

フリーフライング宇宙ロボット (ETS-VII) における 無反動マニピュレーションの可能性

A Proposal of Reactionless Operations for ETS-VII

○吉田 和哉* D. N. ネンチェフ**

○Kazuya Yoshida* and D. N. Nenchev**

*東北大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻

*新潟大学 工学部 機械システム工学科

*Department of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku University

*Department of Mechanical and Production Engineering, Niigata University

キーワード : フリーフライング宇宙ロボット (free-flying space robot), 技術試験 VII 型 (ETS-VII), ロボットマニピュレータ (robotic manipulator), 衛星姿勢運動 (satellite attitude dynamics), 無反動動作 (reactionless motion)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉01 東北大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 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

宇宙ロボットと自動ランデブドッキング技術の試験衛星である宇宙開発事業団の技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII)¹⁾²⁾ は, 平成9年11月28日に H-II ロケットによって打ち上げられ, 現在順調に運用が続けられている. 同衛星による軌道上実験は平成11年5月末日までの間に以下の内容のものが予定されている.

ロボット実験

- 遠隔制御実験
- 軌道上サービス実験
- 衛星姿勢とアームの協調制御実験
- 国立研究機関 (MITI, CRL, NAL) の実験

- 外国宇宙機関 (DLR, ESA) と NASDA との共同実験

ランデブ・ドッキング実験

- FP1~FP6 の各フライトパスの実験

また, 上記の実験が首尾よく終了し, なおかつ衛星寿命に余裕がある場合には, 後期利用の発展実験の可能性が指摘されている. そのような発展実験の可能性の一つとして, 本稿では搭載ロボットアームの無反動動作の可能性について検討する.

2. 衛星への反動に留意したマニピュレータ動作

ETS-VII のようなフリーフライング型の宇宙ロボットでは, 搭載マニピュレータの動作反動によ

る姿勢変動は無視することができない。特に静止軌道上のデータ中継衛星 (TDRS) を経由してコマンド送信/テレメトリや画像の受信を行う場合にはハイゲインアンテナを使用し、そのポインティング精度はおよそ1度以下である。よって、アームの動作反動によって衛星姿勢が1度以上揺らぐことになれば、通信が途絶し運用ができなくなってしまう。

衛星の姿勢を維持するために、ETS-VIIには3軸リアクションホイールおよびガスジェットスラストが搭載されており、またマニピュレータの動作反動を予測してフィードフォワード的に姿勢制御をおこなう協調制御モードも組み込まれており²⁾、これまでに予想通りの性能を発揮している。

もうひとつの興味として、反動が小さくなるようにマニピュレータの動作軌道を工夫できないか、という考え方がある。これまでにいくつかの興味深い研究が知られているが³⁾⁴⁾、理論的な可能性の指摘にとどまっている。筆者らも「無反動動作」というマニピュレーションの方法についてこれまで理論的な解析を続けてきたが⁵⁾、以下ではETS-VIIにおけるミッションを具体的な対象とした無反動動作について検討する。

3. ダイナミクスの定式化

ETS-VIIをフリーフライングベースとその上に搭載される6自由度剛体マニピュレータシステムとして定式化する。マニピュレータハンドに外力が作用しないとき、運動方程式は以下のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_b & \mathbf{H}_{bm} \\ \mathbf{H}_{bm}^T & \mathbf{H}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_b \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b \\ \mathbf{c}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_b \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで

$$\dot{\mathbf{x}}_b \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{v}_b \\ \boldsymbol{\omega}_b \end{bmatrix}$$

ベースの並進速度、姿勢角速度、 $\boldsymbol{\phi}$ は関節変位である。 \mathbf{F}_b はスラストによりベースに作用する力

でありここではゼロと仮定する。また、 $\boldsymbol{\tau}$ は関節トルクである。

外力が作用せずに系全体の運動量・角運動量が保存される時、(1)式の積分が存在し、系全体の重心まわりの角運動量は以下のように表される。

$$\mathbf{L}_g = \tilde{\mathbf{H}}_b \boldsymbol{\omega}_b + \tilde{\mathbf{H}}_{bm} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (2)$$

また、ベースからみたマニピュレータハンドの並進速度・角速度を

$$\dot{\mathbf{x}}_h \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{v}_h \\ \boldsymbol{\omega}_h \end{bmatrix}$$

とすると、その運動学関係は、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_h \\ \boldsymbol{\omega}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_v \\ \mathbf{J}_\omega \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (3)$$

となる。

4. 無反動動作

(2)式について考える。

$$\tilde{\mathbf{H}}_{bm} \dot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{0} \quad (4)$$

を満たす解

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} = (\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{H}}_{bm}^+ \tilde{\mathbf{H}}_{bm}) \boldsymbol{\xi} \quad (5)$$

は系の角運動量およびベースの姿勢を変化させない。よって、(5)式で与えられる関節運動はベースの姿勢を変化させない「無反動動作」を生成する。

ETS-VIIの場合、搭載マニピュレータは6自由度であり(5)式が生成するベース姿勢の無反動空間は3自由度である。よって、3自由度分の冗長性がある。そこで、マニピュレータ、ハンドの位置または姿勢に関する運動学関係式と連立し、

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_{bm} \\ \mathbf{J}_v \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\phi}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{v}_h \end{bmatrix} \quad (6)$$

もしくは

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_{bm} \\ \mathbf{J}_\omega \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\phi}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega}_h \end{bmatrix} \quad (7)$$

を考える。この両式の左辺の行列はいずれも 6×6 の正方行列となり、両者をまとめて

$$H\dot{\phi} = x \quad (8)$$

と書くことにする。正方行列 H の逆行列ではなく、余因子行列を用いると特異点によらずに常に安定した解が得られることが知られている⁶⁾。

$$\dot{\phi} = k \cdot \text{adj}(H)x \quad (9)$$

ただし k は任意の定数であり、特異点近傍でない場合には $k = 1/\det(H)$ とすれば、上式はふつうの逆行列解を与える。

以上の解析の結果として、方程式 (6) を (9) の手法によって解いた場合には、マニピュレータハンドの位置を任意に制御しながらベースに無反動な動作を行う運動が得られ、一方、方程式 (7) を (9) の手法によって解いた場合には、マニピュレータハンドの姿勢を任意に制御しながらベースに無反動運動が得られる

5. シミュレーション

ETS-VII のシミュレーションモデルを Fig.1 に示す。

ここでは、搭載アームの基準姿勢から、ハンドを下向きにして ORU を掴む準備に至る動作を、無反動的に実現する動作を (7) 式を用いて計算した。その結果を Fig.2 に示す。同図の一番下段が無反動動作実現のための関節軌道であり ($\phi_1 \sim \phi_6$)、上段がこのときのベースの並進運動、中段が姿勢運動を示している。ベースはわずかに並進運動するものの、姿勢変動はゼロであることがよくわかる。

6. あとがき

本稿では、反動零空間および余因子行列法組み合わせてフリーラインロボットのベース姿勢を変化させない無反動マニピュレーションを得

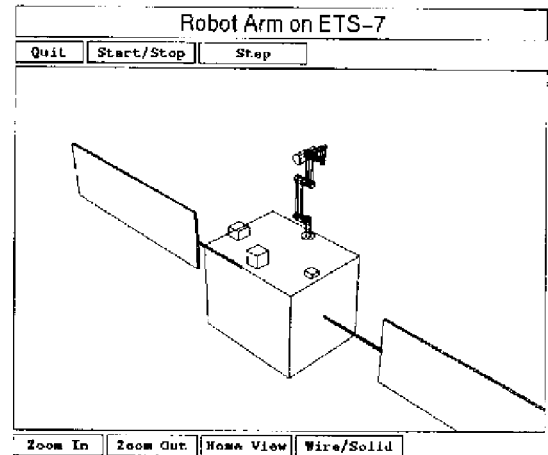


Fig. 1 Simulation model of ETS-VII

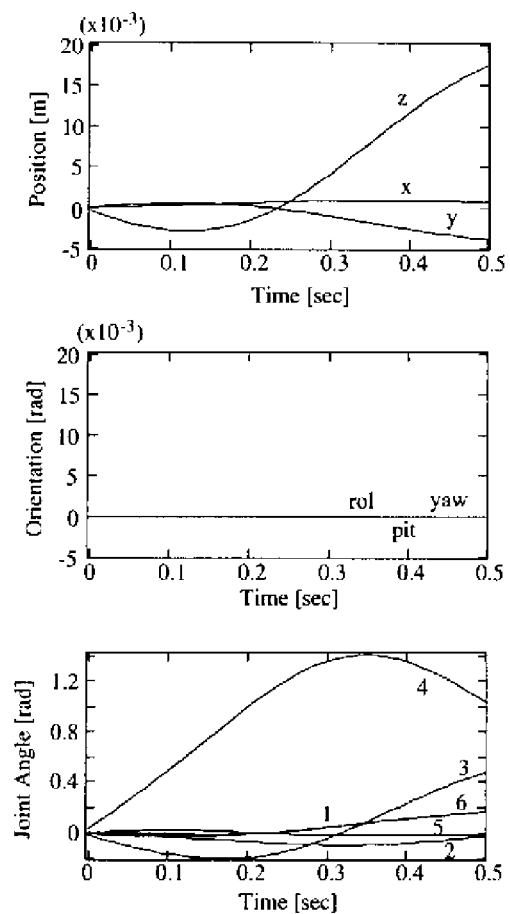


Fig. 2 A simulation result of the reactionless operations

る方法を明らかにした。ETS-VIIを対象とした動作の一例を示した。さまざまなバリエーションや、実際の運用上の安全性等を慎重に検討し、後期利用実験の候補として提案するつもりである。Fig.2のシミュレーション結果を実証するフライトデータが得られることを待ち望んでいる。

参考文献

- 1) http://oss1.tksc.nasda.go.jp/ets-7/ets7_j/pr_index.html
- 2) 小田：宇宙開発事業団技術報告，衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御の研究，NASDA-TMR-960030, 1997.
- 3) Dubowsky and Torres: "Minimizing Attitude Control Fuel in Space Manipulator Systems," Proc. of 1st Int. Symp. on AI, Robotics, and Automation in Space, pp.259-262, Kobe, Japan, 1990.
- 4) 山田，土屋：宇宙ロボットのハンドの運動軌道と本体の姿勢変動について，計測自動制御学会論文集，Vol.28, No.3, pp.374-382, 1992.
- 5) K. Yoshida and D. N. Nenchev, "A General Formulation of Under-Actuated Manipulator Systems," in *Robotics Research, The Eighth International Symposium*, pp.33-44, Springer, 1998.
- 6) 妻木，小寺，ネンチェフ，内山：6自由度マニピュレータの特異点適合遠隔操作，日本ロボット学会誌，Vol.16, No.2, pp.195-204, 1998.