

# 平面浮遊ベース宇宙ロボットにおける Point-To-Point 無反動制御

Reactionless Point-To-Point Motion Control for a Planar Free-Floating Space Robot

学 曾根 大樹 (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

Daisuke SATO, Tokyo City University

Yoshikazu KANAMIYA (D. N. Nenchev), Tokyo City University

This paper describes a method of reactionless point-to-point motion control of a planar 3R manipulator on a free-floating base, utilizing the transposed Jacobian matrix. In case of reactionless motion control the singularity problem is of complex nature and the accessible workspace is severely limited. To alleviate the problem, we divide the joints into two sets. The joint closest to the base is used to constrain the base orientation. The other two joints are used to position the manipulator end-effector. As a result, the behavior of the system becomes sufficiently simple to analyze the accessible area via a geometric approach. We conclude that if the desired position is set in the specified area, reactionless point-to-point motion control can be accomplished regardless of the initial configuration of the manipulator.

**Key Words:** Free-floating redundant space robot, Reactionless motion control, Point-To-Point motion

## 1 緒言

近年, 急速な発展を遂げてきた宇宙開発において, 宇宙飛行士の作業を代替する軌道上ロボットが期待されている。軌道上ロボットの課題点として, ベース部とマニピュレータ部が動的に干渉することが挙げられ, 特に, 人工衛星にマニピュレータが搭載された浮遊ベースロボットにおいては, この干渉による衛星の姿勢変化が通信障害を引き起こすため, 作業の継続が困難となる。

この問題に対して, 一般的にはリアクションホイールを利用した姿勢安定化が用いられるが, リアクションホイールは低出力トルクであるため, マニピュレータを低速度で駆動させる必要がある。また, 作業終了後における衛星の姿勢回復待ちに多くの時間を要するため, 作業効率の面において望ましくないとされる。そのため, ベース部に対して低反動でマニピュレータ部を制御することが求められ, 中でも, 無反動制御を実現可能な反動零空間法 [1] は軌道上ロボットの制御において重要な理論となる。

しかし, 無反動制御におけるマニピュレータ部先端の軌道追従は複雑な特異点を起因し, 作業範囲が縮小することが確認されている [2]。この問題に対して, 特異点の生じる原因がベース部とマニピュレータ部先端の同時拘束であるため, 拘束条件を緩和し, 経路追従とすることで作業範囲が拡大可能であることが示されている [3]。しかし, これは柔軟ベースを持つモデルの特性を利用した制御手法であり, 浮遊ベースロボットへの適応は困難である。

この拘束条件の緩和という観点に着目した場合, Point-To-Point (PTP) 制御はマニピュレータ部先端に対して拘束を必要としないため, 特異点を起因することなく, 広範囲での無反動制御を利用した位置制御が期待できる。そこで本稿では, 無反動制御における転置ヤコビ行列を用いた PTP 動作について, 運動学的冗長性を有する平面 3 自由度モデルを対象として議論し, 制御可能な条件について述べ

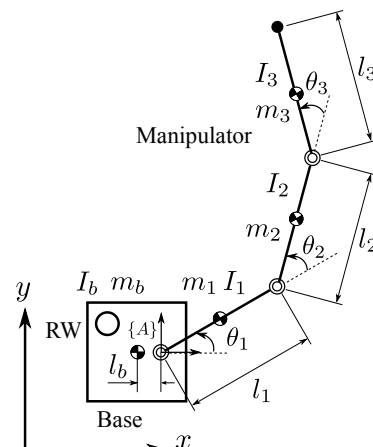


Fig. 1: Planar 3 dof redundant free-floating space manipulator system.

Table 1: Physical parameters of the applied model.

Link number	Length $l_i$ [m]	Mass $m_i$ [kg]
$b$	0.3	1000
1	1.0	20
2	1.0	20
3	1.0	20

る。そして, 捕獲作業を想定した数値シミュレーションにより, その有用性を検証する。

## 2 対象モデル

本稿では, 図 1 に示す平面 3 自由度モデルを対象として議論する。このモデルの物理パラメータを表 1 に示す。本システムは並進 2 自由度, 回転 1 自由度の運動を行うベース部と 3 自由度のマニピュレータ部から構成される。システムの運動方程式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \tilde{m}_{\omega} & \tilde{m}_{\omega m} \\ \tilde{m}_{\omega m}^T & \tilde{M}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_b \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{c}_{\omega} \\ \tilde{c}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{RW} \\ \tau_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\omega_b \in \mathbb{R}$ ,  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \in \mathbb{R}^3$  はそれぞれベース部角速度, マニピュレータ部関節変位を表す.  $\tilde{m}_\omega \in \mathbb{R}$ ,  $\tilde{M}_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,  $\tilde{m}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$  はそれぞれベース部重心回りのシステム全体の慣性モーメント, マニピュレータ部慣性行列, ベース部とマニピュレータ部間の干渉慣性行列を表す.  $\tilde{c}_\omega \in \mathbb{R}$ ,  $\tilde{c}_m \in \mathbb{R}^3$  はベース部とマニピュレータ部の速度非線形項,  $\tau_m \in \mathbb{R}^3$ ,  $\tau_{RW} \in \mathbb{R}$  はマニピュレータ部関節駆動力, リアクションホイールの出力トルクを表す. ただし,  $\{\circ\}$  はベース部並進運動を陰に含んだ表現であることに注意されたい [4].

また, 軌道上ロボットにおいては, 外力が加わらない場合に角 (並進) 運動量が厳密に保存される. 初期状態においてシステムは静止していると仮定すると, ベース部重心を基準としたシステムの角運動量保存則は以下となる.

$$\tilde{m}_\omega \omega_b + \tilde{m}_{\omega m} \dot{\theta} = 0 \quad (2)$$

式中, 左辺第一項はベース部の運動により生じる角運動量, 第二項はマニピュレータ部の運動により生じる角運動量を表し, 干渉角運動量とよばれる.

### 3 反動零空間法に基づく無反動制御

反動零空間法はベース部とマニピュレータ部の動力学的干渉を扱う力学概念である. ベース部に対して無反動なマニピュレータ部の運動はベース部が静止している状態を仮定し,  $\tilde{m}_{\omega m} \dot{\theta} = 0$  の拘束を満たす関節速度の集合として求まる. 上記の関節速度は射影行列を用いて以下となる.

$$\dot{\theta} = P_{RNS} \dot{\theta}_a \quad (3)$$

式中,  $P_{RNS} = I_3 - \tilde{m}_{\omega m}^+ \tilde{m}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は零空間射影行列,  $I_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は単位行列,  $\dot{\theta}_a \in \mathbb{R}^3$  は関節速度次元の任意ベクトルを表す. 無反動制御下におけるマニピュレータ部先端制御は順運動学の関係式  $v_e = J_v \dot{\theta}$  に式 (3) を代入することにより, 以下となる.

$$\dot{\theta} = [J_v P_{RNS}]^+ v_e \quad (4)$$

式中,  $v_e \in \mathbb{R}^2$  はマニピュレータ部先端の並進速度,  $J_v \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$  はマニピュレータ部先端の並進速度に関するヤコビ行列を表す. また, 拘束行列,

$$J_{FAR} = [J_v P_{RNS}] \in \mathbb{R}^{2 \times 3} \quad (5)$$

は FAR (Fixed-Attitude Restricted) ヤコビ行列 [1] と呼ばれ, ベース部姿勢とマニピュレータ部先端位置の同時拘束を与える.

### 4 転置ヤコビ行列を用いた PTP 制御

一般的に, PTP 制御として関節空間上による軌道計画, 転置ヤコビ行列を用いた手法などが知られている. しかし, 無反動制御下における関節の運動は独立なものとならないため, 関節空間上での制御は困難となる. そこで, 本稿では転置ヤコビ行列を用いた PTP 制御について議論する. はじめに, 式 (5) に示した FAR ヤコビ行列を用いた場合について考える.

#### 4.1 転置 FAR ヤコビ行列を用いた制御の問題点

関節速度指令値は転置 FAR ヤコビ行列を用いることにより以下となる.

$$\dot{\theta}^{ref} = K_p J_{FAR}^T \Delta x_e \quad (6)$$

式中,  $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は比例ゲイン行列,  $\Delta x_e = x_e^{des} - x_e \in \mathbb{R}^2$  はマニピュレータ部先端の目標位置  $x_e^{des}$  と現在位置  $x_e$  の誤差ベクトルを表す. このとき, 問題となるのが  $J_{FAR}^T \Delta x_e = 0$  ( $\Delta x_e \neq 0$ ) となり目標位置への制御が不可能な場合である. これは, 誤差ベクトルが転置 FAR ヤコビ行列の零空間ベクトルとなる状態であり, その方向はモデルの物理パラメータおよびマニピュレータ部姿勢に依存し変化するため予測が困難となる.

この問題に対して, ベース部姿勢拘束とマニピュレータ部先端制御に用いる関節を分離することにより, 零空間ベクトルの方向を簡略化し, 目標位置への無反動制御が保証される条件について議論する.

#### 4.2 零空間ベクトルの簡略化

式 (6) を用いた場合の無反動制御は三つの関節の協調動作により成される. そのため, その運動を予測することが困難であり, 制御可能な条件が不明確となる. これに対して, 1 番関節をベース部姿勢拘束, 2, 3 番関節をマニピュレータ部先端制御に割り当てた場合, 2, 3 番関節の運動は独立なものとなるため, 比較的容易にシステムの挙動を把握することが可能となる.

このとき, 上記の概念を満たす関節速度は, (2) において  $\tilde{m}_{\omega m} \dot{\theta}$  を 1 番関節と 2, 3 番関節に関する項に分離し以下となる.

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} -[\tilde{m}_{\omega m}^1]^{-1} \tilde{m}_\omega \\ 0_2 \end{bmatrix} \omega_b + \begin{bmatrix} -[\tilde{m}_{\omega m}^1]^{-1} \tilde{m}_{\omega m}^{23} \\ I_2 \end{bmatrix} \dot{\theta}_{23} \quad (7)$$

式中,  $\tilde{m}_{\omega m}^1 \in \mathbb{R}$ ,  $\tilde{m}_{\omega m}^{23} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$  はそれぞれ  $\tilde{m}_{\omega m}$  の 1 番関節, 2, 3 番関節に関する項,  $I_2 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  は単位行列,  $0_2 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  は零行列を表す.  $\dot{\theta}_{23} = [\dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$  は 2, 3 番関節の回転速度を表し, マニピュレータ部先端制御に用いる. 上記において,  $\omega_b = 0$  とすることにより, ベース部に対して無反動なマニピュレータ部の動作が生成される<sup>\*1</sup>.

マニピュレータ部先端制御は 2, 3 番関節に関するヤコビ行列を用いて以下とする.

$$\dot{\theta}_{23}^{ref} = \alpha(t) K_p \hat{J}_v^{23T} \Delta x_e \quad (8)$$

式中,  $\alpha(t) \in \mathbb{R}$  は関節速度の補間に用いる正定値関数,  $\hat{J}_v^{23} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  は 2, 3 番関節の関節速度とマニピュレータ部先端速度のヤコビ行列を表す. ただし, 1 番関節およびベース部並進運動の影響を考慮する必要があるため, 一般化ヤコビ行列 [5] と同様の手順を用いて, 陰にその影響を含むことに注意されたい.

<sup>\*1</sup>  $\tilde{m}_{\omega m}^1$  に特異点が存在することが想定されるが, 対象モデルにおいては,  $\tilde{m}_{\omega m}^1 > 0$  であるため, 本稿では言及しないこととする.

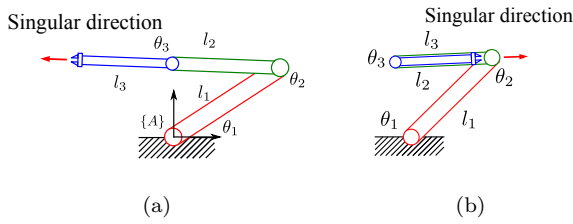


Fig. 2: Singular direction of the Jacobian matrix: (a)  $\theta_3 = 0$  rad and (b)  $\theta_3 = \pm\pi$  rad.

ここで、式 (6) の場合と同様に、

$$\hat{J}_v^{23T} \Delta x_e = 0 \quad (\Delta x_e \neq 0) \quad (9)$$

となる状態について考える． $\hat{J}_v^{23T}$  は正方行列であるため、特定のマニピュレータ部姿勢を除き正則である．そのため、 $\hat{J}_v^{23T}$  に零空間が存在するのは、図 2 に示すように  $\theta_3 = 0, \pm\pi$  rad となった状態のみである．しかし、実際のシステムを考慮した場合、 $\theta_3 = \pm\pi$  rad となるような姿勢は物理的に困難であるため、本稿では、 $\theta_3 = 0$  rad の場合のみ扱うものとする．以下、このマニピュレータ部姿勢を特異姿勢、先端速度が得られない方向 ( $\hat{J}_v^{23T}$  の零空間ベクトル) を特異方向とする．

#### 4.2.1 到達可能領域

図 3 に示すように、1 番関節を特定の角度に固定した場合、先端の二つの関節およびリンクから成る 2 自由度マニピュレータの先端が取り得る領域は、2 番関節を中心とする半径  $l_2 + l_3$  の円形領域となる<sup>\*2</sup>．目標位置がこの領域外にある場合、誤差ベクトルと特異方向が一致するため制御不可となる．そのため、マニピュレータ部先端を目標位置へ制御するには、この領域内に目標位置を設定する必要がある．しかし、この領域は 1 番関節の運動により動的に平行移動することから、その変化を予測することは困難である．

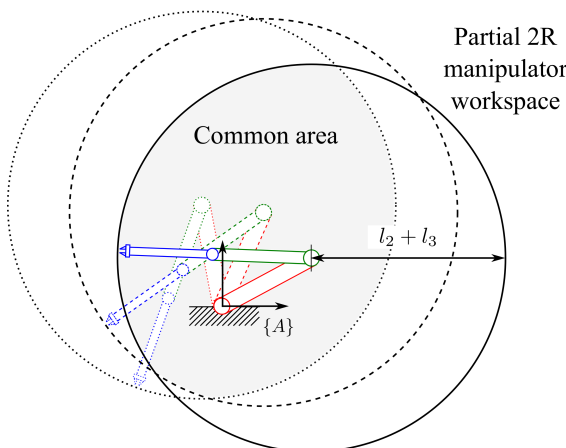


Fig. 3: The workspace of the partial 2R manipulator varies depending on the motion of joint 1.

<sup>\*2</sup> 本稿においては、簡略化のため 1 番関節に固定された相対座標系  $\{A\}$  を基準に考える．特に、 $\{A\}$  で記述されたベクトルに関しては、 ${}^A\{\circ\}$  と明記する．

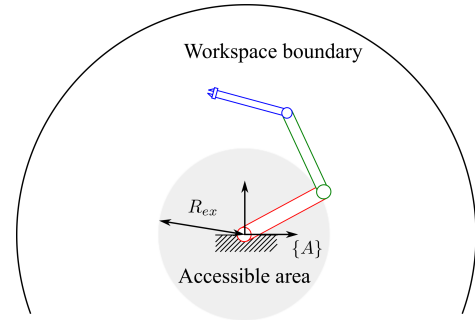


Fig. 4: Setting the desired position within the accessible area, guarantees asymptotic stability in the large.

そこで、保守的となるがこれらすべての領域の共通部分を求めることにより、任意の初期姿勢から到達可能な領域を定める．この共通部分は図 4 に示す 1 番関節を中心とする円形の領域となり、その半径  $R_{ex}$  は幾何学より以下となる．

$$R_{ex} = -l_1 + l_2 + l_3 \quad (10)$$

ただし、 $l_1 < l_2 + l_3$  の条件とする．

## 5 数値シミュレーションによる検証

### 5.1 シミュレーション条件

数値シミュレーションより、提案手法の制御性能を検証した．想定する作業内容として浮遊物の捕獲作業を考える．簡略化のため、捕獲対象物は慣性空間上に浮遊する質点を考え、ロボットとの相対速度は零と仮定し、接触・衝突については考慮しない．また、対象物の位置についてはベース部に取り付けられたステレオカメラなどにより検出可能であると仮定する．ベース部の過大な姿勢変化は衝突、通信障害などを起因するため、最大姿勢誤差 0.05 deg の作業制約を与える．以下、作業手順を示す (図 5)．

- Phase I : 初期姿勢から中間姿勢へ移動
- Phase II : 関節 1 を目標角度へ移動
- Phase III : 対象物付近へマニピュレータ部先端を移動
- Phase IV : 捕獲終了後、対象物を格納するためマニピュレータ部先端をベース部付近へ移動

先に述べたように、式 (8) を用いた場合、図 4 に示した

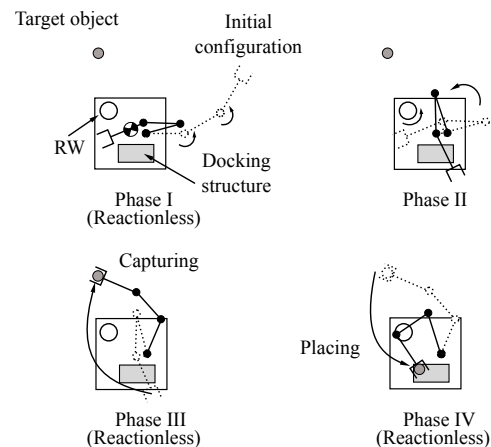


Fig. 5: Motion strategy for capturing operation.

Table 2: Simulation condition.

	Final time $t_f$	45 s
	Max RW torque $ \tau_{RW} $	1.0 Nm
Phase I	Final time $t_f^1$	5 s
	$\theta(t_0^1)$	$[0 \ 30 \ 30]^T$ deg
	$\theta_{23}^{des}(t_f^1)$	$[170 \ 0]^T$ deg
Phase II	Final time $t_f^2$	15 s
	$\theta(t_0^2)$	$\theta(t_f^1)$
	$\theta(t_f^2)$	$[29 \ 170 \ 10]^T$ deg
Phase III	Final time $t_f^3$	10 s
	$\theta(t_0^3)$	$\theta(t_f^2)$
	$\mathbf{x}_e(t_f^3)$	$[-0.174 \ 2.69]^T$ m
Phase IV	Final time $t_f^4$	15 s
	$\mathbf{x}_e(t_0^4)$	$\mathbf{x}_e(t_f^3)$
	${}^A\mathbf{x}_e(t_f^4)$	$[-0.2 \ -0.2]^T$ m

領域外の目標位置への無反動制御は保証されない．そこで，Phase I, II に示すように，目標位置への無反動制御が保証される姿勢（中間姿勢）を経由し，式 (8) を用いて作業空間上の目標位置へ PTP 制御を行った．Phase II では無反動制御が利用できないためリアクションホイールを用いることに注意されたい．

関節への速度指令値として，Phase III, IV では式 (8) を用い，Phase I では PD 制御として以下を用いた．

$$\dot{\theta}_{23}^{ref}(t) = \dot{\theta}_{23}^{des}(t) + K_{p\theta}(\theta_{23}^{des}(t) - \theta_{23}) \quad (11)$$

式中， $\theta_{23}^{des}(t) \in \mathbb{R}^2$  は五次多項式補間による関節目標軌道， $K_{p\theta} = \text{diag}(3, 3)$  1/s は比例ゲイン行列を表す．中間姿勢は，捕獲時の目標姿勢（Phase III）から式 (11) を用いて，マニピュレータ部重心がベース部重心位置付近となるような姿勢へ 2, 3 番関節を制御した際の終端姿勢を採用した．このような姿勢を中間姿勢とすることにより，マニピュレータ部の動作によるベース部重心回りの反動モーメントが小さくなるため，Phase II において，ベース部の過大な姿勢変化を防ぐことができる [6]．

各フェーズにおける条件を表 2 に示す． $\{\circ\}(t_0^i)$ ， $\{\circ\}(t_f^i)$  はそれぞれ各フェーズにおける初期状態および終端状態を表す．Phase IV においては，対象物の質量 20 kg をマニピュレータ部先端の質量に加えるものとした．また，式 (8) における  $\alpha(t)$  は， $t_0^i$  から  $t_f^i$  の間に 0 から 1 へ指数的に増加する関数とし， $K_p = \text{diag}(30, 30)$  に設定した．

## 5.2 シミュレーション結果

図 6 より，Phase I, III, IV においては，ベース部に対して無反動なマニピュレーションとなっていることが確認できる．特に，Phase III, IV における PTP 制御では目標位置への無反動制御の実現が確認できる．

本作業計画では，Phase II の中間姿勢への制御の際に，リアクションホイールを用いる必要があるが，Phase I, III, IV においては，ベース部に反動を与えないマニピュレーションが可能であるため，マニピュレータを性能限界で駆動させ

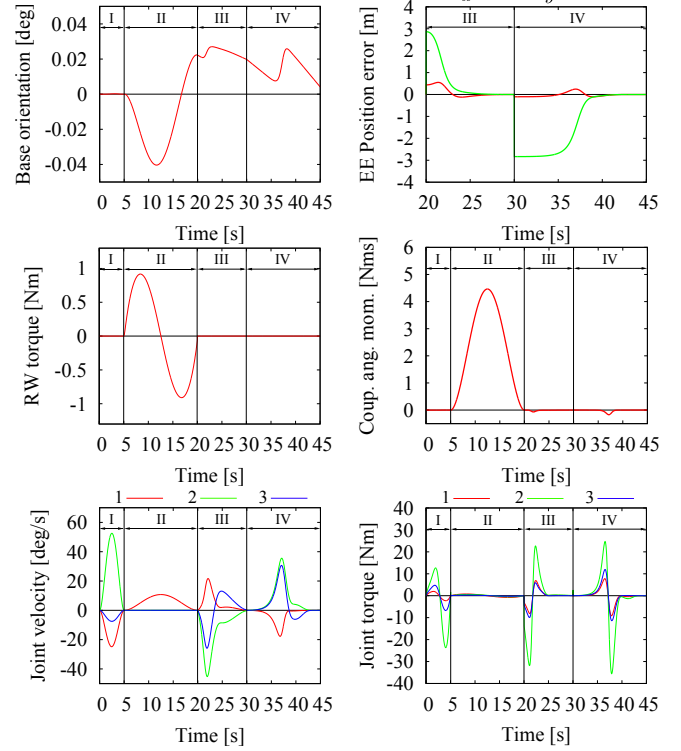


Fig. 6: Simulation results

ることにより，効率の良い作業が期待できる．特に，Phase IV において，本手法は任意の位置から無反動で搬送作業を行うことが可能なため，有用性があるといえる．

## 6 結言

本稿では，運動学的冗長性を有する平面宇宙ロボットに対して，転置ヤコビ行列を用いた PTP 動作を実現する無反動制御について提案し，任意の初期姿勢から無反動制御で到達可能な領域を幾何学的に定めた．そして，捕獲作業を想定した数値シミュレーションにより，提案手法の有用性を示した．

## 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] Y. Fukazu, N. Hara, Y. Kanamiya, and D. Sato, "Reactionless resolved acceleration control with vibration suppression capability for JEMRMS/SFA," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 2009, pp. 1359–1364.
- [3] N. Hara, D. Sato, and Y. Kanamiya, "Path-following control of a flexible-base manipulator considering dynamic singularities and external force," in *Proc. SICE Annual Conference*, 2011, pp. 2654–2659.
- [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] Y. Umetani and K. Yoshida, "Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 5, no. 3, pp. 303–314, 1989.
- [6] K. Yoshida, D. Nenchev, P. Vichitkulsawat, H. Kobayashi, and M. Uchiyama, "Experiments on the PTP operations of a flexible structure mounted manipulator system," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intel. Robots and Systems.*, 1996, pp. 246–251.