

ETS-VIII軌道上同定実験

On-Orbit System Identification Experiments of ETS-VIII

構造技術開発センター	山口 功, 葛西時雄, 井川寛隆
飛行システム技術開発センター	濱田吉郎
誘導・制御技術グループ	巳谷真司, 大谷 崇
ETS-VIIIプロジェクトチーム	池田正文, 臼井基文, 砂川 圭
Structure Technology Center	Isao Yamaguchi, Tokio Kasai, Hiroataka Igawa
Flight Systems Technology Center	Yoshiro Hamada
Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group	Shinji Mitani, Takashi Ohtani
ETS-VIII Project Team	Masafumi Ikeda, Motofumi Usui, Kei Sunagawa

Abstract

This report describes the studies on the on-orbit system identification experiments using ETS-VIII (Engineering Test Satellite-VIII). ETS-VIII will be launched by H-IIA launch vehicle in fiscal year 2006. ETS-VIII has large-scale, flexible Large Deployable Reflectors and Solar Array Paddles. The results of the on-orbit system identification experiments evaluate the on-orbit flexible characteristics and contribute to the design of the control system for the next large satellite. The establishment of the robust attitude control technology for large-scale flexible satellite is aimed at through the attitude control experiment.

1. はじめに

平成 18 年度打上げ予定の ETS-VIII (技術試験衛星 VIII 型) は、大型展開アンテナ・太陽電池パドルといった大型柔構造物を持つ衛星である。柔構造物の姿勢運動へ与える影響が大きいことを考えると、柔構造特性を正確に測定することは有益である。しかし、衛星全系軌道上形態での柔構造パラメータを地上試験で計測することは不可能である。そこで、ETS-VIII のチェックアウトフェーズ～定常運用フェーズ初期段階において衛星全系軌道上形態での柔構造特性のシステム同定実験を計画している。これにより、設計時に見積もった柔構造特性を事後評価し、将来の柔構造衛星の制御系設計に反映できる。また、ETS-VIII の後期利用段階において柔構造パラメータが変動するシステムにも対応可能なロバスト姿勢制御アルゴリズムを適用した姿勢制御実験を行って、将来の柔構造衛星の姿勢制御技術の確立を図る。

本研究は、平成 10 年度より航空宇宙技術研究所と宇宙開発事業団の共同研究[1]として実施しており、三機関統合後 JAXA となった現在に至るまで検討を継続している[2]。また、本研究では、誘導・制御技術グループの客員として、電気通信大学の木田隆教授を招聘している。

2. 研究の概要

平成 14 年度には、軌道上柔構造特性同定実験における加振ケースについて、衛星シミュレータを用いて地上評価用データを取得し、同定実験のための加振を行っても衛星が姿勢喪失することのないことを確認した。平成 15 年度には、少ないチャンネル数の情報に基づいて衛星の姿勢制御コマンドや状態量を再現するための ACFS ツールや、衛星管制情報システム(SCi)とのデータインタフェースツールを整備した。平成 16 年度には、柔構造特性同定実験をチェックアウトフェーズで実施するためのチェックアウト手順書(案)を整備し、衛星追跡管制システムの同定実験に関するデータインタフェース試験方法について検討した[3]。平成 17 年度には、ACFS ツールとデータインタフェースツールの統合化を行い、

ソフトウェアとして一体化された。また ETS-VIII の軌道上数学モデルを拘束モードモデルとして直接同定する手法について検討を行った [4] [5]。

3. 成果の概要

(1) 同定実験概要

打ち上げから定常運用初期において、衛星が加振される前後の時間帯における HK データ、Dwell ダンプデータ、LEM 加速度計データを取得し、これらのデータに基づいて軌道上全系での柔構造特性を同定する。様々な同定実験の結果を比較して、同定手法の評価を行う。また、この同定結果と地上試験に基づく推定結果とを比較し、設計時の柔構造特性の推定手法の評価を行う。さらに、地上での柔構造特性の推定誤差に起因する制御性能劣化が発生するなど、必要な場合には同定結果を用いて制御系のチューニングを行うことができると考えられる。

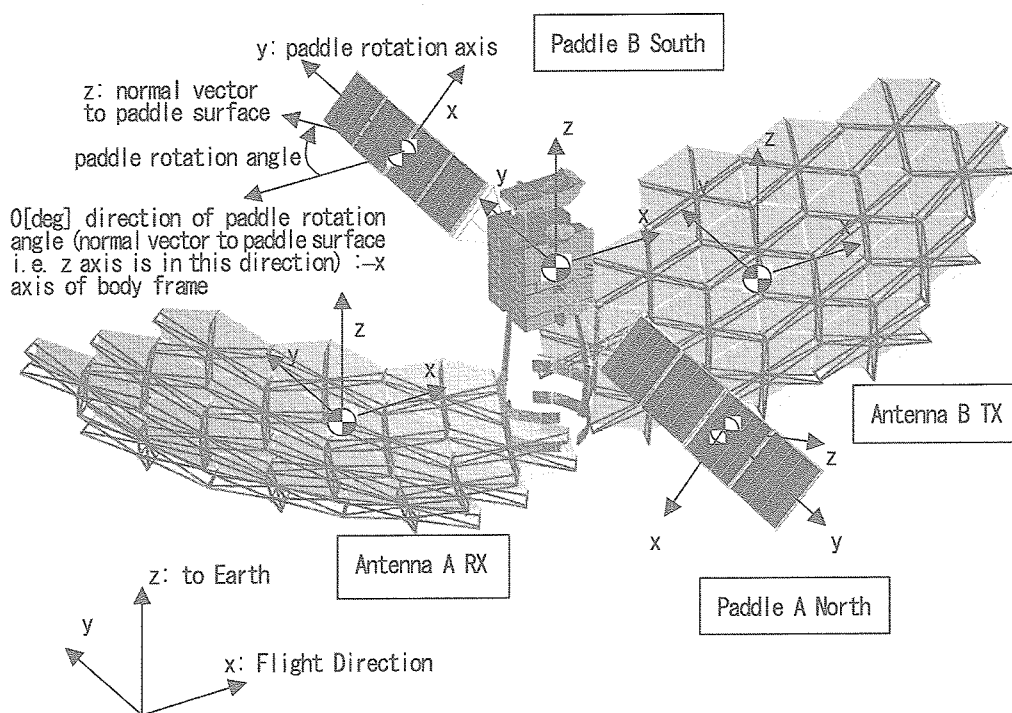


Fig.1 ETS-VIII configuration

図 1 に ETS-VIII の軌道上形態と各種座標系の定義を示す。柔構造同定のために必要な物理量は、トルクコマンド・並進力コマンド・衛星姿勢角・衛星姿勢角速度・加速度である。これらは、Dwell チャンネルを利用して取得される。三軸制御衛星の同定アルゴリズムでは入力と出力の計 6 チャンネルが同定実験に利用できるのが理想である。しかし、Dwell ダンプではテレメトリチャンネルとして 4 チャンネルしか利用できないため、衛星の三軸の推定レート(角速度)とトルクコマンド(静止化軌道制御時はピッチ推定姿勢角)のみを取得する。この Dwell ダンプデータからオフライン処理によって柔構造同定に必要な衛星状態量(トルクコマンド・スラストコマンドなど)を再現して、これらの衛星状態量と LEM 加速度計データを用いて柔構造同定を行う。

(2) 同定実験ケース

表 1 にチェックアウトフェーズでの同定実験ケースについてまとめる。なお、チェックアウトフェーズが終了し、定常運用フェーズに移行した初期段階においても LEM 加速度計が使用可能な限り、データ

を取得する機会が存在する。定常運用フェーズ初期段階においては、ホイールアンローディング時、東西軌道制御（ステーションキーピング）時、アレイトリム時、蝕入り・蝕明け時などにおいてデータ取得が可能と考えられる。

Table.1 Event cases for identification experiment in the check-out phase of ETS-VIII

SOCP 番号	イベント	イベント概要	計測時間	DWELL CH1 割り当て(*)
ACS03	軌道制御 FF トルク調整	定常姿勢制御モードにおいて東西軌道制御のためにスラスタを噴射する。	軌道制御中 および 前後 10 分程度	ピッチ トルクコマンド
ACS06	柔構造同定実験支援 1 (静止化軌道制御)	ドリフト軌道中の軌道制御モードにおいて静止化軌道制御のためにスラスタを噴射する。	軌道制御中 および 前後 10 分程度	ピッチ 推定姿勢角
ACS07	柔構造同定実験支援 2 および BTH 機能確認	定常姿勢制御モードにおいて No. 2～9 のスラスタをマニュアル噴射する。	スラスタ噴射中 および 前後 10 分程度	ピッチ トルクコマンド
ACS08	アンローディング パラメータ調整	定常姿勢制御モードにおいてホイールアンローディングのためにスラスタを噴射する。	アンローディング中 および 前後 10 分程度	アンローディング 対象軸 トルクコマンド
ACS12	定常バイアス機能確認	定常姿勢制御モードにおいて、ロール・ピッチ軸を±0.05 度ステップ駆動させる。	姿勢バイアス中 および 前後 10 分程度	姿勢バイアス 対象軸 トルクコマンド

(*) Dwell の CH2～CH4 にはそれぞれロール、ピッチ、ヨーの推定姿勢角速度を割り当てる。

(3) ACFS ツール

ACFS ツールは、ETS-VIII 搭載姿勢制御系 (ACFS) が軌道上で生成するスラスタ噴射コマンドやトルク駆動コマンドを地上で全く同一に復元するためのソフトウェアである [3]。ACFS ツールは搭載制御則と搭載姿勢決定フィルタ、ホイールロストルクモデル等で構成され、関連 HK テレメトリと Dwell 16Hz の 3 軸推定姿勢レートを入力として、スラスタ噴射コマンドやホイール駆動コマンドを出力する。太陽電池パドルは通常のクロックモードで回転することを想定しているが、任意の LST 時刻で実験が可能なように対応している。実験データ処理フローを図 2 に示す。またこのツールにより復元された 16Hz のアクチュエータ指令コマンドと Dwell テレメトリから得られた 16Hz の推定姿勢レートが同定対象のプラントの入出力関係となり、これらの情報を用いてシステム同定を行うことでプラント単体の数学モデルを同定することが可能となる。図 2 において ACFS ツールへの入力信号 (図中の ACFS 用 Dwell ファイル) と出力信号 (ACFS 再現ファイル) が、それぞれ軌道上システム同定の際の出力と入力に対応する。

ACFS ツールの妥当性検証のため、数値シミュレーションを行った。ここでは SOCP 番号 ACS06 のドリフト軌道中の静止化軌道制御モードにおける姿勢角ヒストリとスラスタ噴射パターンを図 3 で比較している。図は上段がロール、ピッチ、ヨーの姿勢角、中段が姿勢レート、下段がスラスタ No. 3, 4, 5 の噴射パターンを表し、左側はレファレンス値 (青)、右側はツール出力値 (赤) である。ツールへは左側中段の赤い破線で囲まれた姿勢レートが入力となる。ツール出力値はスラスタパターンが完全に一致しており、十分な精度を有していることがわかる。

(4) 拘束モードモデルでの同定

数値例として SOCP 番号 ACS07 のスラスタ機能確認ケースを取り上げる [4]。このケースでは定常制御中に姿勢制御用・東西軌道制御用スラスタ 8 式を順番にインパルス噴射 (噴射時間 62.5ms) させ、加振を

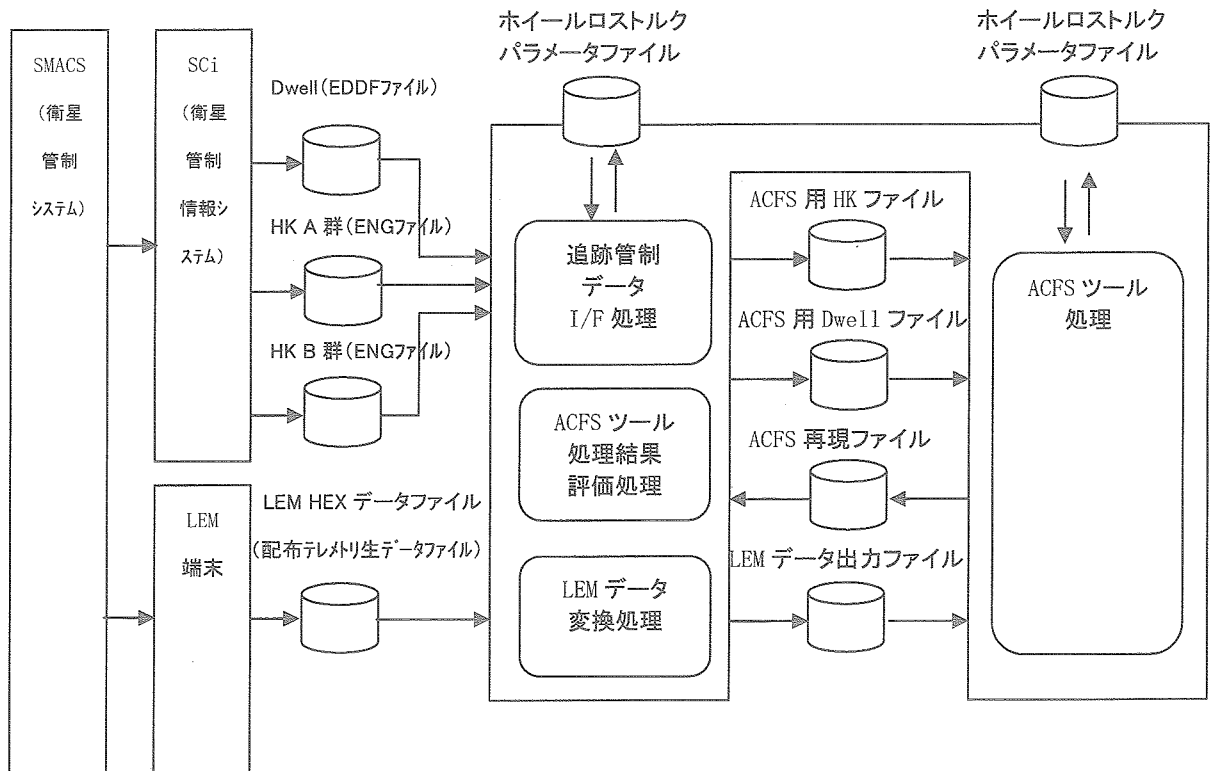


Fig.2 Configuration of ACFS Tool

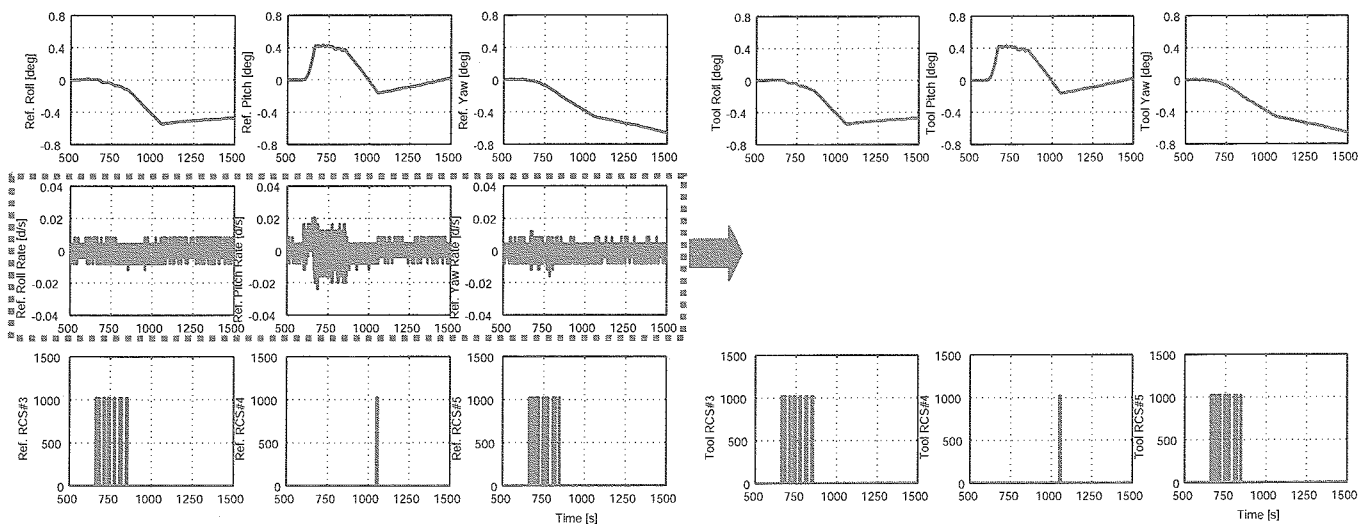


Fig.3 Numerical example of simulation data(left) and ACFS Tool output(right)

行った。柔構造物全体で 34 個の拘束モードから構成された解析モデル用いた数値シミュレーション結果を図 4 に示す。観測量は構体並進加速度および姿勢角速度とし (サンプリング周波数 16Hz), 観測ノイズは考慮していない。文献[5] の手法を用いて同定された拘束モードモデルの固有振動数・モード減衰比と剛体質量行列を用いて再構築したモデルの伝達関数とノミナルモデルの伝達関数の比較を図 4 に示す。理想的なシミュレーションのため各パラメータは非常に高い精度で同定されている。同定された

拘束モードパラメータおよび両者は図上では一致している。上記の拘束モードモデルの同定結果では、個々の拘束モードがどの付属構造物の拘束モードに対応するかの情報は得られてない。このモード識別のためには、付属構造物上に取り付けられた加速度計信号や振動モード形状の解析情報を利用する必要がある。

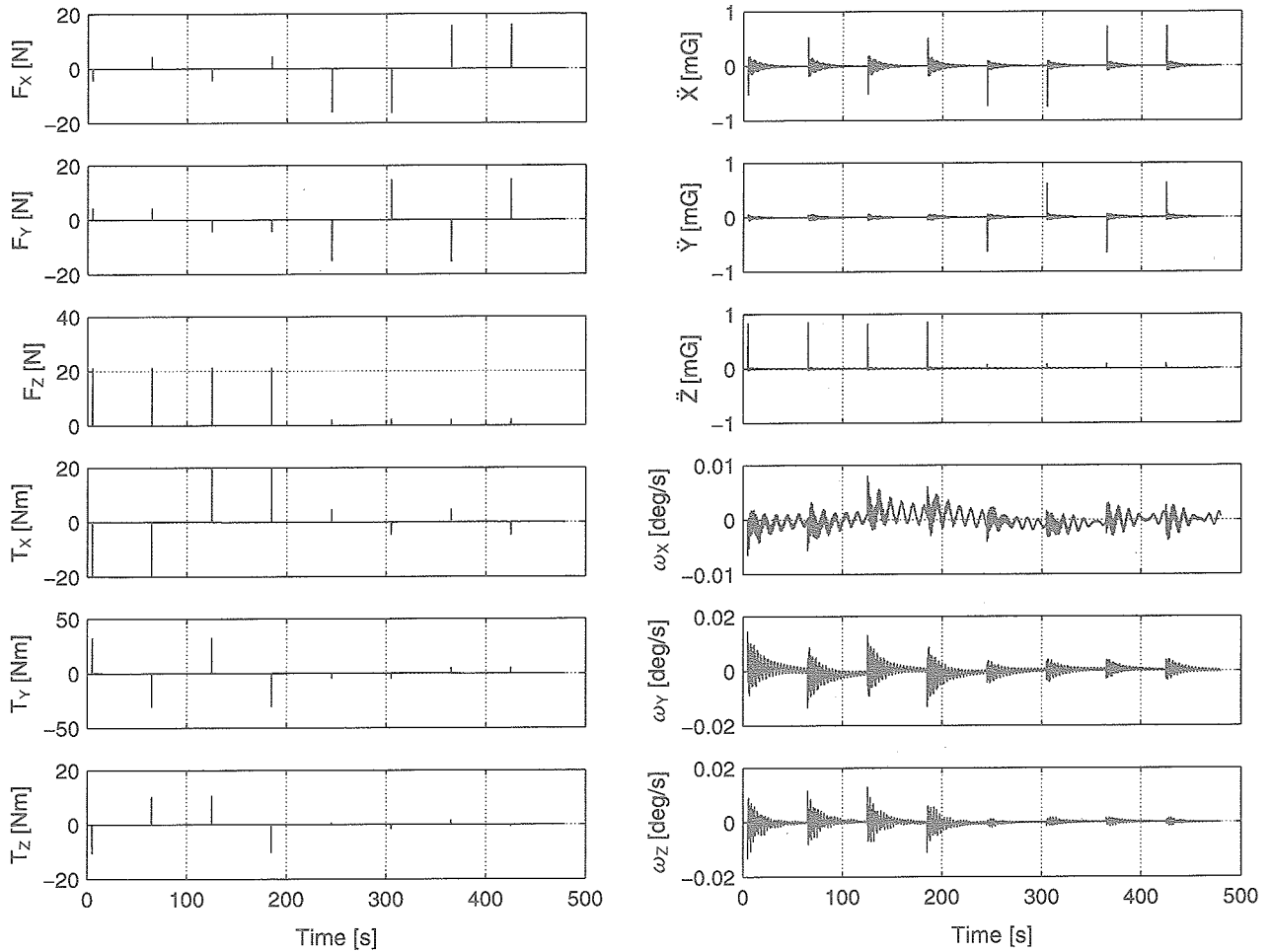


Fig.4 Simulation of impulse responses, from left top, translational forces and rotational torques, from right top, translational accelerations and attitude rates

4. まとめ

表 3 に ETS-VIII 軌道上実験検討のスケジュールを示す。ETS-VIII を用いた軌道上柔構造同定実験については、実験計画の立案、実験手順書(チェックアウト手順書)および同定実験に必要なツールの整備を行い、衛星追跡管制システムの同定実験に関するデータインタフェース試験を実施した。これにより、同定実験の運用準備を進め、平成 18 年度の衛星打ち上げ・実験に備える。

参考文献

- [1] NAL-NASDA 共同研究成果報告書：柔構造特性の同定方法及び制御に関する研究，平成 13 年 3 月。
- [2] 宇宙航空研究開発機構研究開発報告：柔構造特性の同定方法及び制御に関する研究，JAXA-RR-04-007，平成 16 年 12 月。

[3] 平成 17 年度 ETS-VIII軌道上柔構造特性同定実験のための運用準備 (その 2) 成果報告書, 三菱電機株式会社, 平成 18 年 2 月.

[4] 葛西ほか: 技術試験衛星VIII型による軌道上柔構造特性同定の検討, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 17 年 11 月.

[5] 葛西, 山口: 拘束モードモデルの軌道上同定, 日本機械学会論文集 C 編第 71 巻第 712 号, 平成 17 年 12 月.

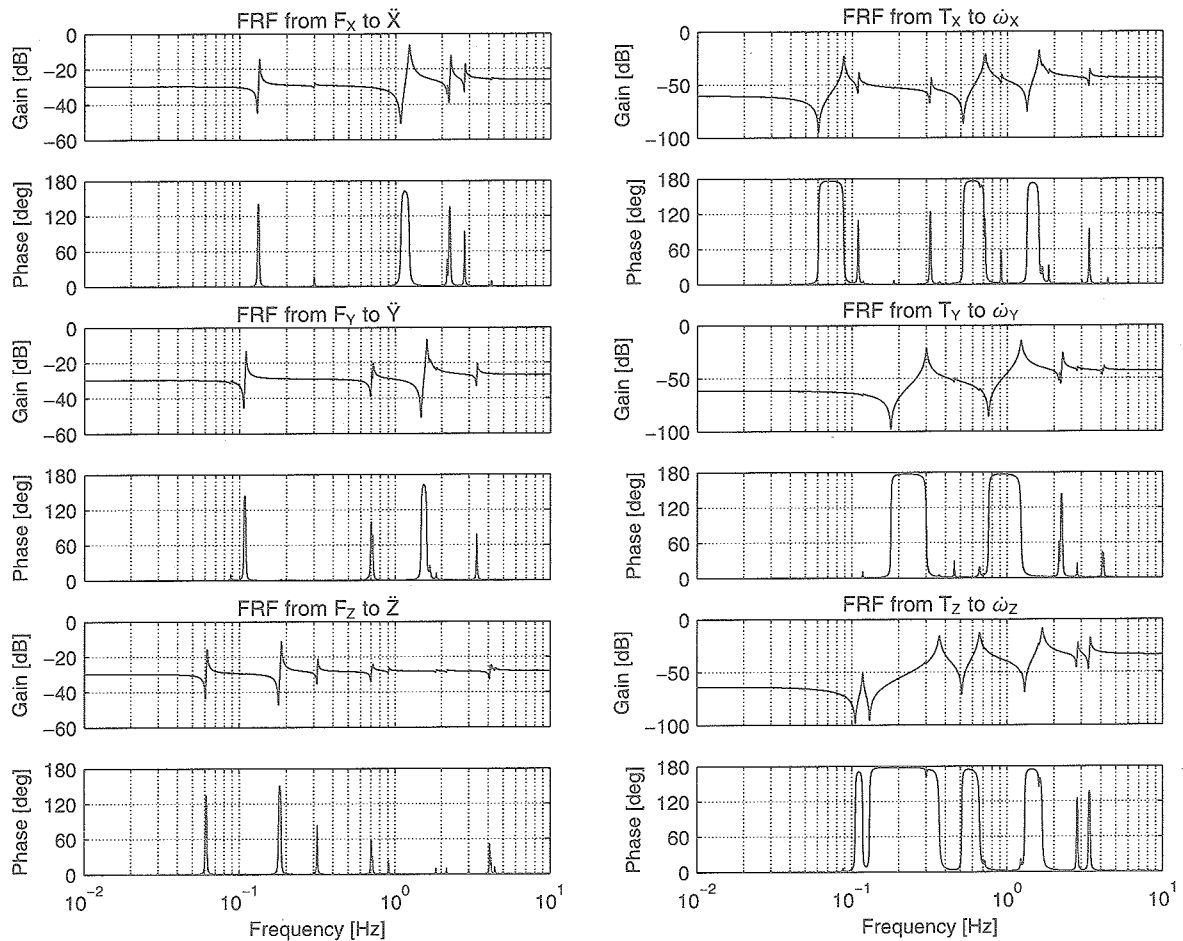


Fig.5 FRFs of nominal reference model(dotted line) and reconstructed constrained modal model(solid line) in numerical simulation example

Table.3 schedule of ETS-VIII on-orbit system ID experiments

年度	1999 (H11)	2000 (H12)	2001 (H13)	2002 (H14)	2003 (H15)	2004 (H16)	2005 (H17)	2006 (H18)	2007 (H19)	2008 (H20)	2009 (H21)	2010 (H22)	
								△ 打上			△ 後期利用段階		
同定 実験	← 実験システム設計			← 同定実験	← 実験手順書整備	← ツール改修	← ツール整備	← ツール改修	← 実験運用支援	← 同定実験データ取得	← 評価解析		
制御 実験					← 制御系設計		← シミュレーション	← オンボードS/W作成	← I/F試験	← 実験手順書作成・運用準備		← データ取得	← 評価解析
										SCLT			