

宇宙ロボットにおける無反動マニピュレーションと リアクションホイール使用時のエネルギー効率の比較検証

Comparison of Energy Consumption Under Reactionless Manipulation and Reaction-Wheel Based Reaction Control

学 曾根 大樹 (都市大) 根本 拓樹 (都市大)
正 佐藤 大祐 (都市大) 正 金宮 好和 (都市大)

Hiroki SONE, Tokyo City University, sone@rls.mse.tcu.ac.jp
Hiroki NEMOTO, Tokyo City University
Daisuke SATO, Tokyo City University
Yoshikazu KANAMIYA, Tokyo City University

This work describes energy consumption under reaction control in free-flying space manipulators. We compare two reaction control methods: Reaction Null space based reactionless manipulation and reaction-wheel based control. The following practical tasks are considered: (i) inspection maneuver using a hand camera, (ii) deployment maneuver from the stowed configuration and (iii) point-to-point maneuver. From the results, we can confirm that reactionless manipulation has an advantage from the perspective of energy consumption.

Key Words: Free-flying space manipulator, Reaction Null Space method, Energy consumption

1 緒言

過酷な宇宙環境における宇宙飛行士の船外活動は、作業コストや危険性のため好ましくないとされる。また、デブリ回収作業のような作業を、宇宙飛行士が実行することは困難であり、軌道上ロボットが作業を代替することが期待されている。軌道上ロボットは人工衛星搭載型のマニピュレータやカナダアーム 2, JEMRMS/SFA に代表される宇宙ステーション搭載型のマニピュレータに大別される。本論文では人工衛星搭載型マニピュレータ(以下、浮遊ベースロボット)を対象として扱う。

このモデルにおいては、マニピュレータの動作反動による衛星本体(以下、ベース)の姿勢変化が、通信障害や太陽パネルの指向性から問題とされる。この問題に対して、一般的にはリアクションホイールを用いた姿勢制御系が設計されるが、リアクションホイールの出力トルクがマニピュレータの動作反動に対して微小であるため、マニピュレータを低速度で駆動させることが要求される。これは作業効率や実行時間が重要な作業においては好ましくない。そのため、マニピュレータの反動制御が必要となる。また、宇宙環境においては、エネルギー資源が貴重であるため、エネルギー効率の良い制御系も重要となる。

マニピュレータの反動制御において、過去に反動零空間法と呼ばれるマニピュレータの反動制御法が提案されており、ベースの姿勢変化を起因しない無反動制御が実現されている[1]。この無反動制御は、マニピュレータの駆動速度がリアクションホイールの出力トルクに制限されないため、作業効率の改善が期待できる。さらに、リアクションホイールで消費するエネルギーを必要としないことから、省エネルギー化を期待することができる。

本論文では、無反動制御とリアクションホイールを用いた反動制御系のエネルギー効率について比較検証する。検証では実作業を想定した、(i) 手先カメラを用いた点検作業、(ii) 収納姿勢からの展開動作、(iii) point-to-point (PTP)

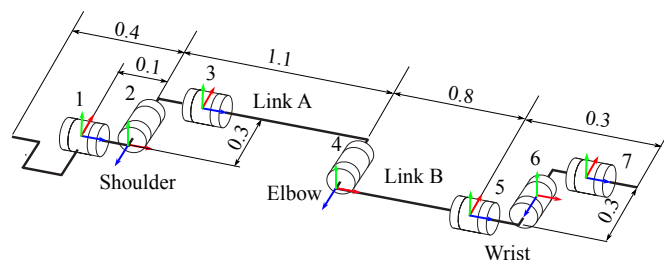


Fig. 1: Kinematic structure of the seven-DoF redundant manipulator.

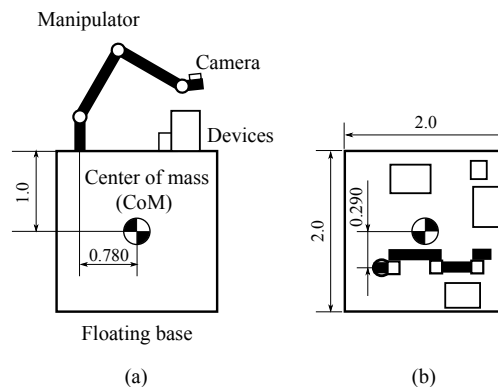


Fig. 2: The seven-DoF manipulator attached to the satellite base: (a) side view and (b) top view.

の位置制御を例として取り上げ、数値シミュレーションにより検証する。

2 モデリングおよび無反動制御

2.1 対象モデル

本論文で扱う対象モデルは、NASA で開発が進められている FRENED Robotic Arm [2] を参考とした機構配置の 7 自由度マニピュレータとする。対象モデルの機構図および慣性パラメータを図 1、表 1 に示す。便宜上、第 1~第 4 関

Table 1: Inertia parameter

	Mass [kg]	Inertia moment [kgm ²]		
i	m_i	I_{xi}	I_{yi}	I_{zi}
1	30.0	0.0671	0.0671	0.0851
2	30.0	0.0843	0.267	0.267
3	45.0	3.81	3.81	0.127
4	40.0	0.113	2.19	2.19
5	20.0	0.213	0.213	0.0250
6	20.0	0.0250	0.0292	0.0292
7	25.0	0.0990	0.0990	0.0313

Table 2: Specification of the reaction wheel

Mass [kg]	Inertia [kgm ²]	Max torque τ_{max} [Nm]
10.0	0.11	0.1

節で構成される機構部を位置副鎖，第 5～7 関節を姿勢副鎖として定義する．また，姿勢制御系として，ETS-VII と同様に三軸直交のゼロモーメント方式を採用する．想定するリアクションホイールの仕様は表 2 に示す通りとする．

2.2 力学法則および無反動制御

2.2.1 運動方程式

浮遊ベースモデルの運動方程式を以下に示す．ただし，並進運動の影響を陰に含んだ表現を用いる [3]．

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_\omega & \tilde{M}_{\omega m} & \tilde{M}_{\omega r} \\ \tilde{M}_{\omega m}^T & \tilde{M}_m & \mathbf{0}_{7 \times 3} \\ \tilde{M}_{\omega r}^T & \mathbf{0}_{7 \times 3} & \tilde{M}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_b \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{c}_\omega \\ \tilde{c}_m \\ \tilde{c}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \tau_m \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $\omega_b \in \mathbb{R}^3$ ， $\theta_m \in \mathbb{R}^7$ ， $\dot{\theta}_r \in \mathbb{R}^3$ はベースの角速度ベクトル，関節座標ベクトルおよびリアクションホイールの回転速度ベクトルを表す． \tilde{M}_i は慣性行列の部分行列を表し，特に， $\tilde{M}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ はベースとマニピュレータの動的干渉を表し，干渉慣性行列と定義される． \tilde{c}_ω ， $\tilde{c}_r \in \mathbb{R}^3$ ， $\tilde{c}_m \in \mathbb{R}^7$ はそれぞれベース，リアクションホイールおよびマニピュレータの速度非線形項を表す． $\tau_m \in \mathbb{R}^7$ ， $\tau_r \in \mathbb{R}^3$ は駆動系の制御トルクを表す．上記において， (\circ) はベースの並進運動の影響を陰に含んだ表現であることに注意されたい．また，ベース姿勢はロール・ピッチ・ヨー角を用いて表現する．

2.2.2 無反動制御

運動方程式の最上段の積分より，ベース質量中心周りの角運動量保存則が得られる．浮遊ベースモデルにおいてはベースの姿勢変化が通信障害などの問題に直結するため，この姿勢についての拘束条件である角運動量保存則が運動制御において重要となる．角運動量保存則はベースの角速度ベクトル，関節速度ベクトルを用いて以下のように定式化される [4]．ただし，零初期角運動量および外力の影響が微小であることを仮定する．

$$\mathbf{0} = \tilde{M}_\omega \omega_b + \tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta}_m + \tilde{M}_{\omega r} \dot{\theta}_r \quad (2)$$

上記において，右辺第二項がマニピュレータの動作により生じる角運動量を表し，姿勢変化を起因する．したがって，無反動制御は以下の拘束を満たす関節運動として与えられる．

$$\tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta}_m = \mathbf{0} \quad (3)$$

上記を満たす関節速度指令値の与え方については，3 章において言及する．

2.2.3 姿勢制御系

比較対象となるリアクションホイールを用いた姿勢制御系は，運動方程式より以下のように設計する．

$$\tau_r^{ref} = \tilde{M}_r \ddot{\theta}_r^{ref} + \tilde{c}_r \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_r^{ref} = -\tilde{M}_{\omega r}^{-1} (\tilde{M}_\omega \dot{\omega}_b^{ref} + \tilde{c}_\omega) \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_b^{ref} = -K_{\omega,d} \omega_b + K_{\omega,p} \Delta e_O \quad (6)$$

式中， $K_{\omega,p}$ ， $K_{\omega,d} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はそれぞれ正定値の比例，微分ゲイン対角行列， $\Delta e_O \in \mathbb{R}^3$ は姿勢誤差を表す．上記を式 (1) 上段に代入することで，ベース姿勢に関する閉ループ系，

$$\tilde{M}_\omega (\dot{\omega}_b + K_{\omega,d} \omega_b + K_{\omega,p} \Delta e_O) = -\tilde{M}_{\omega m} \ddot{\theta}_m \quad (7)$$

を得る．上記より，適切なゲイン設定下において，ベースの姿勢安定化が可能である．ただし，リアクションホイールは出力トルクの制約を受けるため，出力トルクが飽和しない範囲 ($|\tau_{ri}| \leq \tau_{max}$) においてマニピュレータを運用することが要求される．

2.2.4 駆動系の運動エネルギー

本システムにおいて，駆動系に関する運動エネルギーは以下となる．

$$T_{total} = \frac{1}{2} (\dot{\theta}_m^T M_m \dot{\theta}_m + \dot{\theta}_r^T M_r \dot{\theta}_r) \quad (8)$$

式中， T_{total} は駆動系全体の運動エネルギー， $M_m \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ ， $M_r \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はマニピュレータおよびリアクションホイールの慣性行列を表す．第一項がマニピュレータ，第二項がリアクションホイールの運動により生じるエネルギーを表す．

本論文では，マニピュレータ，リアクションホイール間の電氣的な特性の違いについては大きな差異はないと仮定し，評価関数として運動エネルギーを用いる．

3 比較検証における模擬動作

エネルギー効率を比較するにあたり，宇宙ロボットにおいて代表的な三つの実作業を模擬した動作を想定する．

1. 手先カメラを用いた点検作業
2. 収納姿勢からの展開動作
3. マニピュレータ手先の PTP 動作

以下，各動作における無反動制御の適用について述べる [5]．

3.1 手先カメラを用いた点検動作

ETS-VII においては手先にカメラが搭載されており [6]，このカメラを用いて衛星搭載機器の目視点検などが行われている．同様の作業は軌道上ロボットにおいて頻繁に行われることが想定されるため，検証対象として採用する．

無反動制御時におけるマニピュレータ手先の姿勢制御は，式 (3) と運動学を用いることで，以下のように与えられる．

$$\dot{\theta}_m^{ref} = G_\omega^+ \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \omega_E^{ref} \end{bmatrix} + k_g P_{G_\omega} J_{Wv}^T (x_W^{init} - x_W(t)) \quad (9)$$

式中， $\omega_E \in \mathbb{R}^3$ はマニピュレータ手先の角速度ベクトル， $G_\omega = [\tilde{M}_{\omega m}^T J_{E\omega}^T]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 7}$ はマニピュレータ手先の姿勢

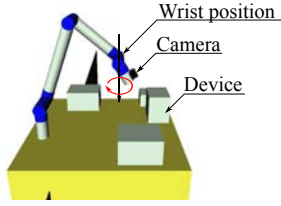


Fig. 3: Inspection maneuver with the hand camera.

とベース姿勢の拘束行列, $P_{G_\omega} = E - G_\omega^+ G_\omega \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ は G_ω の零空間への直交射影行列, $E \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ は単位行列を表す. また, k_g は勾配方向へのゲイン, $J_{Wv} \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$ はマニピュレータの手首 (本論文では第 6 関節) の並進速度に関するヤコビ行列, $x_W, x_W^{init} \in \mathbb{R}^3$ は手首の位置ベクトルおよび, その初期値を表す.

式 (9) の右边第一項は無反動制御下でのマニピュレータ手先の姿勢制御, 第二項は手首位置の初期位置からの偏差を最小化し, 点検作業時の過剰な手首位置の運動を抑制する.

3.2 収納姿勢からの展開動作

ETS-VII においては, 収納姿勢と呼ばれる固有の姿勢が存在し, この姿勢からの展開動作が必要であった. この収納姿勢は打ち上げを必要とする宇宙マニピュレータに共通したものであり, 今後も必要となることが想定される.

対象モデルの機構の特性上, マニピュレータ全体の運動に大きく関係するのは, 位置副鎖の運動であり, 姿勢関節の影響は微小であるため, 展開動作は位置副鎖の運動を用いる. 位置副鎖は 4 自由度の機構であるため, 無反動制御はマニピュレータの姿勢によって一意に決定される. したがって, 無反動制御を用いて展開動作を行う場合, 適切な収納姿勢を設計する必要があり, 限定的な用法となる. しかし, 収納姿勢はシステム設計時に決定されるため, 無反動制御による展開動作を行うことを前提に, 収納姿勢を適切に設定することで実用可能であると考えられる.

位置副鎖の無反動制御を以下のように与える.

$$\dot{\theta}_P^{ref} = \begin{bmatrix} -\tilde{M}_{123}^{-1} \tilde{M}_4 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_4^{ref} \quad (10)$$

式中, $\dot{\theta}_P \in \mathbb{R}^4$ は位置副鎖の関節速度ベクトル, $\tilde{M}_{123} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $\tilde{M}_4 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ は干渉慣性行列の部分行列であり, 添字は関連する関節の番号を表す. 展開動作は第 4 関節に適当な指令値を与えることで実行する.

3.3 マニピュレータ手先の PTP 動作

宇宙ロボットの作業においてマニピュレータ手先の PTP 制御による移動は, 最も使用頻度が高い作業であるといえる. しかし, 無反動制御は可動範囲が限られるため, 任意の位置間を制御することは不可能である. そのため, 本論文では部分的に無反動制御を用いる低反動化手法である, 3-Phase 法と呼ばれる動作計画法を用いる [7].

3-Phase 法は図 4 に示すように, Phase I, III 時にマニピュレータを半分に折りたたむように無反動制御を用いて制御し, Phase II において, この折りたたまれた姿勢で Phase I と III の状態を遷移する方法である. 通常の PTP 制御と比較して, Phase II の姿勢はマニピュレータの質量中心位置がベース質量中心位置に近い場合, 低反動化を行うことが期待できる. この動作計画における無反動制御は, 展

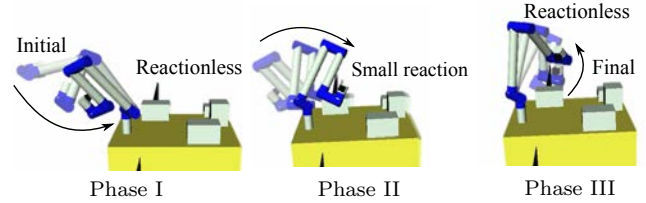


Fig. 4: PTP with partial reactionless paths according to the 3-phase method.

開動作と同様に式 (10) を用いて行い, 第 4 関節を $\pm\pi$ rad のうち適切な値に制御する. 初期姿勢および終端姿勢から無反動制御を行い, 第 4 関節が $\pm\pi$ rad となった際のマニピュレータの姿勢を, それぞれ Phase II の初期姿勢および終端姿勢とし, この二つの姿勢を関節空間上で補間することで全体の運動を生成する.

4 数値シミュレーションによるエネルギー効率の比較

前章において述べた三つの動作について, 無反動制御 (以下, RL-M) と従来のマニピュレータ制御法にリアクションホイールの姿勢制御系を用いた手法 (以下, RW-M) を, エネルギー効率の観点から比較検証した. 本論文では, ベースの姿勢誤差の許容値を 0.05 deg とし, この範囲に収まるようにマニピュレータの動作時間を調整した. 評価関数は動作全体での総運動エネルギー T_{sum} , および運動エネルギーの最大値 T_{max} を採用し, 以下のように定義する.

$$T_{sum} = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\dot{\theta}_m^T M_m \dot{\theta}_m + \dot{\theta}_r^T M_r \dot{\theta}_r) dt \quad (11)$$

$$T_{max} = \sup \left(\frac{1}{2} (\dot{\theta}_m^T M_m \dot{\theta}_m + \dot{\theta}_r^T M_r \dot{\theta}_r) \right) \quad (12)$$

制御則は前述の式を解析的に時間微分し, 計算トルク法により制御トルクへと変換した. また, RW-M の制御則はそれぞれ以下に示す通りとした.

点検動作 $\dot{\theta}_W^{ref} = J_{E\omega, W}^{-1} \omega_E^{ref}, \dot{\theta}_P = 0$

展開動作 RL-M の終端姿勢への関節空間上の直線補間

PTP 動作 RL-M の終端姿勢への関節空間上の直線補間

ただし, $\dot{\theta}_W \in \mathbb{R}^3$, $J_{E\omega, W} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はそれぞれ姿勢副鎖の関節速度ベクトル, 手先の姿勢についてのヤコビ行列における姿勢副鎖に関する部分行列を表す.

各動作のうち, 点検動作および PTP 動作についてはそれぞれ 5 通りの初期姿勢, 目標動作の条件で実行した. また, 展開動作については収納姿勢を $[\pi/2 - \pi/2 \ 0 - \pi \ \pi \ 0]^T \text{ rad}$ とした場合において検証し, 第 4 関節に 0.047 rad/s の関節速度を指令した際の無反動制御をサンプルとして検証した.

図 5 に点検動作における総運動エネルギーの比較結果を示す. 図 5 (a) は各サンプルにおける総運動エネルギー, (b) は最大運動エネルギーを示す. 本検証では, 作業実行時間を 60 s として実行した. 結果より, RL-M は RW-M と比較して, 総運動エネルギーにおいてはおよそ 100 倍ほどのエネルギー効率を持つことが確認できる. また, 最大瞬間運動エネルギーについても同様に, RL-M の運動エネルギーが比較的少ないことが確認できる.

図 6 に展開動作における運動エネルギーの比較結果, 展開動作のスナップショットを図 7 に示す. 図 6 に示したマ

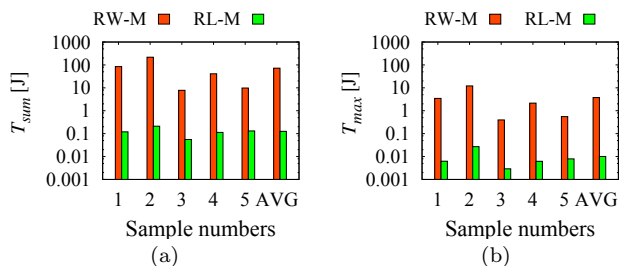


Fig. 5: Simulation results of inspection maneuver: (a) sum and (b) maximum.

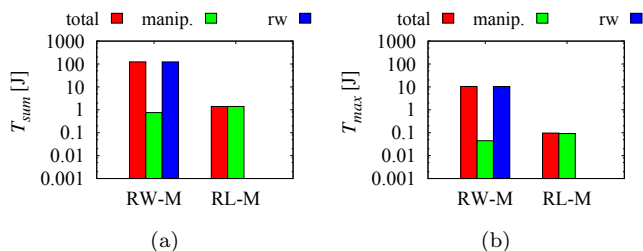


Fig. 6: Simulation results of deployment maneuver: (a) sum and (b) maximum.

ニピューレータおよびリアクションホイールがそれぞれに生じる運動エネルギーを比較すると、マニピューレータが必要とするエネルギーは、RL-Mの方が冗長な運動を含むため大きくなることが確認できる。しかし、リアクションホイールの運動エネルギーがマニピューレータと比較して非常に大きいため、点検動作および展開動作において RL-M のエネルギー効率が RW-M より優れる結果となった。これは、本動作において、リアクションホイールの回転速度が平均 5 rad/s 程で回転するのにに対し、マニピューレータの関節速度は 10^{-2} rad/s のオーダーであり、この差異が二乗で影響する。そのため、リアクションホイールの運動エネルギーが過大になると考えられる。

最後に PTP 動作における検証結果を図 8 に示す。動作実行時間を 250 s として実行した。この動作では、RL-M においても Phase II 時にリアクションホイールを使用するため、運動エネルギーが他の動作と比較して増加していることが確認できる。しかし、RW-M と比較してマニピューレータの動作が低反動化されているため、RL-M の方が優れたエネルギー効率を示す結果となった。

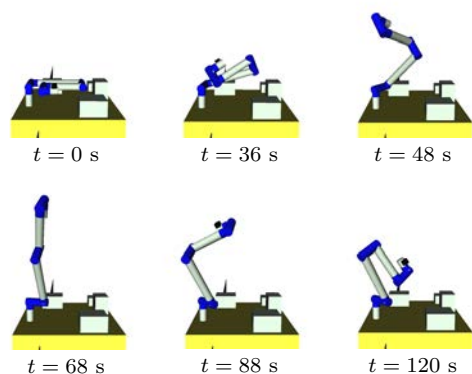


Fig. 7: Motion snapshots from the deployment maneuver under reactionless motion control.

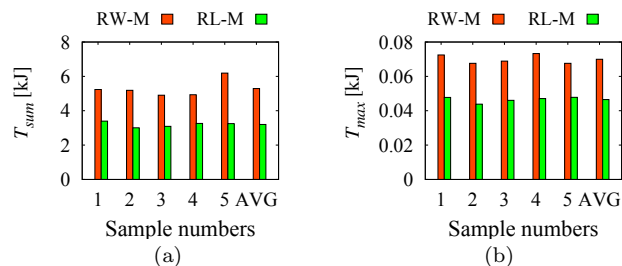


Fig. 8: Simulation results of PTP positioning maneuver: (a) sum and (b) maximum.

以上より、無反動制御を用いることで、リアクションホイールを用いた姿勢制御系と比較して、省エネルギー化が可能であるといえる。

5 結言

本論文では、浮遊ベースロボットにおいて、反動零空間法を利用した無反動制御と、リアクションホイールを使用した姿勢制御を、エネルギー効率の観点から数値シミュレーションにより比較検証した。宇宙ロボットの作業として想定される、点検動作、展開動作および PTP 動作において検証した結果、リアクションホイールに生じる運動エネルギーが大きいため、無反動制御を用いることでエネルギー効率が改善可能なことが示された。

文 献

- [1] D. Nenchev, Y. Umetani, and K. Yoshida, "Analysis of a redundant free-flying spacecraft/manipulator system," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 1992.
- [2] T. J. Debus and S. P. Dougherty, "Overview and performance of the front-end robotics enabling near-term demonstration (FRIEND) robotic arm," in *Proc. AIAA Unmanned Unlimited Conference*, 2009, pp. 1–12.
- [3] D. Dimitrov and K. Yoshida, "Utilization of the bias momentum approach for capturing a tumbling satellite," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2004, pp. 3333–3338.
- [4] D. Nenchev and K. Yoshida, "Impact analysis and post-impact motion control issues of a free-floating Space robot subject to a force impulse," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 3, pp. 548–557, 1999.
- [5] H. Sone and D. Nenchev, "On some practical reactionless motion tasks with a free-floating space robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2015, to be presented.
- [6] M. Oda, K. Kibe, and F. Yamagata, "ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, vol. 1, 1997, pp. 739–744.
- [7] K. Yoshida, D. Nenchev, P. Vichitkulsawat, H. Kobayashi, and M. Uchiyama, "Experiments on the point-to-point operations of a flexible structure mounted manipulator system," *Advanced Robotics*, vol. 11, no. 4, pp. 397–411, 1996.