ETS-VIIを用いたロボットアーム振動の軌道上評価実験^{*1} On-Orbit Experiments for Joint Flexibility of ETS-VII Robotic Arm

神 澤 拓 也^{*2}・松 永 三 郎^{*3}
Takuya KANZAWA and Saburo MATUNAGA

Key Words: ETS-VII, Robotic Arm, Vibration Disturbance, Joint Stiffness, Natural Frequency

Abstract: In this paper, on-orbit joint flexibility experiments using ETS-VII (Engineering Test Satellite VII) robotic arm are discussed. Considering manipulability of the robotic arm, the arm vibration due to the joint stiffness may influence on the berthing manipulation. The vibration of the robotic arm mounted on a satellite is characterized as follows, 1) coupling between the arm and the satellite attitude vibration, and 2) transition of the arm natural frequency according to its posture changes with the inertial parameter variation. The experiments are planned to evaluate these vibration disturbance. Using telemetry data detected by FTS (Force Torque Sensor) attached to the end-effector, the arm natural frequencies and the transitions of the arm vibration amplitude are analyzed. And the validity of the simulation results is demonstrated.

1. は じ め に

ロボットアーム搭載衛星に要求される軌道上サービスの一つとして、不具合衛星などの軌道上浮遊物(ターゲット)の捕獲・回収といった一連の作業(キャプチャー・パーシング)が挙げられる。実際に、技術試験衛星VII型(ETS-VII)では、搭載ロボットアームにより、400 kgを超えるターゲット衛星の自律捕獲実験およびパーシング操作実験が行われた¹⁾。このような作業においてロボットアームの操作性を問題とするならば、その弾性振動のために十分な性能が得られないことが考えられる。ロボットアームに発生する振動の要因としては、以下の二つが挙げられる²⁾。

(A1) リンク自体の構造的な柔軟性

(A2) 関節の減速器部分などの低剛性

まず、(A1)に含まれるものとして柔軟リンクモデルに基づきターゲットのキャプチャー・パーシング時のロボットアーム操作を扱った研究³⁻⁵⁾や柔軟ロボットアームに衝撃力が加わる際の運動を解析した研究⁶⁾などが報告されている。一方、(A2)に関連した研究として宇宙ロボットによるターゲット捕獲時の問題を、吉田ら⁷⁾は、浮遊リンク系のインパルス衝撃問題として定式化し、衝突時の関節の抵抗を仮想的なロータを付加した形で表現した。また吉河ら⁸⁾は、関節部の剛性を直接考慮した場合についてターゲット捕獲時の宇宙ロボットに作用する衝撃力を評価した。ロボットアームの柔軟性は衝撃力を緩和するのに有用であるが、力制御のようにターゲットに積極的に力を与えようとする操作では、ターゲットに振動成分を含んだ不要な力を与えてしまう。著者ら⁹⁾はロボットアームがターゲ

ットと接触する際の関節剛性の影響を検討し、エンドエフェクタ部と関節部の剛性を同時に考慮した操作の重要性を示した。

ETS-VII搭載型ロボットアームの特徴を考えると関節剛性の影響(A2)が支配的であり、そのようなモデルに基づいた検討が必要である。ロボットアーム動作時に発生する角運動量擾乱による衛星本体の姿勢変動は、協調制御を適用することにより抑えることができ、多くの研究が報告されている¹⁰⁻¹²⁾。一方、本論文で注目する搭載機器としてのロボットアームの振動擾乱は、衛星本体の姿勢安定度、ロボットアーム自体の操作性などを考慮する際に大きな課題となる。既に、技術試験衛星VI型(ETS-VI)でも太陽電池パドルを加振させ、柔軟特性同定などを目的とした軌道上実験が行われているが¹³⁾、本研究では、ETS-VIIを用いた軌道上実験を行うことにより、ロボットアームが発生する振動擾乱の基礎的評価をした。本論文では、関節剛性を有するロボットアームのパーシング操作時に発生する振動擾乱の特徴を明らかにした上で、それを実証するための軌道上実験の手順、結果およびその考察について述べる。

2. 関節剛性のある宇宙ロボットのモデリング

関節剛性のある宇宙ロボットの解析モデルを第1図に示す。宇宙ロボットとして、 n 個の回転関節により結合された $(n+1)$ 個の剛体リンクを考え、 $(n+1)$ 番目物体に剛体のターゲット衛星などのペイロードが剛結合されているとする。この時、宇宙ロボットの衛星本体質量中心固定座標系 $\{b_B\}$ における運動方程式は以下のようなになる⁹⁾。

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_B \\ \dot{\omega}_B \\ \dot{q}_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_B \\ \tau_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

左辺第一項は慣性項、第二項は遠心力・コリオリ力などか

^{*1} © 2001 日本航空宇宙学会

平成12年5月12日、ロボティクス・メカトロニクス講演会'00にて一部発表。平成12年3月24日原稿受理

^{*2} 宇宙開発事業団技術研究本部

^{*3} 東京工業大学大学院理工学研究科機械宇宙システム専攻

らなる非線形項，右辺第一項は衛星本体に加わる制御入力 U_B と各関節に加わる振動トルク τ_M からなる．

次に，ハーモニックドライブなどの減速器の構造的な剛性あるいは関節制御によるサーボ剛性を有する関節部のモデルについて述べる．本論文で対象とする ETS-VII では，エンドエフェクタの並進速度は 50 mm/s 以下，関節角速度は ± 15 deg/s 以下に制限されており低速で動作されることを考慮し，各関節回転軸まわりの微小振動として表す．したがって，各関節のモータダイナミクスは無視し，各リンクが関節回転軸まわりのねじりバネ・ダンパで結合しているものとすれば，関節に作用する振動トルク τ_M は，関節角の相対変化量 Δq_M ， $\Delta \dot{q}_M$ の線形和で表される．

$$\tau_M = -C_M \Delta \dot{q}_M - K_M \Delta q_M \quad (2)$$

ただし，

$$\Delta q_M = q_M - q_M^{\text{ref}} \quad (3)$$

$$\Delta \dot{q}_M = \dot{q}_M - \dot{q}_M^{\text{ref}} \quad (4)$$

であり， q_M^{ref} ， $\dot{q}_M^{\text{ref}}$ は各関節のリファレンス軌道， K_M ， C_M は各関節の剛性・粘性を表す対角行列である．同様に，衛星本体制御入力も PD 制御のように線形和で表されると仮定して，一般に以下のように表す．

$$U_B = -C_B \Delta \dot{x}_B - K_B \Delta x_B \quad (5)$$

ただし，

$$\Delta x_B = x_B - x_B^{\text{ref}} \quad (6)$$

$$\Delta \dot{x}_B = \dot{x}_B - \dot{x}_B^{\text{ref}} \quad (7)$$

x_B^{ref} ， $\dot{x}_B^{\text{ref}}$ は衛星本体のリファレンス軌道， K_B ， C_B は比例・微分ゲインを表す対角行列である．ロボットアームは低速動作することから速度 2 乗項を含む非線形項は微小で

あるとして無視でき，式(1)～(7)は以下のような線形の振動方程式に書き換えられる．

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} H_B & H_{BM} \\ H_{BM}^T & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{x}_B \\ \Delta \ddot{q}_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_B & O_{6n} \\ O_{n6} & C_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_B \\ \Delta \dot{q}_M \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} K_B & O_{6n} \\ O_{n6} & K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_B \\ \Delta q_M \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} O_{61} \\ O_{n1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし， H_B は式(1)の H_{11} ， H_{12} ， H_{21} ， H_{22} を含む行列， H_{BM} は H_{13} ， H_{23} を含む行列であり， O_{nn} は n 行 n 列の零行列を表す．式(8)から宇宙ロボットは，衛星本体とロボットアームの振動が慣性項で連成する多自由度振動系とみなすことができる．本研究では宇宙ロボットの固有振動数に注目するため，このような簡単なモデル化で十分とする．行列 H_B ， H_{BM} ， H_{33} はヤコビ行列やペイロードの慣性パラメータを含むため，ロボットアームの姿勢が変化するパーシング操作により宇宙ロボット全体の固有振動数が変化する．

3. 宇宙ロボットの固有振動数解析

ロボットアームの振動擾乱特性として，パーシング操作により固有振動数が変動する周波数帯域を把握しておくことは，設計・運用において必要である．本節では，ペイロードとロボットアーム姿勢の違いによる宇宙ロボット全体の固有振動数を数値シミュレーションで見積もる．ペイロードは，以下の 4 種類を考える．

(B1) Case-1：無把持

(B2) Case-2：ORU (Orbital Replacement Unit)

(B3) Case-3：ターゲット衛星

(B4) Case-4：チェイサー衛星と同程度の大きさの衛星

Case-2 および 3 は ETS-VII 実験⁹⁾ で実際に把持されたものの，Case-4 は将来的に大型の衛星を把持した場合を想定した．数値シミュレーションに使用した慣性パラメータおよび地上試験で得られた関節剛性値を第 1 表に示す．ロボットアームの姿勢は，簡単化のため第 2 図(a)のように第 2 関節が -90 ， -45 ， 0 ， 45 ， 90 deg の 5 通りを例として考えるため，ピッチ軸まわりに回転軸を有する第 2，3，4

第 1 図 解析モデル

第 1 表 ETS-VII シミュレーションパラメータ

Body	Mass [kg]	Length (x, y, z) or (R, I) [m]	Inertia (x, y, z) [kgm ²]
Base	2469	2.0, 2.3, 1.8	7010, 2320, 6200
Robotic arm			
Link 1	25.5	0.1, 0.35	0.324, 0.324, 0.128
Link 2	20	0.1, 0.87	1.312, 1.312, 0.1
Link 3	20	0.1, 0.63	0.1, 0.712, 0.712
Link 4	20	0.1, 0.262	0.164, 0.1, 0.164
Link 5	20	0.1, 0.277	0.178, 0.178, 0.1
Link 6	45.5	0.1, 0.532	0.228, 1.187, 1.187
Payload			
Case-2	20	0.56, 0.55, 0.41	0.784, 2.850, 1.021
Case-3	409	1.5, 1.7, 0.7	640, 630, 150
Case-4	2000	1.8, 2.0, 1.8	6000, 2000, 7000
Joint stiffness K_{M_i} [Nm/rad]			
Joint 1	48400	Joint 2, 3	39500
		Joint 4, 5, 6	25500

関節のみの2次元3自由度振動である。ロボットアーム先端の自由振動応答をETS-VIIと同じサンプリング周波数（テレメトリデータ受信間隔）10 Hzで取得しFFT解析した。Case-1～Case-4の各ロボットアーム姿勢変化に対する1次固有振動数解析結果を第2図(b)に示す。無把持の場合（Case-1）は、約2.3 Hz、大型ペイロード把持の場合（Case-4）は約0.4 Hzの周波数帯域で変動するが、ETS-VIIロボットアーム動作時の衛星本体姿勢制御系の帯域幅は0.01 Hzであり、各Caseにおいてロボットアーム振動擾乱は制御帯域外である。また、Case-3および4のように大型ペイロード把持の場合は、固有振動数が低周波側に移り振動の減衰性が悪くなるとともに、太陽電池パドルなどの柔軟構造物の低周波振動と共振する領域にある。例えば、ETS-VIIターゲット衛星に付着している太陽電池パドルの面外1次振動モードは、0.47 Hz程度であると推定されており^{14,15)}、ロボットアームをピッチ軸(Y_B)まわりに操作するならばパドルの面外振動を励起し、ロボットアームとパドルの振動が干渉する危険性がある。以上より、ロボットアーム姿勢やペイロードの違いなど宇宙ロボットの作業内容に応じて固有振動数は大幅に変化するため、このような振動特性を念頭においた設計・運用が必要である。

4. ETS-VIIによる軌道上実験

4.1 実験内容 本実験よりも前に実施されたETS-VIIターゲット衛星操作実験¹⁾では、ターゲットの移動距離が

(a) ロボットアームの姿勢変化

(b) 1次固有振動数解析結果

第2図 慣性パラメータ変化に対する固有振動数の変化

最大でも440 mm程度と比較的狭い領域でのロボットアーム操作であったため、上述のような振動現象の推移を観測するという意味では不明瞭であった。そこで、本実験ではロボットアームの運用制限範囲に近いところまで広範囲に渡ってロボットアームの移動操作をし、慣性パラメータ変動幅を大きくすることにより振動現象の推移を明瞭にした。軌道上実験を行う際には、地上との通信や運用上の安全性などから実験時間、ロボットアームの加振法、運用領域、取得できるデータなどに制約がある。振動データ取得のためにはより大型のペイロードを把持した方が望ましいが、実験上の制約からペイロードは無把持とした。ETS-VIIには、ペイロード把持時の力覚検出用としてエンドエフェクタ部に力・トルクセンサ（Force Torque Sensor, FTS）が装着されている。本実験では、ロボットアームを強制加振させFTSを利用することにより振動データを取得した。そして、オフライン解析することで、ロボットアーム操作により発生する振動擾乱の基礎的評価をした。

4.2 実験手順 本実験は衛星本体に対するロボットアーム操作方向や範囲などを変えて2回（第1パス、第2パス）行われた。第3図に第1パス、第4図に第2パスでの操作手順を、第2表にそれぞれのパスの実験内容を示す。第3図および第4図のように、比較的広範囲に三つの姿勢 A_i , B_i , C_i （パス $i=1,2$ ）を考え、ロボットアームがほぼ伸展に近い状態（伸展姿勢 A_i あるいは C_i と呼ぶ）あるいはほぼ収納に近い状態（収納姿勢 B_i と呼ぶ）を区別した。これらの姿勢間で等間隔にロボットアーム先端の静止位置 A_i , $1a_i$, $1b_i$, ...など（黒丸）を設定し、動作・静止を繰り返しながら移動させた。本実験ではPTP（Point to Point）方式によりロボットアーム先端の位置・

第3図 ETS-VIIロボットアーム操作手順（第1パス）

第4図 ETS-VIIロボットアーム操作手順（第2パス）

姿勢コマンドを地上から送信する自動操作モードによる実験とし、ロボットアームの操作パスをあらかじめ作製した。一例として第1パスの姿勢 A_1 から姿勢 B_1 へのロボットアーム先端位置・姿勢・並進速度・角速度のリファレンス軌道を第5図に示す。静止位置 A_i , $1a_i$, $1b_i$, ... では、エンドエフェクタ座標系 X_E 方向に 250 ms で 6 mm 移動後、2 s 停止、さらに 250 ms で -6 mm 移動するインパルス状に近い変位励振をロボットアーム先端に作用させることにより強制加振した。また、衛星本体姿勢制御系はリアクションホイールを用いた場合と用いない場合を区別した。

5. 実験結果および考察

第1パスでは実験時間の都合により第3図における静止姿勢 $2c_1$ の途中で実験を終了したが、第2パスでは全操作パス内のロボットアームの振動データを取得できた。以下では、固有振動数と振動振幅に注目して実験結果を考察する。

5.1 固有振動数の変動 第1パスおよび第2パスの各ロボットアーム静止姿勢に対して、FTS が検出した力・トルクデータの時刻歴応答に FFT 解析を適用し固有振動数を求める。テレメトリデータ受信間隔 (サンプリング周

第5図 ロボットアーム先端位置・姿勢・並進速度・角速度 (第1パス、姿勢 A_1 から姿勢 B_1 への移動)

波数) 10 Hz を考慮して1次固有振動数のみに注目する。実験結果として第1パス分を第6図の実線に、第2パス分を第7図の実線に示す。ロボットアームの伸展姿勢 A_i/C_i と収納姿勢 B_i の間で、固有振動数は約 1.4~2.8 Hz の間を変動している。一方、点線は数値シミュレーション結果であり、各ロボットアーム姿勢変化に対する固有振動数の変動は、実験結果に応じてほぼ同じ傾向で推移している。これは、第1パス姿勢 A_1 での実験結果を基準として固有振動数が同程度になるように、各関節剛性値を同時に合わせ込んだものであり、第1表に示した地上試験値の 65% ($K_{M1}=3.15 \times 10^4$, K_{M2} , $K_{M3}=2.57 \times 10^4$, K_{M4} , K_{M5} , $K_{M6}=1.66 \times 10^4$ Nm/rad) にしている。また、固有振動数を比較すると、第1パス姿勢 A_1 に対する地上試験値を用いた数値シミュレーション結果は第2図 Case-1 ($q_2=0$ deg) の場合に対応し 2.4 Hz であり、実験結果では 1.9 Hz であり約 20% 低い。すなわち、軌道上では地上よりも関節部は低剛性であり、これは無重力である軌道上と地上での関節部の負荷の違いに起因する本質的な差であると考えられる。また、実験結果から固有振動数は $\omega = \sqrt{K/I}$ の簡単な式で概ね対応づけられることから、2節のようなモデル化で妥当であることが確認された。

5.2 振動振幅の変動 本節では、ロボットアームの姿勢変化に対する振動振幅の変動を FTS が検出した力・トルクデータを用いて検証する。第8図(a)に第1パス姿勢 $A_1 \cdot B_1$ 間における力のノルム値 (上段)・トルクのノルム

(a) 姿勢 $A_1 \cdot B_1$ 間の推移 (b) 姿勢 $B_1 \cdot C_1$ 間の推移

第6図 ロボットアームの1次固有振動数 (第1パス)

第2表 ETS-VIIロボットアーム軌道上実験の内容

操作パス	第1パス		第2パス		
図	第3図		第4図		
実験日	1999.9.30		1999.10.13		
実施パス名	PTP 1-1	PTP 1-2	PTP 2-1	PTP 2-2	PTP 2-3
先端位置移動	$A_1 \rightarrow B_1$	$B_1 \rightarrow C_1$	$A_2 \rightarrow C_2$	$C_2 \rightarrow B_2$	$B_2 \rightarrow A_2$
移動方向	衛星本体に対してほぼピッチ軸まわり		衛星本体に対してロール軸まわり		
移動距離 [m]	0.88	0.70	1.12	0.70	0.88
静止位置	$A_1, 1a_1, 1b_1, 1c_1, B_1$	$B_1, 2a_1, 2b_1, 2c_1, C_1$	$A_2, 1a_2, 1b_2, C_2$	$C_2, 2a_2, 2b_2, B_2$	$B_2, 3a_2, 3b_2, A_2$
所要時間 [s]	動作時: $50 \times 4 = 200$ 静止時: $50 \times 5 = 250$ 合計: 450	動作時: $50 \times 4 = 200$ 静止時: $50 \times 5 = 250$ 合計: 450	動作時: $50 \times 3 = 150$ 静止時: $50 \times 4 = 200$ 合計: 350	動作時: $50 \times 3 = 150$ 静止時: $50 \times 4 = 200$ 合計: 350	動作時: $50 \times 3 = 150$ 静止時: $50 \times 4 = 200$ 合計: 350
加振方法	静止中3回、動作開始時1回の変位励振を作用	静止中3回、動作開始時1回の変位励振を作用	静止中3回、動作開始時1回、動作中1回の変位励振を作用	静止中3回、動作開始時1回、動作中1回の変位励振を作用	静止中3回、動作開始時1回、動作中1回の変位励振を作用
衛星姿勢制御	OFF	ON	ON	ON	OFF

第7図 ロボットアームの1次固有振動数 (第2パス)

(a) 伸展姿勢 A_1 から収納姿勢 B_1 へのアーム操作 (a) 伸展姿勢 C_2 から収納姿勢 B_2 へのアーム操作 (b) 収納姿勢 B_1 から伸展姿勢 $2b_1$ へのアーム操作 (b) 収納姿勢 B_2 から伸展姿勢 A_2 へのアーム操作

第8図 FTS 検出のロボットアーム振動振幅 (第1パス)

第9図 FTS 検出のロボットアーム振動振幅 (第2パス)

値 (下段) の推移を, 第8図(b)に第1パス姿勢 $B_1 \cdot 2b_1$ 間における力・トルクのノルム値を, 同様に第9図(a)に第2パス姿勢 $C_2 \cdot B_2$ 間を, 第9図(b)に第2パス姿勢 $B_2 \cdot A_2$ 間を示す. 以上のロボットアーム振動振幅の変動を定量的に示すために, 各アーム静止姿勢における3回の励振に対する自由振動応答の最大振幅の平均値を力・トルクデータから算出した. 第10図に第1パス分を, 第11図に第2パス分を示す. 実験時間の都合によるデータの欠損などにより一部不明瞭な箇所があるが, 各図を見ると以下のことが分かる. すなわち, 伸展姿勢 A_1 から収納姿勢 B_1 への姿勢変化時におけるトルク振幅 (第10図左下) と収納姿勢 B_2 から伸展姿勢 A_2 への姿勢変化時におけるトルク振幅 (第11図右下) の変動が大きい. これは, 以下のよ

うに説明される. ロボットアームの励振は, アーム先端の X_E 方向に ± 6 mm の変位励振として与えており, 励振方向と伸展方向が直角に近いとき, また伸展長が長いとき大きなモータ駆動トルクを必要とする. 第1パスの姿勢 $A_1 \cdot B_1$ 間では, 伸展姿勢 A_1 がこれに相当し, アーム先端の励振に必要な各関節の大きな駆動トルクにより, 力・トルクデータとも A_1 で最大となっている. 第2パスの姿勢 $B_2 \cdot A_2$ 間でも同様である. 第2パス姿勢 $C_2 \cdot B_2$ 間では, 励振と伸展が同一方向であり, 各励振位置で必要な駆動トルクがあまり変わらず, 力・トルクデータともほとんど変化していない. また, 第3図・第4図に示すように各アームパスで実際に使用されるのは, 同一軸まわりに回転軸を持つ J_2, J_3, J_4 関節のみである. したがって, 振幅変動

第10図 ロボットアームの振動振幅推移 (第1パス)

第11図 ロボットアームの振動振幅推移 (第2パス)

は力データよりもこれらの関節による回転振動の影響でトルクデータに顕著に現れており、初期姿勢と最終姿勢では2倍程度トルクデータの差がある。

以上より、伸展姿勢 A_1 のようにロボットアームの伸展方向と励振方向が直角に近いとき、関節剛性により衛星重心まわりに作用する擾乱トルク（並進力によるモーメントとトルクの和）が大きい。例えば、宇宙ロボットがこのような状態で大型のペイロードを移動操作するときは、衛星本体に作用する振動擾乱は特に大きく姿勢変動も大きい。したがって、伸展姿勢でのロボットアーム操作あるいは伸展姿勢へのバーシング操作時には、このような振動擾乱特性を念頭においたロボットアーム操作が必要である。

6. 結 論

本論文では、衛星搭載ロボットアームの関節剛性に起因するアーム操作時の振動擾乱に着目した。まず、ロボット

アームの姿勢変化や把持するペイロードの種類など運用状態の違いによって擾乱の周波数帯域が変化することを示し、これを数値シミュレーションで確認した。その結果、宇宙ロボットの作業内容に応じて固有振動数は大幅に変化するため、衛星本体姿勢制御系、柔軟構造物との干渉など振動特性を念頭においた設計・運用が必要であることを示した。次に、ロボットアームの振動擾乱を実システムで評価するために、ETS-VIIを利用した軌道上実験を計画し、ロボットアームの固有振動数や振動振幅の変動など基礎的項目を検証した。今後、より多角的な評価が望まれる。また、本実験のような軌道上実証は、JEMRMSなどの今後の宇宙用ロボットアームにおいても行われることが必要であり、設計・モデリング技術および運用に反映されることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 宇宙開発事業団会議報告：ETS-VII「おりひめ」「ひこぼし」実験成果報告会前刷集, 2000.
- 2) 坂和愛幸：フレキシブル・マニピュレータのモデリングと制御, 日本ロボット学会誌, **12** (1994), pp. 172-177.
- 3) Cyril, X., Jaar, G. J. and Misra, A. K.: Dynamical Modelling and Control of a Spacecraft-Mounted Manipulator Capturing a Spinning Satellite, *Acta Astronautica*, **35** (1995), pp. 167-174.
- 4) Cyril, X., Kim, S.-W., Ingham, M., Misra, A. and Jaar, G.: Post-Impact Dynamics of Two Multi-Body Systems Attempting Docking/Berthing, *Acta Astronautica*, **40** (1997), pp. 759-769.
- 5) Kim, S. W., Misra, A. K., Modi, V. J. and Cyril, X.: Modelling of Contact Dynamics of Two Flexible Multi-Body Systems, *International Astronautical Federation, Preprints of the 1st IFAC Workshop on Space Robotics*, 1998, pp. 18-23.
- 6) 松永三郎, 小山 淳, 狼 嘉彰：衝撃時における柔軟マニピュレータシステムの運動解析 (第1報, 二次元解析モデルと定式化), 日本機械学会論文集C編, **64** (1998), pp. 2923-2930.
- 7) 吉田和哉, 指田直毅, 梅谷陽二：拡張逆慣性行列を用いた浮遊リンク系の衝突運動の定式化, 日本ロボット学会誌, **11** (1993), pp. 410-418.
- 8) 吉河章二, 山田克彦：宇宙ロボットのターゲット捕捉時の衝撃力評価—関節部の剛性の影響—, 日本ロボット学会誌, **13** (1995), pp. 242-248.
- 9) 神澤拓也, 松永三郎：ターゲットへの接触・押し動作時における宇宙ロボットアームの関節剛性の影響, 日本航空宇宙学会論文集, **48** (2000), pp. 180-187.
- 10) Papadopoulos, E. and Dubowsky, S.: Coordinated Manipulator/Spacecraft Motion Control for Space Robotic Systems, *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics Automation*, 1991, pp. 70-75.
- 11) 小田光茂：人工衛星に搭載されたロボットアームと衛星姿勢の協調制御 (第1報, ロボットアームの動作反力の実時間推定), 日本機械学会論文集C編, **62** (1996), pp. 218-224.
- 12) 松永三郎, 谷脇滋宗, 狼 嘉彰：慣性パラメータ変動を補償した協調制御 (第1報) 制御手法の定式化, 日本航空宇宙学会論文集, **46** (1998), pp. 239-246.
- 13) 山口 功, 石川伸一, 千田有一, 山田克彦, 足立修一：ETS-VIによる軌道上同定実験 (第1報, インパルス加振), 日本機械学会論文集C編, **62** (1996), pp. 60-67.
- 14) 福島洋介, 稲垣哲哉, 小田光茂：柔軟特性を有する衛星上でのロボットアーム作業：技術試験衛星VII型での作業例, '99 ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-06-046, 1999.
- 15) 小田光茂, 福島洋介：ロボットアーム搭載衛星のダイナミクスと制御, 日本ロボット学会誌, **17** (1999), pp. 1067-1071.