

## ETS-VIII 軌道上制御実験

### On-Orbit Attitude Control Experiments of ETS-VIII

誘導・制御技術グループ	大谷 崇、巳谷真司
飛行システム技術開発センター	濱田吉郎
構造技術開発センター	山口 功、葛西時雄、井川寛隆
Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group	Takashi Ohtani, Shinji Mitani
Flight Systems Technology Center	Yoshiro Hamada
Structure Technology Center	Isao Yamaguchi, Tokio Kasai, Hiroataka Igawa

#### Abstract

A case study on advanced attitude control experiments of ETS-VIII is reported in this paper. ETS-VIII is scheduled to be launched on a H2A launch vehicle in 2006. In this experiment, spacecraft attitude control techniques for MIMO parameter-varying system will be tested on-orbit using advanced control theory such as gain-scheduling control, and so on. The purpose of this experiment is to establish the control system design method for extremely precise attitude control of large scale flexible spacecraft.

#### 1. はじめに

2006年度にH2Aロケットで打上予定の静止3トン級大型柔軟構造衛星ETS-VIII (Fig.1)では、後期利用段階における軌道上制御実験の検討が、現在行われている。本実験では、先端制御理論を用いた多入出力系、パラメータ変動のある衛星姿勢制御技術の実証試験を行い、次世代衛星開発に資する高精度姿勢制御系設計法を確立することを目的としている。本稿では、この次世代姿勢制御実験の平成17年度研究成果の概要について報告する[1]。本研究では、誘導・制御技術グループのJAXA客員として、電気通信大学の木田隆教授および長塩知之助手を招聘している。

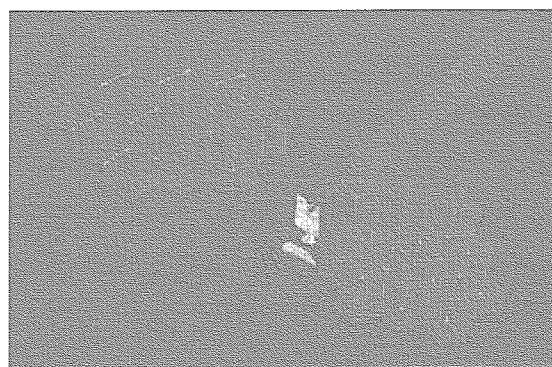


Fig.1 Overview of ETS-VIII

#### 2. 研究の概要

制御理論は、状態空間法が確立されて以来、現在までに飛躍的な進歩を遂げ、産業界において、より大規模で複雑なシステムに適用され成功を収めている。我が国の宇宙開発分野でも、ALFLEXのロバスト制御、M-Vロケットでの $\mu$ 設計法の適用など種々の成功事例がある。しかし、我が国の衛星姿勢制御技術を翻ってみると、現在の三軸衛星姿勢制御技術は、4半世紀前のETS-III以降、PID制御を代表とす

る古典制御理論が依然適用され続けており、その意味において古典制御による衛星姿勢制御技術は、既に十分な技術の蓄積がなされ、枯れた技術と表現することができる。

また近年、地球観測衛星や科学衛星分野において、姿勢制御精度よりも姿勢決定精度、高安定性への要求が高くなってきている。姿勢決定精度への要求はセンサの高性能化によって、ある程度満たすことができ、高安定性については、制御帯域外の高周波擾乱をどう抑えるかが問題でありコントローラとの関連はあまりなく、低周波領域での安定性も従来の古典制御で十分対応可能であった。そのため、現在まで先端的な制御理論が導入されてこなかったとも言える。

しかし、今後、MIMO 系やパラメータ変動にロバストな設計要求をされ、高精度かつ複雑化・柔軟化した衛星や、高速マヌーバを要求される衛星が登場すると、従来の古典制御では対応しきれない可能性が高いと考えられる。

今までの姿勢制御系設計法は、いずれも基本はPID 制御であり、あるいはそれと併用して進み遅れ補償と高周波数帯域のゲインを低減させるローパスフィルタで構成される古典制御である。このような設計法は、SISO 系にしか本質的に適用できない欠点がある。ETS-VIII でも、ロール・ピッチ・ヨー軸の軸間の動的な干渉を比較的小さいと仮定して、同様の古典的な設計法を使用し、姿勢制御要求を満たしているが、これらの手法は、いずれ限界になると考えられる。

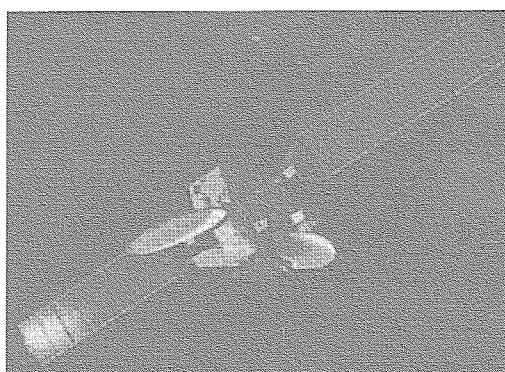


Fig.2 ETS-VI 軌道上形態

上述のような背景をもとに、ETS-VI (Fig. 2) では、当時最先端の制御理論であったロバスト制御を、軌道上での実証試験により世界に先駆けて実施し、この分野における我が国の技術力を示すことができた[7]。実証したのは以下の4つである。

- (1) 周波数整形 LQG
- (2) ロバスト安定度指定法を用いた  $H_\infty$  制御
- (3) DVFB 制御を併用した  $H_\infty$  制御
- (4) パラメータ誤差に対して2次安定な  $H_\infty$  制御

しかし、ETS-VI の実験結果は大きく分けて、以下の2つの理由により、ETS-VIII のような大型衛星への適用を行うに十分な実証ができたとは言えず、軌道上実証すべき課題として現在まで残されている。

- (1) MIMO 系としての制御系設計
- (2) 太陽電池パドルの回転によるモードパラメータ変動に対するロバスト安定化

また、現在、JAXA 宇宙科学研究本部と国立天文台を中心として構成される次期スペース VLBI ワーキンググループからスペース VLBI 計画「ASTRO-G (Fig. 3)」が提案されている[8]。ASTRO-G は、ETS-VIII と同じ構造の大型展開アンテナを搭載した電波望遠鏡衛星である。VSOP-2 では、観測周波数が高いため、アンテナの指向精度は、0.005deg 以下となることが要求されている。

さらに、位相補償観測を行うため、高速スイッチングマヌーバ機能が要求されている。一例として、3deg の姿勢変更を所要時間 15 秒で実施してすばやく振動を収束させ、1 分周期で指向方向を往復することを繰り返し、これを数時間にわたって継続するという機能の実現が求められている[9]。

このような高速マヌーバ機能を実現するための制御アルゴリズムは新規開発項目であるとともに、他の衛星においてもニーズが高いため、ETS-VIII の制御実験により目標姿勢変更の実験ケースも実施する予定である。

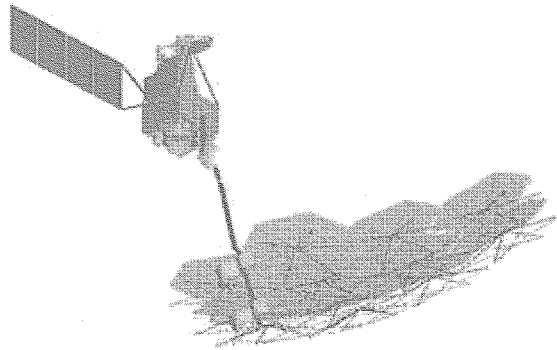


Fig.3 ASTRO-G 軌道上形態

ETS-VI で残された課題、高速マヌーバに対する近年のニーズを踏まえて、ETS-VIII 制御実験では、世界で初めて MIMO 系、パラメータ変動のある衛星姿勢制御技術の軌道上実証を行い、実験に成功すればそのまま実用に供することが可能となる。これにより、我が国の衛星姿勢制御技術が世界最先端のものとなると同時に、ミッション内容が姿勢制御技術に制限されない衛星設計を行うことができ、より高性能の衛星を設計することが可能になると考えられる。

### 3. 成果の概要

#### (1) 制御アルゴリズムの検討

[A] ゲインスケジューリング制御：パドル回転による低周波数領域のモーダルパラメータの変動に応じて、制御則の (A, B, C, D 行列) を変化させる方法である。制御則の各行列はパドル回転角の関数として記述される[2][3][4]。

制御系設計時には、剛体および一次振動モード以外の高次モードは、全て摂動として扱っている。これら高次振動モードに対して安定性を保ち、かつ入力飽和を起こさないことを設計方針としている。設計に用いる一般化プラントを Fig.4 に示す。 $\Pi(\theta)$  は低次元化された制御対象、 $\Gamma(\theta)$  が導出する制御器であり、 $W$ 、 $\kappa$ 、 $\Lambda$ 、 $\eta$  が設計の際の可調整パラメータである。 $W$  は摂動として扱われる高次振動モードを十分カバーするように設定した。パドル回転角  $\delta$  の関数となる制御器は、スプライン型二次形式を用いたゲインスケジューリング制御系設計手法に基づいて設計を行なう。この手法では、制御対象の状態空間表現は、パラメータに関する区分線形な関数で記述される必要がある。本衛星モデルでは、パドル回転角に対する依存性が、対称性を持つ(0~90 度の範囲を考えれば十分である)ことを考慮して、設計は 0~90 度の範囲で行ない、この回転角範囲を 8 等分した区分線形モデルを用いて設計を行なった。

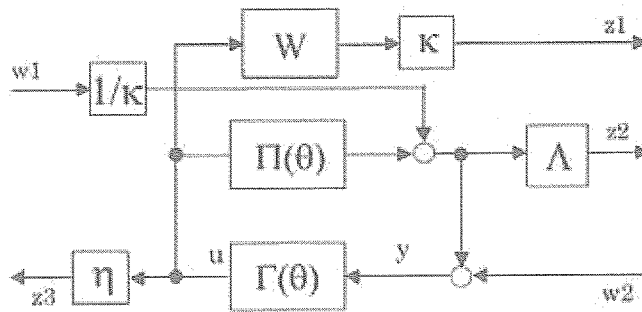


Fig. 4 制御器設計のための一般化プラント

[B] 受動性を使った制御： 衛星本体の姿勢角度と角速度の観測量に  $3 \times 3$  の定数行列ゲインをかけてフィードバックする。高域では位相が  $90$  度進むようなシステムになる [5] [6]。

制御系の基本構成として、Feed-back 制御器と Feed-forward 制御器を組み合わせた二自由度制御系を採用する。二自由度制御系では、Feed-forward 制御系への参照入力が存在しない場合には、Feed-back 制御系のみが機能することになる。そこで、Feed-back 制御系には、閉ループ系の安定化、及び、外乱抑制性能の向上に関する機能を、また、Feed-forward 制御系には、目標値追従性能の向上に関する機能を、それぞれ設計指標として与え、要求される制御仕様を達成できる制御系を構築する。設計にあたっては、まず、制御対象のパラメータ値を固定したノミナルモデルに対して、LTI (Linear Time Invariant) Feed-back 制御器を設計し、その後、制御対象と Feed-back 制御器からなる LPV システムに対して、LPV Feed-forward 制御器(ゲインスケジュール制御器)を設計する。なお、制御器設計は連続系に対して実施し、その結果を近似離散化して実装する。

ここで、制御対象の伝達関数が対称な構造となるとき、同様に対称な構造を持つ制御器を適用し、閉ループ系を非パラメトリックに安定化する制御手法がある。Feed-back 制御器の設計にあたっては、この手法を適用し、LPV システムのモデル変動、及び、広帯域振動モードに対してロバスト安定性を保証する制御系を構築する。なお、対称な制御器としては、DVDFB (Direct Velocity and Displacement Feed-back) 制御器、または、DDFB (Dynamic Displacement Feed-back) 制御器を用いた二つの制御系を扱い、双方とも、 $H^\infty$  制御系設計法の枠組みの中で、外乱抑制性能を設計指標とする最適化を行う。

また Feed-forward 制御系は、目標値追従性能の向上を目的として、上述した Feed-back 制御系に対して、その安定性を損なうことなく付加的に構築する。制御器の設計においては、モデルマッチング手法を適用し、予め設定した規範モデル、及び、二自由度閉ループ系のそれぞれおける参照入力から観測出力までの  $H^\infty$  ノルムについて、それらの差分が最小となるように最適化を行う。なお、その際、制御対象が LPV システムであることを考慮し、ポリトピックシステムを利用した  $H^\infty$  ゲインスケジュール制御設計法を用いて制御器を設計し、モデルマッチングの精度向上をはかる。

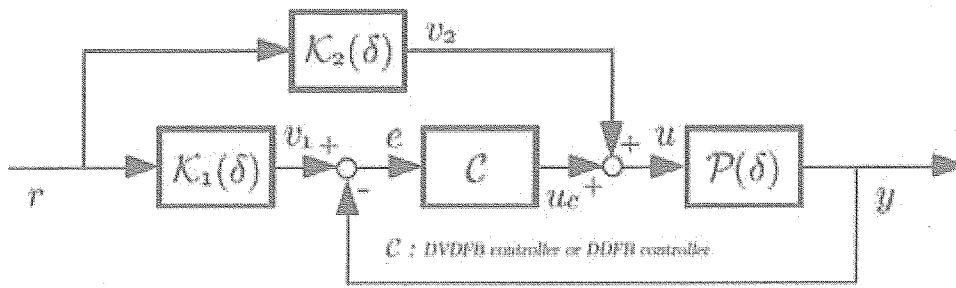


Fig. 5 2自由度制御系

[C] 古典制御：チェックアウトフェーズにおいて、ETS-VIIIの全系軌道上形態での柔構造特性のシステム同定試験によって得られたパラメータを用いて、PD制御+高域ロールオフフィルタによるゲインチューニングを行い、地上での同定結果よりも高精度に制御できることを確認する。また上述の各種パラメータ変動に対するロバスト制御との比較評価も行う。

(2) 制御アルゴリズムの実装方法の検討

搭載実験用制御アルゴリズムは、制御則計算部のみをスイッチングにより置き換えられるように実装する。これにより、制御実験において異常が発生した場合には、既存の故障検知システムを使用して、バス系の制御アルゴリズムに戻せるようにする。なお、制御則計算部の範囲は、姿勢決定フィルタから各軸の姿勢角および姿勢角速度を受け取って、ホイールコマンド分配則計算部へ各軸のトルクコマンドを受け渡すまでである。(Fig. 4)

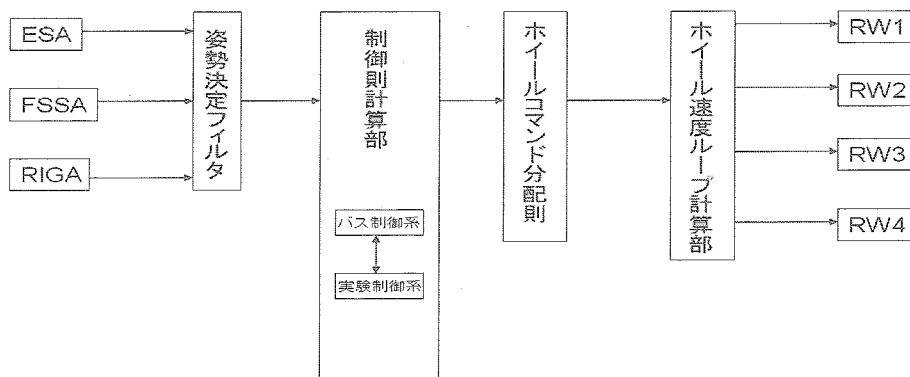


Fig. 4 実験時の姿勢制御系ブロック図

制御実験用搭載ソフトウェアの設計においては、数種類の状態方程式(A, B, C, D 行列)を記憶して、これらから簡単な演算によって制御則を計算できるように設計する。これにより、複数の制御アルゴリズムによる設計結果の搭載ソフトウェアへの反映が容易となるように配慮する。

#### 4. まとめ

本稿では、2006 年度に打上予定の大型柔軟構造衛星 ETS-VIII を用いて、全系軌道上形態での先端制御理論を適用した次世代高精度姿勢制御実験計画について述べた。

本実験で提案する手法は、ETS-VIII のみならず柔軟構造物を有する一般的な衛星に対して有効であり、本実験の実施によって、次世代大型通信衛星など高精度姿勢制御を要求される柔構造衛星はもちろんのこと、ASTRO-G などスイッチングマヌーバを要求される高機能衛星等に必須となる姿勢制御技術を確立することができると考えている。

また、最終的には、次世代衛星開発におけるバス技術、姿勢制御系の標準として定着化を図ることが本実験の目指すべきところであると認識している。

#### [参考文献]

- [1]大谷崇, 濱田吉郎, 木田隆, 長塩知之: 技術試験衛星 VIII 型による次世代姿勢制御実験の検討, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会, 広島, 2005
- [2]濱田吉郎, 大谷崇, 木田隆, 長塩知之: 技術試験衛星 VIII 型へのゲインスケジューリング制御の適用, 第 48 回自動制御連合講演会, 長野, 2005
- [3]濱田吉郎, 山口功, 木田隆: パラメータに対し区分的線形なスケジューリングゲインを有する制御系の設計法, 第 5 回計測自動制御学会制御部門大会資料, pp833-836, 2005
- [4]杉田秀彦, 濱田吉郎, 山口功, 葛西時雄, 木田隆, 長塩知之, 児子健一郎: パラメータ変動のある大型柔軟衛星のロバストゲインスケジューリング制御, 日本機械学会論文集 (C), 69-678, pp. 112- 119, 2003
- [5]長塩知之, 山田和弘, 木田隆: 対称性を利用した大型衛星のロバスト制御, 計測自動制御学会論文集, 39-4, pp. 1-7, 2003
- [6]柴田舞子, 椋木祥吾, 木田隆, 長塩知之, 大谷崇, 濱田吉郎: 対称な低次元  $H_{\infty}$  制御器を用いた技術試験衛星 VIII 型の姿勢制御, 第 48 回自動制御連合講演会, 長野, 2005
- [7]木田隆, 山口功, 千田有一, 関口毅: 宇宙構造物のロバスト制御の実験的検討一きく 6 号による軌道上実験結果一, 計測自動制御学会論文集, 33-7, pp. 639-647, 1997
- [8]平林久, 名取通弘ほか: 次期電波天文衛星 (VSOP -2) 計画, 第 1 回宇宙科学シンポジウム, pp. 67-86, 神奈川, 2001
- [9]望月奈々子, 橋本樹明, 坂井真一郎, 二宮敬虔, 村田泰宏: VSOP-2 における高速スイッチングマヌーバの検討, 第 4 回宇宙科学シンポジウム, pp. 149-152, 神奈川, 2004