

ETS-VIIを用いた宇宙ロボット制御実験*1

Flight Experiments of ETS-VII for Advanced Space Robot Control

吉田 和哉*2・ドラゴミル N. ネンチェフ*3・橋 詰 健一*4

Kazuya YOSHIDA, Dragomir N. NENCHEV, Kenichi HASHIZUME,

安孫子 聡子*2・小田 光茂*5

Satoko ABIKO and Mitsushige ODA

Key Words: Space Robot, Non-Holonomic System, Reaction Null-Space, Generalized Jacobian Matrix, Gravity Gradient Torque

Abstract: This paper presents the flight experiments on the dynamics and control of a space robotic arm mounted on ETS-VII (Engineering Test Satellite VII). The experiments were successfully carried out to evaluate the performance of (1) reaction null-space based reactionless manipulation, (2) generalized Jacobian based inertial manipulation, (3) offset command based feedforward attitude control, and (4) bi-directional approach of non-holonomic path planning. Inertia parameters of ETS-VII is identified based on the momentum equation and the effect of gravity gradient torque is also evaluated.

1. はじめに

作業用マニピュレータを搭載したフリーフライング型の宇宙ロボットは、軌道上でさまざまなサービス活動を行うことが期待されている。ロボットの制御という観点からは、しかし、搭載アームの反動と衛星の姿勢運動がダイナミックに干渉しており、それが自在なマニピュレーションに対する制約条件となることが指摘されている。しかしながら、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したり、干渉を逆に有効利用した制御を行うことも可能であり、これまでも多くの研究がなされている¹⁻³⁾。

フリーフライング型宇宙ロボットによる軌道上サービスの実現に向け、必要な技術試験を行うことを目的として、わが国では世界に先駆けて、技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) が開発され、1997 年 11 月の打ち上げより 1999 年 12 月までの期間、ロボット実験やランデブ・ドッキング実験などが行われた⁴⁾。

本論文では、同衛星のロボット実験の一環として、1999 年 9 月に東北大学と宇宙開発事業団との共同研究として実施された軌道上実験について、その実施内容およびフライトデータの解析結果を示す。今回の軌道上実験では、ロボット衛星全体のダイナミクス特性を考慮したマニピュレーションの方式として、以下の 4 項目について試験を行った。

1. 反動零空間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操作する制御法
3. 衛星姿勢にオフセット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終端値制御

これらは、いずれもこれまでの研究から制御の可能性が指摘されてきたものであったが、今回の実験によって、実際の軌道上システムにおける有効性が検証されたものである。本論文では、これらの実験結果について総括する。

また、本論文では、軌道上実験で得られたフライトデータにおいて、アームと衛星姿勢運動のダイナミクスを解析することにより、衛星各部の慣性性能率を同定した結果についても述べる。フリーフライング宇宙ロボットの制御において、重力傾斜トルクの影響は、これまで小さいものとして無視される場合が多かったが、軌道上実験ではその影響が観察され、事後シミュレーションによって厳密な評価を行った結果についても述べる。

2. フリーフライング宇宙ロボットのモデリング

2.1 基礎方程式 マニピュレータを搭載した宇宙ロボット衛星は、フリーフライング多節リンク系とみなせる。そのダイナミクスの基礎方程式は、一般に以下のように記述できる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_b & \mathbf{H}_{bm} \\ \mathbf{H}_{bm}^T & \mathbf{H}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_b \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b \\ \mathbf{c}_m \end{bmatrix}$$

*1 © 2002 日本航空宇宙学会

2000 年 6 月 2 日、第 22 回宇宙技術および宇宙科学国際シンポジウム (ISTS2000) にて一部発表。平成 14 年 1 月 16 日原稿受理

*2 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

*3 弘前大学理工学部知能機械システム工学科

*4 三菱電機(株)移動通信統括事業部

*5 宇宙開発事業団筑波宇宙センター

$$= \begin{bmatrix} \mathcal{F}_b \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_b^T \\ \mathbf{J}_m^T \end{bmatrix} \mathcal{F}_h \quad (1)$$

ここで、衛星本体の並進速度、姿勢角速度 $\dot{x}_b = (v_b^T, \omega_b^T)^T$ 、およびリンクをつなぐ関節の動作速度 $\dot{\phi}$ を、システムの状態を記述する一般化座標として定義する。また、式中の他の記号の定義は以下の通りである。

$H_b \in R^{6 \times 6}$: 衛星本体 (ベース) の慣性行列

$H_m \in R^{n \times n}$: アーム部分の慣性行列

$H_{bm} \in R^{6 \times n}$: ベースとアームの干渉慣性行列

$c_b \in R^6$: ベースに関する速度非線形項

$c_m \in R^6$: アームに関する速度非線形項

$\mathcal{F}_b \in R^6$: 衛星重心に作用する外力・モーメント

$\mathcal{F}_h \in R^6$: アーム先端に作用する外力・モーメント

$\tau \in R^n$: 関節に作用する内力・モーメント

特に、外力が作用しない状況においては、全系の運動量・角運動量は一定に保たれ、運動量保存関係が系の運動を支配する方程式となる。並進および角運動量をそれぞれ記号 \mathcal{P}, \mathcal{L} を用いて書くと、

$$\begin{bmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{L} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_b \dot{x}_b + \mathbf{H}_{bm} \dot{\phi} \quad (2)$$

となる。

並進運動量 \mathcal{P} は積分することができ、全系の重心位置を定める関係式が得られる。一方、角運動量 \mathcal{L} は一意に積分することができず、システムのノンホロノミックな拘束条件を与える。(2) 式から角運動量のみを分離して、あらためて書き直すと、

$$\mathcal{L} = \tilde{\mathbf{H}}_b \omega_b + \tilde{\mathbf{H}}_{bm} \dot{\phi} \quad (3)$$

となる。ここで (\cdot) の記号を施したものは、(1) 式において定義した慣性行列を変形したものであり、 $\tilde{\mathbf{H}}_{bm} \dot{\phi}$ は、アームの動作反動によって生じる角運動量を表している³⁾。

2.2 反動零空間 (RNS) に基づくマニピュレーション
ETS-VII には 6 自由度のロボットアームが搭載されており、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らないようにつとめ、生じてしまった反動に対しては、リアクションホイールもしくはガスジェットスラスタを用いることにより衛星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、反動零空間と名付けられた力学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⁵⁾。

以下に、反動零空間および無反動マニピュレーションの導出を示す。

(3) 式において、初期角運動量 $\mathcal{L} = \mathbf{0}$ と仮定し、かつベースに反動が生じていない状態、すなわち $\omega_b = \mathbf{0}$ を仮定すると、

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

となる。この式を満たす関節運動速度 $\dot{\phi}$ は、ベースに反動を生じないマニピュレーションを実現する。(4) 式の一般解は、以下のように求められる。

$$\dot{\phi} = (\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{H}}_{bm}^+ \tilde{\mathbf{H}}_{bm}) \dot{\zeta} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{I} \in R^{n \times n}$ は単位行列、 $\dot{\zeta} \in R^n$ は任意のベクトルであり、演算子 $(\cdot)^+$ は、擬似逆行列を表す。

(5) 式に示される行列 $\tilde{\mathbf{H}}_{bm}$ に関する零空間は、ノンチェフらによって反動零空間 (Reaction Null-Space: RNS) と名づけられている⁶⁾。この反動零空間のランクは、関節の個数から角運動量の次元を引いたもの、すなわち $n - 3$ 個である。ETS-VII には 6 自由度アームが搭載されており $n = 6$ であるから、衛星の姿勢 3 自由度を零に保ちつつ、ハンドに 3 自由度分の任意性を持ったマニピュレーションが可能となる。

(5) 式で与えられる関節速度 $\dot{\phi}$ を積分して得られるロボットの動作を無反動マニピュレーションと呼ぶ。ベースに反動を与えない操作を実現するためには、ロボットアームは無反動マニピュレーションの動作履歴 (軌道) をたどればよく、軌道追従誤差が無ければ、無反動性は軌道追従の速度には依存しないことが知られている⁷⁾。

今回の実験では、後述するように、実際のサービス実験の運用上に意味のある作業ポイントを通過する無反動マニピュレーションを計画した。(5) 式を用いて関節運動を求め、その運動履歴を計画作業軌道として準備し、この軌道を追従するマニピュレーションを実施した。

2.3 一般化ヤコビ行列 (GJM) を用いたマニピュレーション
ロボット衛星によって、軌道上に浮遊するターゲットを捕捉する状況を想定する。この場合、衛星本体 (ベース) に固定した座標系に基準を置いてマニピュレーションを行うと、アームの動作反動などによりベースの位置・姿勢が変動することにより目指すターゲットの位置・姿勢も変化してしまい、思い通りの捕捉制御は難しい。

仮に、リアクションホイールやガスジェットスラスタなどを用いてベースの制御を行ったとしても、後述するフライト実験データに示されるように、アーム動作による反動を常に零に抑えることは現実的には不可能である。

さらには、ドッキングを含む近接作業では、不用意な運動による衝突を避けるため、リアクションホイールやガスジェットスラスタなどの、衛星本体の運動に制御力を発生するデバイスを OFF にして、フリードリフトと呼ばれる状態で作業が実施されることが想定されている。

そこで、フリードリフト状態において、アームの動作反動によるベースの変動を許容しつつ、かつ、慣性座標系^{*6} に基準を置いたマニピュレーションを行う方法を考える。

ロボットハンドの速度 $\dot{x}_h \in R^6$ を慣性系を基準にして記述すると、次式のようになる。

*6 特に衛星が円軌道を飛行する場合には、地球周回する軌道に固定された軌道座標系を、近似的に慣性座標系とみなすこととする。

$$\dot{x}_h = J_b \dot{x}_b + J_m \dot{\phi} \quad (6)$$

ここで, J_b , J_m はそれぞれ, アームの運動およびベースの運動がハンドの運動におよぼす影響を示すヤコビ行列である.

いま, (2) (6) 式を連立して \dot{x}_b を消去することを考えると, 以下の式を得ることができる.

$$\dot{x}_h = J_g \dot{\phi} \quad (7)$$

$$J_g = J_m - J_b H_b^{-1} H_{bm} \quad (8)$$

ここに示される行列 J_g は, 梅谷・吉田によって一般化ヤコビ行列 (Generalized Jacobian Matrix: GJM) と名づけられている^{8, 9)}.

なお, (8) 式では $(P^T, \mathcal{L}^T)^T$ の初期値が 0 であることを仮定して式を簡略化しているが, 一般的には 0 でなくても同様の定式化が可能である.

この一般化ヤコビ行列を用いると, フリードリフト状態でマニピュレーションを行う際に, ベースに生じる力学的反動を (8) 式の第 2 項によって自動的に補償しつつ, 慣性系に対して, ロボットハンドを任意に位置決めしたり, 軌道追従させることができる.

2.4 ロボットベース姿勢のフィードフォワード制御 ロボット衛星は, 上述した近接作業時のフリードリフト状態を除いて, 通常は制御によって姿勢安定が保たれている. 一般の衛星において姿勢変動を生じさせる外乱には, 重力傾斜トルク, 地磁気トルク, 大気ドラッグや太陽光圧によって生じるモーメントなどが知られているが, ロボット衛星におけるアームの動作反動による外乱は, これらの要因に比べて桁違いに大きい. よって姿勢変動を検知してはじめて回復動作を開始するフィードバック型の姿勢制御では, 相応の姿勢変動は避けがたい. ところで, アームの動作外乱はアームの動きを指令した時点で力学的に予測可能であり, この点に注意すると, あらかじめ外乱量を予測して姿勢制御力を発生するフィードフォワード型の姿勢制御が効果的であると考えられる.

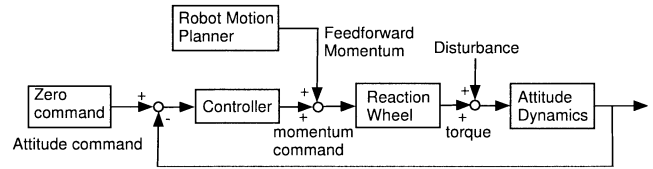
アームの動作にともなう外乱角運動の発生は, (3) 式を用いて解析的に知ることができる. (3) 式において, 初期角運動量を 0 とし, ベースの角速度 ω_b について解くと次式を得る.

$$\omega_b = -\tilde{H}_b^{-1} \tilde{H}_{bm} \dot{\phi} \quad (9)$$

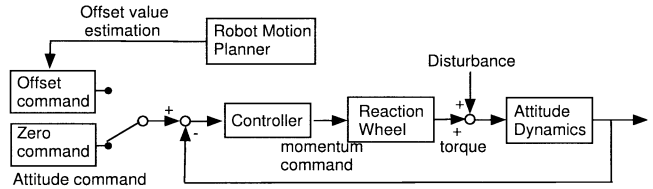
ここで, 行列 \tilde{H}_b は常に正則である.

(9) 式によって得られる反動角速度をフィードフォワードする考え方は, 角速度型フィードフォワードとして, 吉田によって提唱され¹⁰⁾, その後小田によって ETS-VII 搭載制御系として実装された¹¹⁾. ETS-VII では, フィードフォワード制御により, 姿勢変動量が小さく抑えられかつ姿勢回復を早める効果が, 軌道上において確認されている¹²⁾.

しかし, アーム動作開始後の姿勢回復を早めることが, かってアーム停止後の反動を拡大する場合も起こりうる



(a) Feedforward attitude control based on momentum



(b) Feedforward attitude control based on offset destination

第 1 図 (a) 角速度型フィードフォワードおよび (b) 目標値オフセット型フィードフォワードの制御ブロック図

ことが現実には起きている¹²⁾. この現象は, 以下のような例を用いて考えるとわかりやすい. 電車の中に乗客が立っている状況を考え, 乗客の姿勢を衛星姿勢に対応させ, 電車の運動をアームの運動に対応させる. 一般に経験するように, 電車が加速すると乗客の姿勢は後ろに引っ張られ, 減速の際には前に押し出される. ここで, 電車の加速減速にかかわらず乗客の姿勢を直立に保つことが, 制御の目的である. しかしながら, 加速反動に対抗すべく姿勢を回復した直後に急ブレーキがかかると, 回復の勢いも加算されて乗客は前に倒れてしまう. このような場合には, 電車の加速後はあえて姿勢を回復せずに, 体を後ろに傾けたままで次にくる減速を待っているほうが都合がよく, 減速の反動を利用して直立を回復すればよい. 実際, 電車に乗るときは, 次にくる反動を予測して無意識のうちに姿勢を傾けて構えていることが多い.

以上の考察を定式化すると以下ようになる.

(9) 式の積分形を考えると, Ω_b は, アームの加速動作の結果ベースに生じる姿勢変動角である.

$$\Omega_b = - \int \tilde{H}_b^{-1} \tilde{H}_{bm} \dot{\phi} dt \quad (10)$$

よって, アームの動作開始後は, 姿勢制御の目標値を 0 ではなく Ω_b の値に変更し, 姿勢が傾いた状態を保っておくと, アーム減速時の反動により姿勢角 0 近傍に回復することが期待できる. アーム停止後は制御目標値を 0 に戻す. このような考え方を, 目標値オフセット型のフィードフォワードと呼ぶことにする.

角速度型フィードフォワードと目標値オフセット型フィードフォワードの制御ブロック図を, 第 1 図に比較する.

2.5 ノンホロノミック軌道計画 角運動量に関する (3) 式は, その積分値が積分経路に依存するいわゆるノンホロノミックな力学的特徴を与える. この性質を利用して, アームに周期的な運動を与えることによりフリードリフト状態

の衛星姿勢を変更できることが, Vafa, Dubowsky によって指摘され¹³⁾, 以後, さまざまな研究が行われている。

ベースの位置・姿勢およびアームの関節角を状態変数として, 任意の初期値から与えられた終端値へ至るアームの動作軌道計画問題について考察がなされ, 中村らは, この問題に対する滑らかな状態フィードバック則が存在しないことを明らかにした上で, 始点および終点からそれぞれ共通の中間目標点へ収束させる方法を示した。この方法は, 双方向アプローチと呼ばれている¹⁴⁾。

今回の軌道上実験では, ノンホロノミック軌道計画法を確認する実験として, この分野の草分け的な制御方策である, 双方向アプローチによって計画された軌道を用いて動作検証を行った。

2.6 重力傾斜トルク ETS-VII のような低軌道上で運用される宇宙ロボットにおいて, アームの反動に次いで影響力の大きい外乱は, 重力傾斜による影響である。これまでの宇宙ロボットの制御に関する研究では, アームの動作とその反動に対する制御方策に主眼が置かれ, その他の外乱は無いものと仮定されるケースが多かった。しかしながら, 軌道上実験のデータをみると, その他の外乱もオーダーは小さいものの, 無視できないことが示されている。よって, ここでは, 重力傾斜トルクについて考察する。

重力傾斜トルク N は次式のようにモデル化される¹⁵⁾。

$$N = \frac{3\mu}{R^5} r \times H_c r \quad (11)$$

ここで, 式中の記号は以下の通りである。

$r \in R^3$: 地球中心からロボット重心までのベクトル
($\|r\| = R$)

$H_c \in R^{3 \times 3}$: ロボット重心まわりのロボット全体の慣性行列

μ : 地球重力係数

いま宇宙ロボットが, 地球指向制御されているとすると,

$$r = R [0 \ 0 \ 1]^T \quad (12)$$

である。(12) 式を (11) 式に代入すると, 重力傾斜トルク N は次式ようになる。

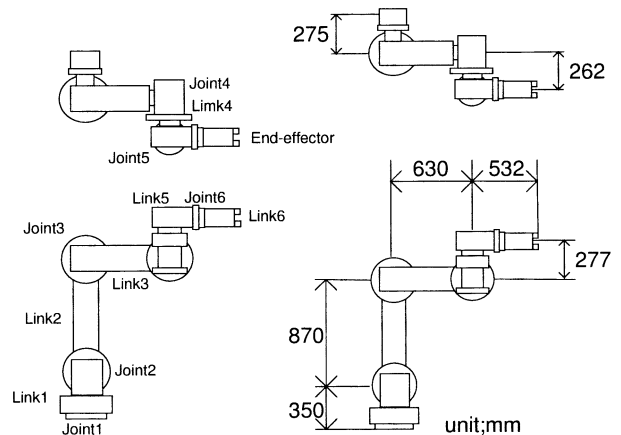
$$N = \frac{3\mu}{R^3} [-H_{yz} \ H_{xz} \ 0]^T \quad (13)$$

ここで, H_{yz}, H_{xz} は慣性行列 H_c のそれぞれ yz, xz 成分であり, したがって, 重力傾斜トルクの大きさは宇宙ロボット全体の慣性乗積に比例する。この外乱トルク N は, 衛星本体上のリアクションホイールに蓄積される。その蓄積量を $\Delta \mathcal{L}$ とすると,

$$\Delta \mathcal{L} = N \Delta t \quad (14)$$

である。

*7 ここでいうパスとは, 筑波宇宙センターと ETS-VII の間に TDRS を介して通信が可能なウィンドウのことであり, 1 パスの間に正味 20 分程度のロボット実験が実施可能である。



第 2 図 ETS-VII 搭載ロボットアーム

3. 実験結果および考察

3.1 実験の実施状況 ETS-VII を用いた東北大-NASDA 共同ロボット実験は, 1999 年 9 月 30 日の第 1 ~ 第 3 の連続する 3 パス*7を用いて実施された。

ロボットの動作はあらかじめオフライン計算によってハンド軌道についての時系列ファイルとして準備しておき, 4 Hz 周期の等時性 PTP コマンドとして, 筑波宇宙センターより米国のデータ中継衛星 TDRS を介して, ETS-VII にリアルタイム送信することにより, ロボットアームを動作させた。すべてのアーム動作は, 他の搭載機器に対して非接触のものとし, 衝突が生じない安全なものであることを, シミュレータによって慎重に事前検証した。

実験項目は, 前記した 4 項目である。

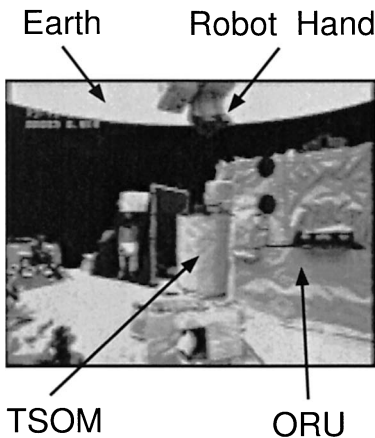
ロボット実験中の衛星姿勢モードは, 実験項目 1 についてはリアクションホイール (RW) を用いたフィードバック制御, 実験項目 2, 4 についてはフリードリフト, 実験項目 3 については (1) RW フィードバック制御, (2) RW フィードフォワード協調制御, および (3) RW フィードバック制御+制御目標値の変更の 3 つの状態を適宜切り替えて実施した。

実験はおおむね順調に行われ, 当初予定したすべての項目についてデータを取得することができた。実験中のテレメトリデータとして, ロボットアームの関節角, 衛星本体の姿勢角, 姿勢角速度, リアクションホイールの角速度等のデータを記録した。

ETS-VII 搭載ロボットアームの関節構成および寸法を第 2 図に示す。また, 実験中の筑波宇宙センターのロボット制御室の様子, および, 軌道上の ETS-VII の写真を第 3 図に示す。

3.2 慣性パラメータの同定 項目 1 ~ 4 のすべての実験において, 動作を計画する際に ETS-VII の慣性パラメータの情報が必要となる。そこで, 1999 年 9 月の実験に先立って, 同年 1 月 ~ 2 月に取得されたロボット実験のデータを用いて, 慣性パラメータの同定を行った。

一般に, 慣性パラメータを正確に計測することは, 地上



第3図 ETS-VII 軌道上実験の様子: 筑波宇宙センターの操作卓(上)および軌道上の ETS-VII ロボット肩カメラの映像(下)

のロボットにおいても容易ではなく、動的モデルを構築する上での課題の1つとなっている。ロボットアームの慣性パラメータは、地上においては、重力との静力学的なつりあいをを用いた静止試験によって同定する方法や、等角速度運動・等角加速度運動などの動作試験を行い、その際の関節トルクと角速度、角加速度を計測し、同定する動的な手法が知られる。

しかし、宇宙空間には重力はなく、静力学的なつりあいを適用することはできない。また、一般のロボットアームにおいても、関節トルクや角加速度を計測することは難しく、特に宇宙ロボットでは、ロボットアームの動作による衛星本体の姿勢変動が過大となることを防ぐため、ロボットアームの動作速度は遅い。そのため、発生する関節トルク、角加速度は小さくなり、精度の良い計測を行うことが困難である。また ETS-VII には、そもそも関節トルクを計測するセンサが備わっていない。

そこでここでは、角運動量保存関係(3)式に注目し、ベースおよびアームの角速度とリアクションホイール角運動量の情報を用いて、慣性パラメータの同定を行った。また、特にパラメータ同定のためのアーム動作試験は実施せず、既存のフライトデータの中から、アーム動作中のデータを選んで同定に用いた。同定手法の詳細については別稿(16)に報告しているのでここでは割愛し、同定の結果得られた質量特性を第1表に示す。この値を用いて軌道上実験を計画・実行し、またシミュレーション解析を行った。

3.3 無反動マニピュレーションの実験 反動零空間に

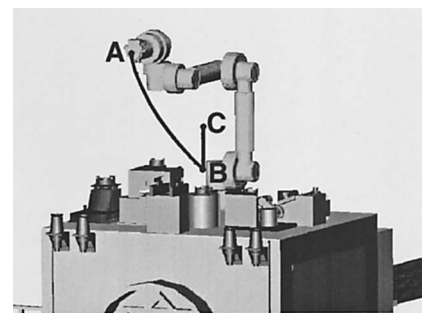
第1表 同定された ETS-VII の慣性特性

Satellite base

m_0 (kg)	I_{xx0}	I_{yy0}	I_{zz0}	I_{xy0}	I_{xz0}	I_{yz0}
2550	6200	3540	7090	48.2	120	-29.2

Manipulator arm

i	m_i (kg)	I_{xxi}	I_{yyi}	I_{zzi}	I_{xyi}	I_{xzi}	I_{yzi}
1	35.0	0.25	0.25	1.69	0	0	0
2	22.5	0.10	1.31	3.75	0	0	0
3	21.9	0.10	0.71	2.53	0	0	0
4	16.5	0.15	0.15	0.07	0	0	0
5	26.0	0.15	0.15	0.13	0	0	0
6	18.5	0.97	0.97	0.26	0	0	0



第4図 無反動マニピュレーションの実験動作

基づく無反動マニピュレーションの実験動作を第4図に示す。図中 A 点は、基準アーム姿勢と呼ばれる状態であり、このとき関節角 $\phi = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 、ロボット座標系でのハンド位置・姿勢は $(x, y, z, \text{roll}, \text{pitch}, \text{yaw}) = (1162, -267, 1497, 0, 0, 0)$ である。単位は位置については $[\times 10^{-3} \text{ m}]$ 、角度については $[\text{deg}]$ である。B 点は、TSOM と名づけられた捕獲用グリッパーへのアクセスのために、把持点の上方 0.15 [m] に設定された基準点であり、そのハンド座標は $(1170, 407, 490, 0, 90, -37)$ である。C 点は、B 点よりハンドの姿勢 3 自由度を拘束したまま無反動軌道を描いておよそ 0.35 [m] 上方へ移動した点である。

実験では、まず A 点から B 点まで、従来の無反動性を考慮しない PTP (Point-To-Point) 動作によって移動し、次いで B 点から C 点まで 0.015 [m/s] の手先速度で無反動動作を行う。更に、C 点から 0.0075 [m/s] の手先速度で無反動動作を行い B 点まで戻る。

第5図に以上の実験動作中のフライトデータを示す。上段のグラフは手先速度の大きさを、中段はアーム動作の反動で衛星本体上に生じる角運動量を、下段は衛星本体の姿勢変動を示している。

本実験はベースの姿勢制御系を ON にした状態で実施しているにもかかわらず、グラフより明らかのように、通常の PTP 動作ではアーム動作の反動によりベースの姿勢が大きく変動してしまっている。一方、無反動マニピュレーションでは、ベースの変動はきわめて小さいことがわかる。

また、アームの動作後に衛星姿勢は回復されるが、しかし PTP 動作の後には、姿勢回復のための静定待ちを十分にとらなければならない、この実験ではほぼ零に戻るまでに約 100 秒を要している。一方、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。

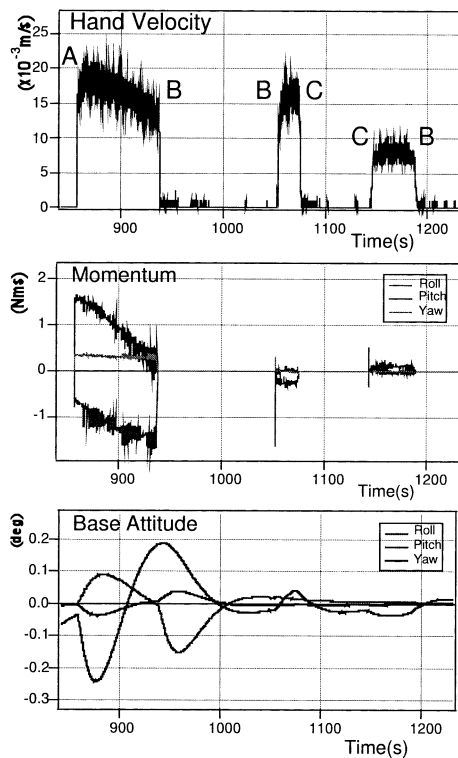
従来の PTP 動作ではベースに大きな反動を生じ、その回復静定待ちにかなりの時間を要し、反動そのものを小さくするためにはアーム動作を極力ゆっくりしたものになければならず、これらの点が効率的なマニピュレーションの妨げになっていた。一方、無反動マニピュレーションを

用いると、アーム動作中の反動が限りなく零に近く、よって動作後の静定待ちもほとんど必要としないことから、効率的なマニピュレーションが期待できることが示された。

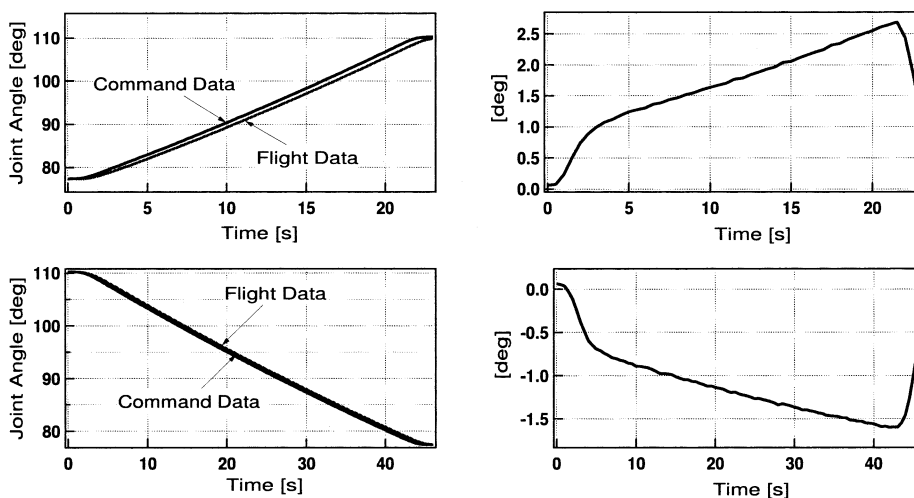
ところで、理論的には無反動マニピュレーションでは衛星姿勢に対して完全に非干渉であり反動は零である。また、反動が零の状態はアームの動作速度に依存しないはずである。しかし実際には多少の角運動量および姿勢変動を生じ、その値はハンドの動きが速いほうが大きくなっている。この原因は、アーム関節サーボ系の命令値と実行動作との間のずれによるものであると考えられる。第 6 図に、無反動マニピュレーション中にもっとも動きが大きかった第 4 関節の指令値と実測値の比較、および両者の誤差を示す。同図より、実際のアームの動きが無反動軌道として指令された動作に対して、若干の遅れをもって追従している様子がわかる。この遅れは、アームの動作速度が大きくなると増大する傾向にある。よって、関節サーボの追従特性が改善されれば、無反動マニピュレーションの性能は更に高まることが期待できる。

なお、本来ならば PTP 動作との公平な比較をするために、A 点より B 点に至る連続した無反動マニピュレーションを実験すべきである。しかしながら、関節の自由度数やその可動範囲の制約から、そのような連続経路を得ることはできなかった。ここでは、理論的に予測された無反動マニピュレーションが、軌道上のロボットにおいて、簡単な経路制御で実現できたことをまず第一に強調しておきたい。さらに、A 点より A→C→B という経路をとるならば、少なくとも区間 CB は無反動にできることを指摘したい。例えば B 点に浮遊しているターゲットへアプローチする場合、C 点を経由して最終接近および位置決め作業を無反動で行うことができるメリットは、非常に大きいと考えられる。

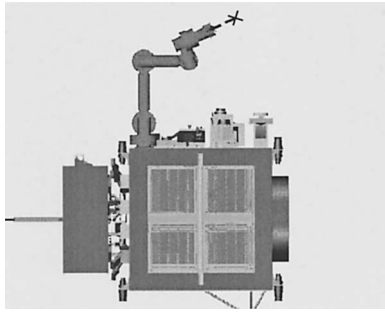
3.4 一般化ヤコビ行列を用いた制御実験 一般化ヤコビ行列を用いてアームを動作させる制御実験では、第 7 図に示すように、アームの基準姿勢においてハンドのピッチ角を -23 [deg] 傾けて、図中に × 印にて記された、慣性空間



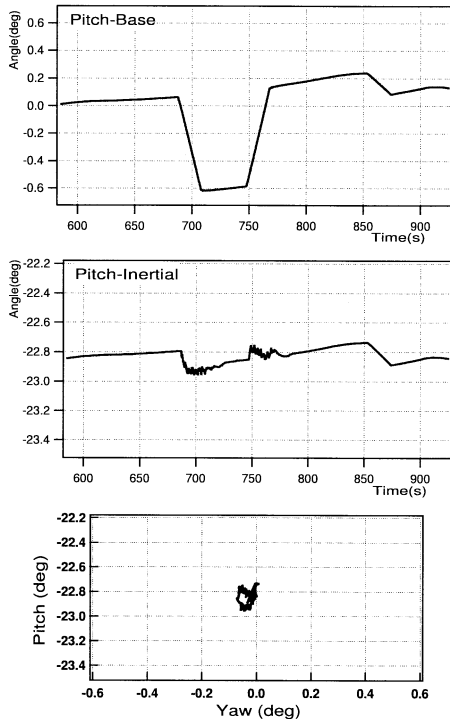
第 5 図 無反動マニピュレーション実験のフライトデータ (上段: ハンド速度, 中段: 反動角運動量, 下段: ベース姿勢)



第 6 図 無反動マニピュレーション実験中の関節動作履歴 (第 4 関節)(上段: B 点より C 点への高速動作, 下段: C 点より B 点への低速動作)

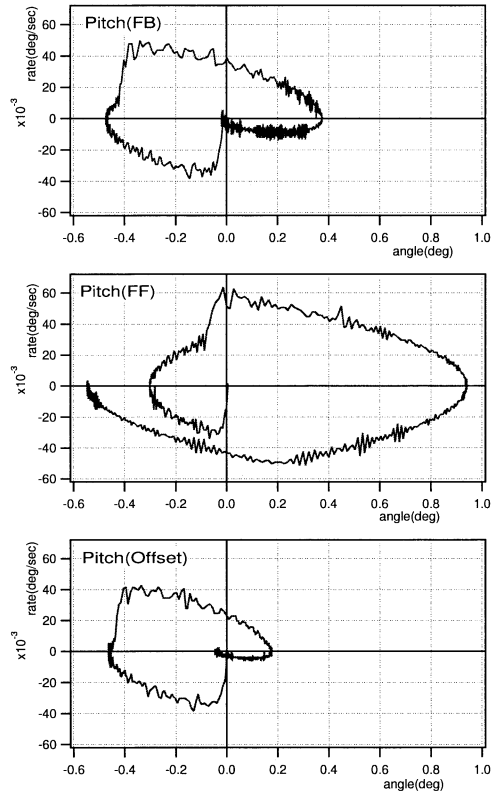


第7図 一般化ヤコビ行列を用いた制御実験動作



第8図 一般化ヤコビ行列を用いた制御実験のフライトデータ (上段: ベース Pitch 角, 中段: 慣性系からみたハンド Pitch 角, 下段: Yaw-Pitch 平面で示したハンド姿勢)

に固定された仮想ターゲットへアプローチする動作を行った。この間、衛星本体の姿勢制御を OFF にしてフリードリフト状態とした。現実には × 印の点に浮遊ターゲットは存在しないが、その代わりにハンドが指向している先には地球のエッジが位置しており、慣性系においてハンドのピッチ角が一定に保たれているか否かを、ハンドに取り付けられたカメラによってモニターすることができるようにした。実験データを第8図に示す。時刻 680 [s] から 20 秒間仮想ターゲットに向かって前進し、時刻 745 [s] から 20 秒間仮想ターゲットより後退する動作を行っている。上段がマニピュレーション中のベースのピッチ姿勢角であり、アーム動作の反動によって姿勢がおよそ -0.6 [deg] 変化している。中段は、慣性系からみたハンドの姿勢を表しており、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、ハンド姿勢はほぼ一定に保たれていることがわかる。下段は、ハンドのピッチ角を縦軸に、ヨー角を横軸にプロットした



第9図 ベース姿勢協調制御実験のフライトデータ (上段: フィードバック制御のみ, 中段: 角運動量型フィードフォワード制御, 下段: 目標値オフセット型フィードフォワード制御)

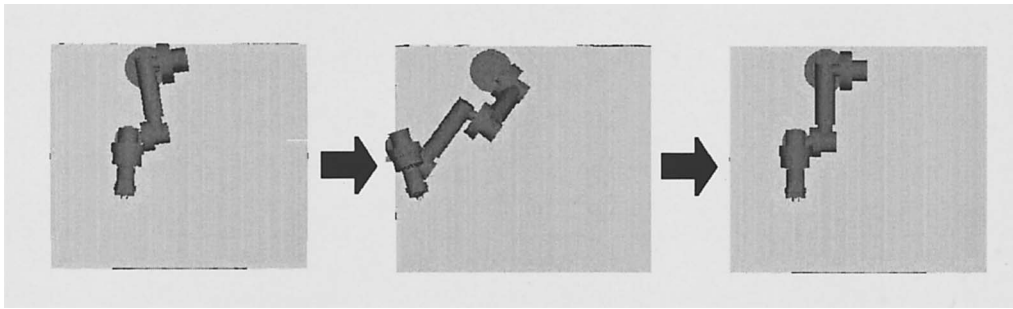
グラフであり、実験中の手先カメラの指向方向を示している。ベースの姿勢変動にもかかわらず、アーム先端を慣性系に対しておよそ ± 0.1 [deg] 程度の範囲内に固定する制御が実現できていることが示される。

なお、上段および中段の図においてグラフが右上がりの傾向を示しているのは、フリードリフト中の重力傾斜トルクによる姿勢外乱によるものである。この影響については、3.7 節において別途解析する。

3.5 ベース姿勢の協調制御実験 目標値オフセット型のフィードフォワード協調制御法の実験については、基準姿勢からアームを x 方向に 0.2 [m] ずつ前後させるアーム動作を行い反動を生じさせ、この間のベース姿勢維持の性能を比較した。姿勢制御にはいずれもリアクションホイールを用い、アームの動作速度は 0.006 [m/s] である。

第9図に実験結果を示す。同図は、横軸を衛星姿勢 (ピッチ)、縦軸を姿勢角速度 (ピッチレート) とした位相面を示している。実験はいずれも位相面の原点から開始され、アームの加速反動によって、位相軌跡は第 III 象限に動く。軌跡はその後右回りに移動し、最終的に原点へ戻るように推移する。

上段が通常のフィードバック制御時の応答であり、アームの動作反動により衛星姿勢が -0.5 [deg] から $+0.4$ [deg] の範囲で変動し、最終的に零に収束していることがわかる。中段は、角運動量型フィードフォワード協調制御時の応答である。アームの起動時の反動に対して素早い応答を示し、



第 10 図 ノンホロノミック終端値制御実験のロボット動作

この時点では姿勢変動は -0.3 [deg] を越えない範囲にとどまっているが、アームの減速反動と姿勢の回復運動が重畳してしまいプラス方向に非常に大きな姿勢変動を生じてしまっていることが読みとれる。アーム起動後の素早い姿勢回復が、全体としてはかえって逆効果となってしまった例である。

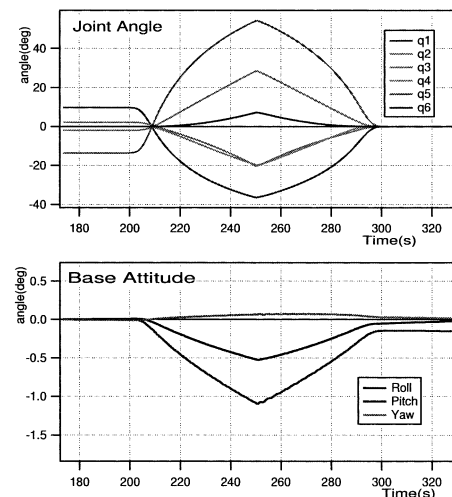
下段は目標値オフセット型フィードフォワード協調制御を実施した場合であり、通常のフィードバック制御を行った上で、アーム動作開始直後に姿勢制御目標値を -0.35 度に変更し、アーム停止直後に同目標値を 0 度に戻している。このように、アーム動作開始の反動による姿勢の傾きを、敢えて急いで回復させない制御を行うことにより、結果的に総合的な姿勢変動範囲を小さくすることができ、また、アーム停止後の姿勢回復待ち時間を小さくできることが示された。

特に、上段と下段の違いはごくわずかであるようにも思われるが、アーム停止直後のピッチレートの大きさ（第 II 象限のピッチレートの最大値）の違いが、その後の姿勢収束の早さに大きく影響している。2.4 節では、目標値オフセット型フィードフォワード協調制御について主に定性的に説明したが、オフセットの大きさや切り替えのタイミングについて、定量的な評価が必要である。これは今後の課題としたい。

3.6 ノンホロノミック終端値制御の実験 ノンホロノミック軌道計画法を用いてアームと衛星姿勢の終端値制御を行う実験では、双方向アプローチを用いて、任意に設定したアームの関節初期値 $\phi_{init} = (9.6, -2.0, 2.0, 0, -13.6, 0)^T$ [deg] および衛星姿勢 $roll = pitch = yaw = 0$ から、目標最終値 $\phi_{end} = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$, $roll = pitch = yaw = 0$ を達成するアーム動作を計画した。中間折り返し点の関節角は $\phi_{mid} = (-36.4, 28.5, -20.3, -19.8, 54.3, 7.2)^T$ である。このアーム動作を図示すると、第 10 図のようになる。

この実験は、フリードリフト状態で実施した。

同実験のフライトデータを第 11 図に示す。roll 姿勢角の最終値に 0.2 度ほどの誤差を残しているが、その他のすべての状態量を目標値である 0 に収束させることができた。アームの動作は第 6 図に示したようなサーボ追従誤差を含んだものであり、動作中に何らオンライン的な補償を行わず実施した実験であることを考えると、これは非常によい



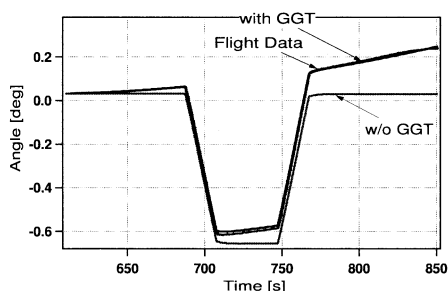
第 11 図 ノンホロノミック終端値制御実験のフライトデータ（上段：ロボット関節角，下段：ベース姿勢）

結果であるということが出来る。

3.7 重力傾斜トルクを考慮に入れたベース姿勢の解析 第 8 図の一般化ヤコビ行列を用いた制御実験のフライトデータに示されているように、フリードリフト状態では、ベースの姿勢はアームが停止中でも一定値にはとどまらず、少しずつ変動（ドリフト）する様子が観察される。このドリフトの大きさは、ピッチ方向が最大であり、ロール方向にもわずかに認められ、ヨー方向にはほとんど認められない。また、リアクションホイールによるベースの姿勢制御を実施して行った実験結果には、ロールおよびピッチ軸のホイールに一定の割合で角運動量が蓄積される様子が観察されており、一定の外乱トルクが作用していることが推察される。

アームの動作反動に次ぐベースへの外乱要因としては、重力傾斜トルクが考えられる。重力傾斜トルクは (13) 式に定式化されるように、ロールとピッチ方向に外乱を与え、ヨー方向には影響を与えない。このことは、上記の観察結果と符合する。

そこで、(13) 式にもとづく重力傾斜トルクの効果も加味したベースの運動シミュレーションを行った。第 8 図の実験におけるアーム動作のテレメトリデータを入力として、ロボット衛星系全体の順動力学を解き、ベースの姿勢運動を



第12図 重力傾斜トルクの影響を加えたベース姿勢のシミュレーション

結果として算出した。

第12図にシミュレーション結果を示す。図中 w/o GGT と示されたプロットは、重力傾斜トルクの影響を考慮しないケースであり、その場合アームの非動作時の姿勢は一定に保たれている。一方、with GGT と示されたプロットは、重力傾斜トルクの影響を考慮に入れたケースであり、姿勢が時間とともにプラス方向にドリフトしていく様子が、フライトデータとほぼ完全に一致している。

このことより、フリードリフト状態におけるロボット衛星は、アームの動作反力に加えて重力傾斜トルクによる姿勢変動もおきており、特に浮遊ターゲットの捕捉等に際しては考慮に入れておく必要がある。しかし、その影響は(13)式を用いて、かなり正確に定量評価できることも明らかとなった。

4. 結 論

軌道上の ETS-VII において、システムのダイナミクス特性に注目したロボット制御実験を実施し、以下の結論を得た。

(1) 特定の作業ポイントへ至る無反動軌道を計画し、それを追従するマニピュレーション実験を実施した。無反動マニピュレーションにおいては、ベースへの反動をほぼ零にできること、若干の反動はアームの軌道追従誤差によること、無反動動作後はベース姿勢の回復待ちを必要とせず、効率的なロボット運用に貢献できることが示された。

(2) 一般化ヤコビ行列を用いて、フリードリフト状態で慣性空間に固定された目標点へハンドを制御する実験を実施した。ベースの姿勢変動にもかかわらず慣性系におけるハンド姿勢は正確に保たれており、この制御法は、将来想定される衛星捕獲ミッションに有効なものであることが示された。

(3) アーム反動とベース姿勢の協調制御についての実験を行った。角運動量に基づくフィードフォワード制御がかえって逆効果になる例を示し、このケースに対しては、目標値オフセット型の方式が有効であることが確認された。

(4) 双方向アプローチに基づくノンホロノミック終端値制御の実験を行った。オフラインで計画された軌道を追従するのみで、オンラインフィードバックは実施しなかったが、かなり正確に計画された終端値へ到達することが確認

された。

(5) 軌道上実験の準備として、角運動量関係を用いて ETS-VII の慣性パラメータを同定した。(1)~(4)において非常に正確な実験を実施することができたことから考え、ここに同定されたパラメータは実用的に十分な精度に達していると考えられる。またフライトデータより、フリードリフト時には重力傾斜トルクによるベース姿勢のドリフトが生じていることが確認され、シミュレーションにより、その様子を正確に検証することができた。

以上、本軌道上ロボット実験で確認・実証された成果は、将来想定される、ロボット衛星によって浮遊ターゲットを捕捉しサービスを行うミッションにおいて、重要な基礎をなすものであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Special Issue on Robotics in Space, J. Astronaut. Sci., **38** (1990), pp. 441-530.
- 2) Special Issue on Space Robotics, IEEE Trans. Robotics Autom., **9** (1993), pp. 521-697.
- 3) Xu, Y. and Kanade, T., eds.: Space Robotics: Dynamics and Control, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- 4) 特集: ETS-VII における宇宙ロボット実験, 日本ロボット学会誌, **17** (1999), pp. 1055-1104.
- 5) Yoshida, K., Nenchev, D. N. and Uchiyama, M.: Moving Base Robotics and Reaction Management Control, Robotics Research: The Seventh International Symposium, Giralt, G. and Hirzinger, G., eds., Springer Verlag, London, 1996, pp. 101-109.
- 6) D. ネンチェフ, 吉田和哉, 岡田 茂, 三輪敏雄, 阿部幸勇, 近野敦, 内山 勝: 反動零空間を利用した宇宙遠隔操作, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集, 1995, pp. 1003-1006.
- 7) Nenchev, D. N., Yoshida, K., Vichitkulsawat, P. and Uchiyama, M.: Reaction Null-Space Control of Flexible Structure Mounted Manipulator Systems, IEEE Trans. Robotics Autom., **15** (1999), pp. 1011-1023.
- 8) Umetani, Y. and Yoshida, K.: Continuous Path Control of Space Manipulators Mounted on OMV, Acta Astronautica, **15** (1987), pp. 981-986 (Presented at the 37th IAF Conf., Oct. 1986).
- 9) Umetani, Y. and Yoshida, K.: Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix, IEEE Trans. Robotics Autom., **5** (1989), pp. 303-314.
- 10) Yoshida, K.: Practical Coordination Control between Satellite Attitude and Manipulator Reaction Based on Computed Momentum Concept, Proc. 1994 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), Munich, Germany, (1994), pp. 1578-1584.
- 11) 小田光茂: 衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御—ロボットアーム動作時の衛星の姿勢安定の保証—, 日本ロボット学会誌, **15** (1997), pp. 590-600.
- 12) 小田光茂: ETS-VII ロボット実験の成果, ETS-VII 「おりひめ」「ひこぼし」実験成果報告会前刷集, 2000, pp. 73-82.
- 13) Vafa, Z. and Dubowsky, S.: On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator Approach, Proc. of 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1987, pp. 579-585.
- 14) Nakamura, Y. and Mukherjee, R.: Nonholonomic Path Planning of Space Robots, Proc. of 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1989, pp. 1050-1055.
- 15) 茂原正道: 宇宙工学入門, 培風館, 東京, 1994, pp. 110-120.
- 16) 吉田和哉, 安孫子聡子: 軌道上ロボットの慣性パラメータの同定, 日本機械学会論文集 C 編, **68** (2002), pp. 2388-2394.