

技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) 搭載ロボットアームの ダイナミクスに着目した制御実験

Flight Experiment of Space Manipulator Dynamics Mounted on ETS-VII

橋詰 健一*, 吉田 和哉*, D. ネンチェフ**,
小田 光茂***, 稲場 典康***

Kenichi Hashizume*, Kazuya Yoshida**, Dragomir Nenchev**,
Mitsushige Oda***, Noriyasu Inaba***

*東北大学, **弘前大学, ***宇宙開発事業団

Tohoku University

キーワード : 技術試験衛星 VII 型 (Engineering Test Satellite-VII; ETS-VII), 無人口ロボット衛星 (Unmanned Robot Satellite), 衛星姿勢制御 (Satellite Attitude Control), 無反動マニピュレーション (Reactionless Manipulation), 一般化ヤコビ行列 (Generalized Jacobian Matrix; GJM)

連絡先 : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学大学院 航空宇宙工学科専攻
吉田 和哉, Tel.: (022)217-6992, Fax.: (022)217-6992, E-mail: yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. まえがき

東北大学と宇宙開発事業団との共同研究として, 1999年9月30日に技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) を用いて, 搭載ロボットアームの軌道上実験を行う機会を得ることができた. 本稿では軌道上実験結果の一部を紹介し, 実験結果を衛星のキャプチャーパーシングに適用した場合のシミュレーション検討について述べる.

2. ETS-VII の追加ロボット実験 について

世界初の無人宇宙ロボット試験衛星 ETS-VII は, 宇宙開発事業団 (NASDA) により開発され,

1997年11月28日に種子島より H-2 ロケットにより打ち上げた. 同試験衛星では, 軌道上マニピュレーション技術およびランデブ・ドッキング技術の技術実証を目的とし, さまざまな実験が行われた. 1999年5月, 当初計画されていたすべての実験が成功裏に終了したのち, 学術的な目的から追加ロボット実験の機会が大学等の研究機関に提供されることとなった. 東北大学の宇宙ロボット研究グループでは, 以前から ETS-VII のフライトデータを基にダイナミクスパラメータの検証やいくつかの姿勢制御法に関するダイナミクスシミュレーションなどを行ってきた. そこで, これらの制御方法の実証実験をするのにまたとない機会として, 1999年9月30日に, ETS-VII 追加ロボット実験が

実施された。

なお ETS-VII は 1999 年 11 月 29 日に最後のロボット実験を無事終了した。

3. 実験の目的

近い将来、フリーフライング無人ロボット衛星は軌道上で様々なサービス活動が期待されているが、搭載ロボットアームの反動と衛星の姿勢運動がダイナミックに干渉する点が、自在なマニピュレーションに対する制約条件になることが指摘されている。しかし、ロボット衛星全体のダイナミクス特性を十分に考慮したマニピュレーションを行うならば、ダイナミックな干渉を非干渉化することや、干渉を逆に有効利用したマニピュレータ/衛星姿勢制御の総合的な制御を行うこともできる。今回、ETS-VII を用いたフライト実験を行うという貴重な機会を用いて 4 つの制御方法を実際に検証した。その実験項目は以下の通りである。

- 1) 反動ゼロ空間 (RNS) に基づく衛星の姿勢に外乱を与えないマニピュレーション
- 2) 一般化ヤコビ行列に基づくアーム先端を慣性系に対して軌道追従させる制御法
- 3) 衛星姿勢にバイアス値を持たせることによりアーム反動による姿勢変動を小さくする協調制御法
- 4) 非ホロノミック軌道計画法に基づくアームと衛星姿勢の最終値制御

本稿では、これら 4 つの実験うち、最初の 2 つについて述べる。

4. 実験の概要

4.1 反動ゼロ空間 (RNS) に基づくマニピュレーション

ETS-VII には 6 自由度のマニピュレータが搭載されており、アーム動作の反動によって衛星本体

に反動外乱を生じる。通常は、アームを極力ゆっくりと動かすことにより反動外乱が大きくなるようにつとめ、生じてしまった反動に対しては、衛星姿勢を PID フィードバック制御を行うことにより姿勢の回復を行っている。したがって、アーム動作の直後には次の作業に移る前に、姿勢の回復待ちをしなければならない。

これに対し、反動ゼロ空間という概念を用いることにより、ベースに姿勢外乱を生じないようなロボットアームの操作が可能なが指摘されており、このようなアーム動作は無反動マニピュレーションと呼ばれる [1]。

まずは、無反動マニピュレーションの導出について整理する。ロボットアームを含む衛星系全体の運動量を P 、角運動量を L とすると、その保存式は以下のように書くことができる。

$$H_s \begin{pmatrix} v_0 \\ w_0 \end{pmatrix} + H_m \dot{\phi} = \begin{pmatrix} P \\ L \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 v_0, w_0 は衛星本体の速度、角速度であり、また H_s, H_m は慣性行列である。

ここで、角運動量にだけ着目して式を変形すると、以下を得る。

$$\tilde{H}_s w_0 + \tilde{H}_m \dot{\phi} = L \quad (2)$$

いま、系全体の初期運動量 L はゼロであると仮定する。衛星本体を回転させないためには衛星の角運動量はゼロを保たなければならない。つまり、関節角速度は次式を満たす必要がある。

$$\tilde{H}_m \dot{\phi} = 0 \quad (3)$$

一方、搭載アームの先端姿勢速度と関節角速度との間には、ヤコビ行列を用いて以下の関係式が導かれる。

$$J_w \dot{\phi} = w_h \quad (4)$$

(3)(4) 式を連立することにより、次式を得ることができる。

$$\begin{pmatrix} J_w \\ \tilde{H}_m \end{pmatrix} \dot{\phi} = \begin{pmatrix} w_h \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで $J = [J_w^T, \hat{H}_m^T]^T$, $\dot{x} = [w_h^T, 0^T]^T$ のように記号を置き換えると, 6×6 の正方行列 J を用いて, ベースへの無反動性を維持しつつ手先姿勢を制御する運動学関係式を得ることができる.

$$J\dot{\phi} = \dot{x} \quad (6)$$

J が特異状態にないときは, その逆行列をとって,

$$\dot{\phi} = J^{-1}\dot{x} \quad (7)$$

によって, ベースの無反動性とハンドの姿勢に対する指令条件を満たす関節角速度が求められる. なお, この際の手先の位置を規定することはできない. 軌道上実験では, 上の式を用いて, 実際の作業上において重要性の高いアクセスポイントを起点とする無反動動作について動作試験を行った.

4.2 アーム先端を慣性系に対して軌道追従させる制御法

一般化ヤコビ行列 [2] と呼ばれる宇宙ロボット用に拡張されたヤコビ行列を用いることにより, アーム先端を慣性系に対して位置決めや, 軌道追従させることができることが知られている.

まず, 一般化ヤコビ行列の導出について確認する. 衛星上に搭載されるロボットアーム先端の運動学関係式は, 次のように書くことができる.

$$\dot{x}_h = J_m\dot{\phi} + J_s\dot{x}_s \quad (8)$$

ここで,

$$\dot{x}_s = \begin{pmatrix} v_0 \\ w_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

はベース速度である. とところで先の (1) 式は \dot{x}_s とアームの動作速度 $\dot{\phi}$ との関係式を示している. いま, (1)(8) 式を連立して \dot{x}_s を消去すると, \dot{x}_h と $\dot{\phi}$ を直接関係付ける式を求めることができる.

$$\dot{x}_h = J_g\dot{\phi} \quad (10)$$

$$J_g = J_m - J_sH_s^{-1}H_m \quad (11)$$

なお, 上の導出において $P = L = 0$ を仮定した.

ここに定義される J_g を一般化ヤコビ行列 (Generalized Jacobian Matrix; GJM) といい, アームの反動によるベースの位置・姿勢変動にもかかわらず, それを補償したアームの手先制御を行うことができる.

なお, ETS-VII の軌道上実験では, 慣性空間に固定された基準点を得ることができないため, 慣性系に対する位置決め制御のデモンストレーションは難しいが, アーム姿勢を慣性系に固定し手先を常に静止状態に保つデモンストレーションは可能である. 実験では, ハンド姿勢を地球の輪郭 (エッジ) 方向に向けつつマニピュレーションを行う動作を検証した.

5. 実験結果と考察

5.1 無反動マニピュレーションの実験

無反動ゼロ空間 (RNS) に基づく無反動マニピュレーションの実験結果を Fig1 に示す.

上段のグラフは手先速度の大きさを示したもので, 中段は衛星本体上に生じる外乱角運動量を, 下段は衛星本体の姿勢変動である. 図中には3つのアーム動作が示されているが, 1番目の動作は通常のPTPモーションであり, 2, 3番目の動作が無反動マニピュレーションである. 2番目の動作の手先速度を1/2にしたものが3番目の動作である. 実験動作は, 衛星姿勢がPIDフィードバック制御されている状態にて実施した.

理論的にはRNSに基づく無反動マニピュレーションは衛星姿勢に対して完全に非干渉である. しかし実際には多少の外乱角運動量が生じてしまった. これは主に命令値と実行動作とのずれによるものであると考えられる. しかしながら, 無反動マニピュレーションでは, 手先速度がほぼ同じ通常のPTP動作に比べて外乱角運動量は1/6程度に, また衛星の姿勢変動は1/7程度になっていることが読み取れる. また, 通常のマニピュレーションの後には姿勢回復のため1分以上待たなければ

ならないが、無反動マニピュレーションの場合にはほとんど姿勢静定待ちを必要としないことが明らかとなった。

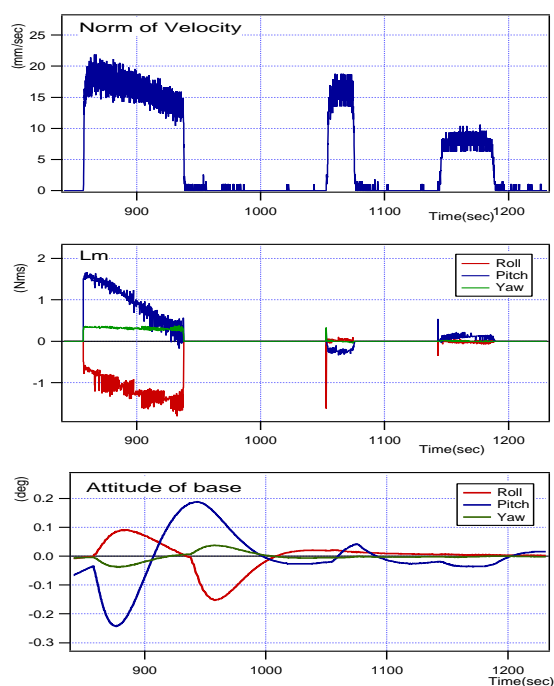


Fig. 1 Result of RNS manipulation

5.2 一般化ヤコビ行列を用いたの制御実験

一般化ヤコビ行列を適用してアームを動作させる制御実験の結果を Fig2 に示す。本実験は、衛星の姿勢制御を切ったフリードリフト状態にて実施した。上段がマニピュレーション中の衛星座標系からみたハンドのピッチ角，中段が衛星ピッチ姿勢角の変動を示している。下段は上段と中段の和であり、慣性系からみたハンドの姿勢をあらわしている。マニピュレーション中のベースの外乱運動にもかかわらず、アーム先端は ± 0.1 度の範囲内で、姿勢が一定に保たれていることがわかる。

6. まとめと今後の課題

今回の実験では、これまで理論的に提唱されてきた無反動マニピュレーションや一般化ヤコビ行

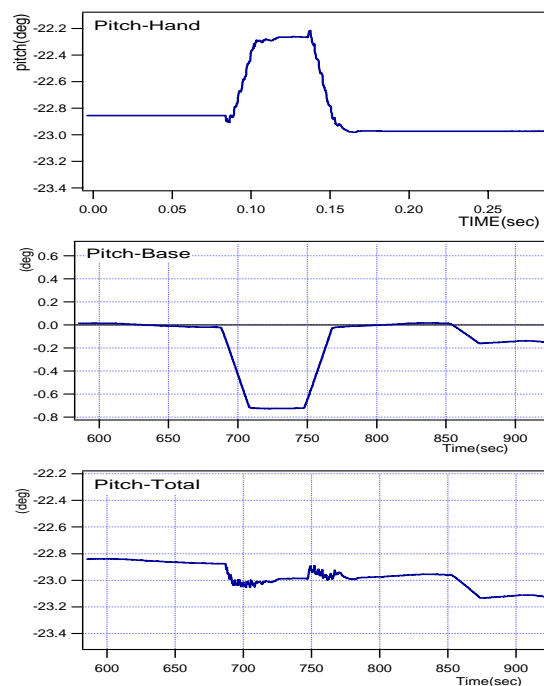


Fig. 2 Result of GJM manipulation

列を用いた宇宙ロボットの制御法の有効性を示すことができた。

軌道上実験によって検証された制御手法を用いて、今後は、宇宙ロボットによるターゲット衛星の捕獲制御を想定したシミュレーション検討をすすめてゆく予定である。

参考文献

- 1) 藤島 幸一：'技術試験衛星 ETS の運動学・力学解析', 東北大学修士論文, 1999.
- 2) 吉田 和哉：'宇宙用ロボット・マニピュレータの運動制御', 東京工業大学博士学位論文, 1990.