実験
3. 各段階で得られた研究成果発表

## 4. 研究成果

平成 19 年度は、(1)~(3)に示す要素技術に関して、手法の提案と数値解析による有効性の検証を行った。

(1) CMG を搭載した人工衛星における、CMG ジンバルモータ部から生じる非線形ダイナミクスに起因する電気的および機械的擾乱や RW と同様のロータの質量アンバランスに起因する擾乱などの内部擾乱を考慮した高速姿勢制御則によるアジリティ向上手法の提案を行った。具体的な多点指向ミッションを設定し、シミュレーションによる提案手法のフィージビリティの検討を行った。

具体的には、CMG の可操作度を高め、かつジンバル軸の制御誤差による内部擾乱を抑制するように姿勢変更時の初期ジンバル角を最適化するものである。実際に姿勢変更を行う前の事前計算により最適化を行うこ

とで、搭載計算機のリソースを有効活用するものとした。制御フローを図 1 に示す。また skew 配置による 4CMG のダイナミクスをモデル化し、実際の地球観測ミッションに即した衛星姿勢変更指令値を与え本手法による CMG ジンバルの挙動を解析し、Bong Wie による既存の手法と比較することで多点指向制御におけるフィージビリティを検討した。

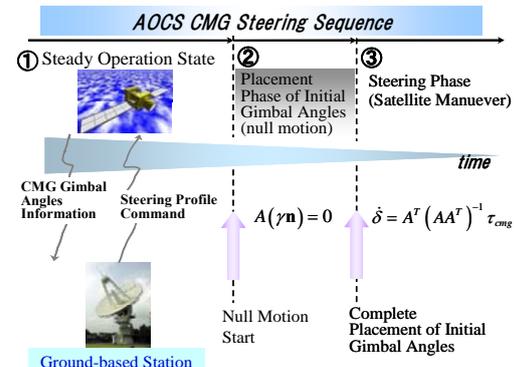


図 1 制御フロー

(2) コントロール・モーメント・ジャイロ (CMG) 搭載衛星による高速かつ高精度姿勢制御を実現することを目的として、高速・低擾乱の姿勢コマンド生成も含めたミッションマネジメントアルゴリズムの開発した。提案手法のコンセプトを図 2 に示す。さらに、周期的未知内部擾乱の実時間推定法を提案し、擾乱推定値を用いた内部擾乱除去フィルタにより内部擾乱の除去を行う手法を提案した。図 3 に提案手法の制御ブロック図を示す。具体的には、衛星のマヌーバ開始後に Kreisselmeier の適応観測器構成法を用いて、周期的未知擾乱を実時間推定する。マヌーバ終了後、擾乱周波数の推定値を用いて内部モデル原理に基づく能動的内部擾乱除去フィルタを構築し、フィードフォワード補償により内部擾乱の除去を行う。数値解析を行い、内部擾乱の実時間推定精度および擾乱除去制御の性能評価を行った。

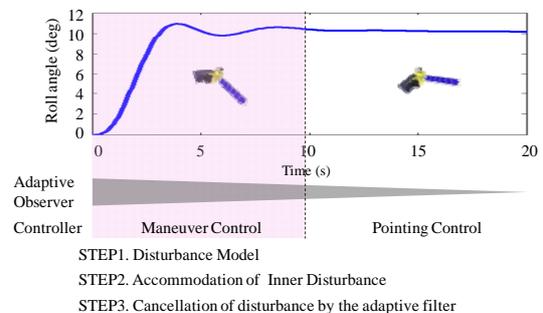


図 2 提案手法のコンセプト

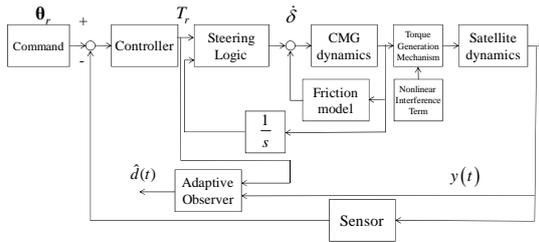


図3 制御ブロック

(3) 耐故障性を有する宇宙機姿勢制御用アクチュエータシステムの実現に向けて、代表的な非線形制御手法の一つであるスライディングモード制御手法を用いた劣駆動姿勢制御手法を提案し、アクチュエータ故障時であっても、残ったアクチュエータを用いて姿勢変更が可能であることを確認した。

具体的には、2基のCMGによる衛星の3軸姿勢制御の実現を目的とし、スライディングモード制御を用いた2基のCMGによる衛星の劣駆動姿勢制御手法を提案した。さらに、提案手法による衛星の3軸姿勢制御の検証を、z軸まわりの回転を含む4ケースのRest-to-Restマヌーバによる数値解析によって行う。図4~7にシミュレーション結果を示す。

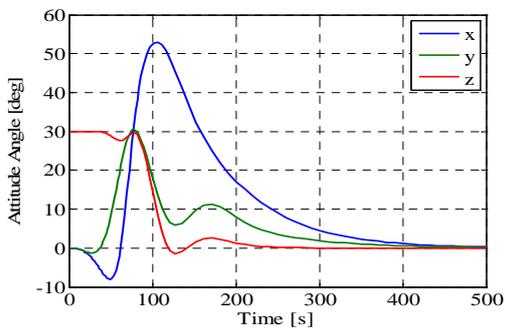


図4 衛星姿勢角の時刻歴 (Case1)

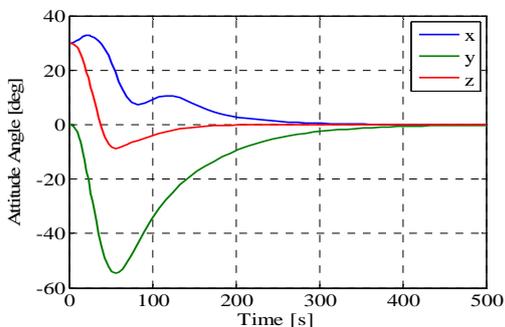


図5 衛星姿勢角の時刻歴 (Case2)

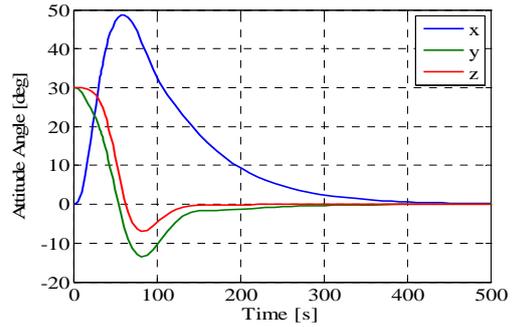


図6 衛星姿勢角の時刻歴 (Case3)

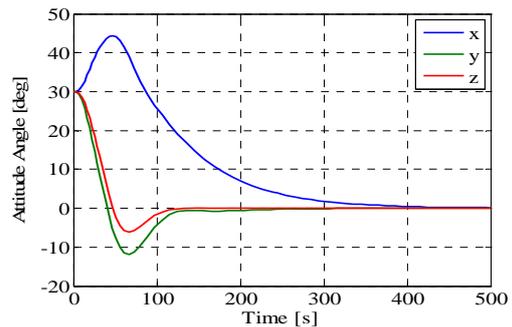


図7 衛星姿勢角の時刻歴 (Case4)

平成20年度は、宇宙機姿勢制御用アクチュエータシステムの自律的制御系再構成法の提案に関しては、構造振動や姿勢応答など構造系・制御系に関する各種モニタリングデータの時系列解析や設計データとの照合による自律的異常検知システムの検討と、検知した異常情報に基づき所要の制御帯域が確保されるように、制御系パラメータの再調整や制御モードの切り替えを自律的に行う方法について検討した。また、アジリティ向上に関しては、ミッション開始時に特異点および静定時の姿勢制御性能を総合的に評価する最適化計算により、ミッション開始時の各CMGの初期角度を決定する方法を提案した。さらに、耐故障性を有する宇宙機姿勢制御用アクチュエータシステムとして、スライディングモード制御手法を用いた劣駆動姿勢制御を提案し、4台のうち2台のCMGが故障した場合でも3軸の姿勢制御が可能であることを数値シミュレーションにより実証した。具体的な多点指向ミッションを設定し、提案手法をシミュレーションで試行することにより、有効性であることを確認した。

本申請課題の研究成果について、国内外の宇宙系会議において発表し、各分野の専門家と議論することで評価をしていただき、手法の優位点だけでなく、今後の課題についても明確にした。

## 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. 七森泰之, 高橋正樹, 衛星姿勢制御用コントロールモーメントジャイロの初期ジンバル角最適化ステアリング則, 日本機械学会論文集 C 編, 074 巻 747 号, (2008 年 11 月), pp.2698-2704.

[学会発表] (計 10 件)

1. 楠田洋一郎, 高橋正樹, 吉田和夫, FBA による入力最適化を用いた CMG 搭載衛星の高速マヌーバ制御に関する研究, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会講演論文集, 淡路島, (2008 年 11 月 5 日), (1C18), pp.237-242.
2. Yoichiro Kusuda, Masaki Takahashi and Kazuo Yoshida, Energy Optimal Path Planning of Satellite Attitude Maneuver Using Control Moment Gyros, 59th International Astronautical Congress, (2008 年 10 月 3 日), SECC, Glasgow, Scotland, IAC-08.C1.8.12.
3. Masaki Takahashi, Naofumi Kinjo, Shigemune Taniwaki, Yoshidaki Ohkami and Kazuo Yoshida, Disturbance Isolation Platform Design Method for Reaction Wheel to Control Satellite Attitude, The 9th International Conference on Motion and Vibration Control, September 15 - 18, 2008, Technische Universitaet Muenchen, Campus Garching/Munich, Germany (2008 年 9 月 17 日), 1308.
4. Masaki Takahashi, Yasuyuki Nanamori and Kazuo Yoshida, Rapid Multi-target Pointing and High Accuracy Attitude Control Steering Law of Variable Speed Control Moment Gyroscopes, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hawaii Convention Center, (2008 年 8 月 8 日).
5. Y. Kusuda, M. Takahashi, Energy Optimal Path Planning of Satellite Attitude Manuever Using Control Moment Gyros, Proceedings of the 18th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, Japan, (2008 年 7 月 29 日).
6. 七森泰之, 高橋正樹, 谷脇滋宗, 吉田和夫, 狼嘉彰, VSCMG を用いた地球観測衛星の高精度多点指向ステアリング則, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会アブストラクト集・DYNAMICS & DESIGN CONFERENCE 2007 (D&D2007), 広島, (2007 年 9 月 25 日), CD-ROM Proceedings(411)
7. Yasuyuki Nanamori, Masaki Takahashi, Shigemune Taniwaki Yoshiaki Ohkami and Kazuo Yoshida, Singularity Avoidance of Control Moment Gyros using optimization of initial gimbal angles and application to multi target pointing for satellite attitude control, 2007

AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, (2007 年 8 月 21 日), AAS07-398.

8. Masaki Takahashi, Seiichi Shimizu, Shigemune Taniwaki, Yoshiaki Ohkami and Kazuo Yoshida, Internal Disturbance Accommodation Filter of Control Moment Gyros with Adaptive Observer, 2007 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, (2007 年 8 月 21 日), AAS07-339.
9. 高橋正樹, 清水誠一, 谷脇滋宗, 狼嘉彰, 吉田和夫, 適応オブザーバを用いたコントロール・モーメント・ジャイロの内部擾乱除去フィルタ, 第 10 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集 (MOVIC2007), 東京, (2007 年 8 月 11 日), No.07-13, pp.394-399 (3223).
10. 七森泰之, 高橋正樹, 谷脇滋宗, 狼嘉彰, 吉田和夫, 初期ジンバル角最適決定ステアリング則によるコントロール・モーメント・ジャイロの動作解析と衛星多点指向制御への適用, 第 10 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集 (MOVIC2007), 東京, (2007 年 8 月 11 日), No.07-13, pp.388-393 (3222).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 正樹 (TAKAHASHI MASAKI)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号: 10398638

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし