

J192023

干渉慣性行列を用いた JEMRMS/SFA の経路追従・反動制御*

原 直行^{*1}, 佐藤 大祐^{*1}, 金宮 好和^{*1}

Path-Following Reaction Control Using Coupling Inertia Properties for JEMRMS/SFA

Naoyuki HARA^{*1}, Daisuke SATO and Yoshikazu KANAMIYA

^{*1} Graduate School of Engineering, Tokyo City University
1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557, Japan

In this paper, a path-following reaction control method for a macro-mini manipulator system such as JEMRMS/SFA, that can achieve the control of both, end-effector path following with the mini manipulator and vibration suppression of the macro manipulator holding the mini part, by making use of the coupling inertia properties, is presented. Such simultaneous control, however, leads to the appearance of dynamic singularities. At the singularities, the control performance degrades and the system may be destabilized. With a heavy object and/or with high speed conditions, a large reaction force from the macro part to the controlled mini part is generated because of the coupling inertia properties between the mini part and the macro part. Therefore, we make good use of the reaction force to generate the end-effector path-following control and the vibration suppression. The performance of the proposed control method can be illustrated via several numerical simulations with a JEMRMS/SFA model developed in our past study.

Key Words : Macro-Mini Manipulator, Reactionless Motion, Vibration Control, Path-Following Tracking, Dynamic Singularity

1. 緒 言

国際宇宙ステーションの日本実験棟 (Japanese Experiment Module: JEM) には, 実験装置や搭載機器の交換作業に用いられるロボットアーム (JEM Remote Manipulator System/Small Fine Arm: JEMRMS/SFA) が搭載されている⁽¹⁾. このようなロボットシステムは, マクロミニマニピュレータシステムと呼ばれ, ミニマニピュレータ (ミニ部) 動作反動がマクロマニピュレータ (マクロ部) の振動を誘発する問題が存在する. 過去には, 振動抑制制御⁽²⁾や残余振動を最小に抑える制御⁽³⁾, 振動抑制の最適制御⁽⁴⁾などが提案されている. 一方我々は, 振動問題が与えるミニ部手先の精度の影響も考慮し, 振動抑制とミニ部手先制御を同時に満たす制御手法を目指している. しかしながら, 振動抑制との手先制御を同時に扱う場合ダイナミック特異点⁽⁵⁾が現れる. キネマティック特異点の分布が事前に予測し回避することが可能である一方で, ダイナミック特異点の分布は予測が困難である. 過去に我々は, このダイナミック特異点問題を解決可能な振動抑制制御手法について研究を行ってきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

本稿では, このダイナミック特異点に対する新たな制御手法として, 干渉慣性行列を用いた経路追従・反動制御を提案する. ダイナミック特異点では, 手先と振動抑制時のマニピュレータ重心の位置関係による幾何学的矛盾が発生し制御不能に陥る. 過去の研究で我々は, 手先の経路追従を用いベース部への反動をマニピュレータ全身の動作生成に利用する手法を提案した⁽⁸⁾. この手法は, 手先の経路追従により指定方向に対する位置制御の精度は失われるが, 反動を用いたミニ部動作生成により, 反動制御の一つである振動抑制制御を総括して扱える. これにより, 制御に必要な拘束を減らしダイナミック特異点による不安定な状態を解決可能である. そこで以下では, 我々が過去に構築した JEMRMS/SFA モデルの動力学シミュレーションを対象とし, 三次元モデルにおける本手法の有効性について示す. ただし, マクロ部関節軸を一般化座標としているため, マクロ部手先に掛かる反動を扱

* 原稿受付 2012 年 07 月 09 日

^{*1} 正員, 東京都市大学 大学院 工学研究科 機械システム工学専攻 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

Email: hara@rls.mse.tcu.ac.jp

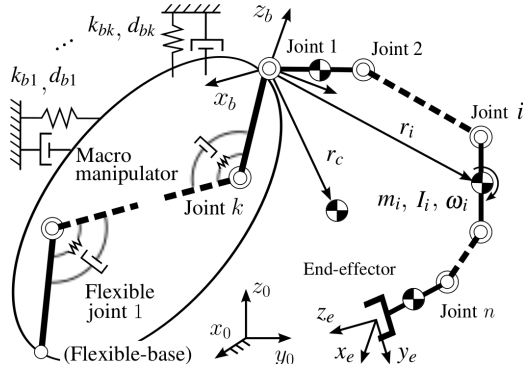


Fig. 1 Macro-mini manipulator system.

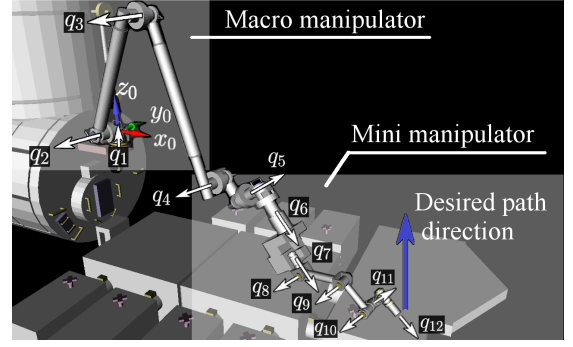


Fig. 2 Simulation model of JEMRMS/SFA.

えない．そこで，過去に提案した作業座標における定式化を適用した JEMRMS/SFA モデルを用い⁽⁹⁾マクロ部手先に掛かるミニ部の反動を制御可能にする．

2. マクロミニマニピュレータシステムの作業座標により定式化されたマクロ部モデル

マクロミニマニピュレータ運動方程式を以下に示す¹⁾．ただし，以下では外乱およびモデル誤差は考慮しない．

$$\begin{bmatrix} H_M & H_{Mm} \\ H_{Mm}^T & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_M \\ \ddot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_M & 0 \\ 0 & D_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_M \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_M \\ q_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_M \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $q_M \in \mathcal{R}^k$ と $q_m \in \mathcal{R}^n$ はそれぞれマクロ部とミニ部の一般化座標， $\Delta q_M \in \mathcal{R}^k$ は平衡点からの関節変位を示す． $H_M(\Delta q_M, q_m) \in \mathcal{R}^{k \times k}$ および $H_m(q_m) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ はマクロ部およびミニ部の慣性行列を， $H_{Mm}(\Delta q_M, q_m) \in \mathcal{R}^{k \times n}$ はマクロ部とミニ部間の干渉慣性行列を示す． $D_M, K_M \in \mathcal{R}^{k \times k}$ はマクロ部のダンパおよび剛性を示す正定値対角行列， $D_m \in \mathcal{R}^{n \times n}$ はミニ部のダンパを示す正定値対角行列である． $c_M(\Delta q_M, q_m, \dot{q}_M, \dot{q}_m) \in \mathcal{R}^k$ および $c_m(\Delta q_M, q_m, \dot{q}_M, \dot{q}_m) \in \mathcal{R}^n$ は，それぞれマクロ部とミニ部の速度依存項を示し， $\tau \in \mathcal{R}^n$ は関節トルクを示す．

上記モデルでは，マクロ部手先座標におけるミニ部からの反動を考慮できない．そこで，マクロ部モデルをマクロ部手先の作業座標系について定式化する．式 (1) よりマクロ部の運動方程式は

$$H_M \ddot{q}_M + D_M \dot{q}_M + K_M \Delta q_M = \tau_M \quad (2)$$

となる．ただし， $\tau_M (= -H_{Mm} \ddot{q}_m - c_M)$ はマクロ部が受けるミニ部の動作反トルクであり，ミニ部がマクロ部に掛ける負荷トルク τ_{Mm} と，作用・反作用の関係にある ($\tau_M = -\tau_{Mm}$)．よって，

$$\tau_{Mm} = H_{Mm} \ddot{q}_m + c_M \quad (3)$$

を得る．慣性座標系を基準としたマクロ部手先位置姿勢を示す加速度 $\ddot{\mathcal{V}}_b \in \mathcal{R}^6$ とマクロ部一般化座標の関係は，順運動学より $\ddot{\mathcal{V}}_b = J_M \ddot{q}_M + \dot{J}_M \dot{q}_M$ と与えられる．ただし $J_M \in \mathcal{R}^{6 \times k}$ はマクロ部手先ヤコビ行列である．ここで簡単化のため，マクロ部手先の並進方向のみ考慮しマクロ部に冗長自由度がない ($k \leq 3$) ことを仮定する²⁾．非冗長マニピュレータであるマクロ部の運動方程式は，マクロ部の順運動学を用いて

$$H_b \ddot{\mathcal{V}}_b + D_b \dot{\mathcal{V}}_b + K_b \Delta x_b(\Delta q_M) = -f_{bm} \quad (4)$$

と書き換えられる³⁾．ただし， $H_b = (J_M H_M^{-1} J_M^T)^{-1}$ ， $D_b = (J_M D_M^{-1} J_M^T)^{-1}$ ， $K_b \Delta x_b = J_M^{-T} K_M \Delta q_M$ である．また右辺は

$$f_{bm} = H_{bm} \ddot{q}_m + c_b \quad (5)$$

であり， $H_{bm} = J_M^{-T} H_{Mm}$ ， $c_b = J_M^{-T} c_M - H_b \dot{J}_M \dot{q}_M$ である．以上より，マクロ部姿勢に対するマクロ部手先のダンパ係数は，柔軟ベース部のダンパ係数が一定の状態⁽⁴⁾ではなく，マクロ部関節の姿勢に対して変化する．さらに，マクロ部の姿勢を考慮した手先座標系におけるミニ部反力を考慮可能となる．

¹⁾ $(\circ)_M$ ， $(\circ)_m$ ， $(\circ)_{Mm}$ は，それぞれマクロ部およびミニ部，マクロ部とミニ部の干渉を示している．

²⁾ 冗長を考慮したい場合は文献 (10) を，回転を考慮する場合は文献 (11) をそれぞれ参照されたい．

³⁾ 並進のみ考慮のため， $\mathcal{V} \rightarrow v$ ， $\mathcal{X} \rightarrow x$ と置き換えた．

3. ミニマニピュレータの二重タスク化と経路追従・反動制御

慣性座標系を基準としたミニマニピュレータ順運動学の時間微分は、手先ヤコビ行列 $J_e(q) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ を用いて $\dot{\mathcal{V}}_e = J_e \ddot{q} + \dot{J}_e \dot{q} + \dot{\mathcal{V}}_b \in \mathbb{R}^6$ と示せる．また、ミニマニピュレータ動作によるマクロ部への動作反動の影響は、式 (5) より把握できる．この干渉慣性行列を含むミニ部とマクロ部の動力学的な関係式を用い、マクロ部への反動を制御する．この二つの拘束を同時に満たすため、以下のように二重タスク化を行う．

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_e \\ f_m \end{bmatrix} = A \ddot{q} + \begin{bmatrix} \dot{J}_e \dot{q} \\ c_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_b \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} J_e \\ H_{bm} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(6+3) \times n} \quad (6)$$

行列 A が正方行列 ($n = 6 + 3 = 9$) の場合、式 (6) より、求める指令関節角加速度は行列 A の逆行列 A^{-1} を用いて

$$\ddot{q} = A^{-1} \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_e \\ f_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{J}_e \dot{q} \\ c_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_b \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

となる．しかし、ここで A^{-1} に由来するダイナミック特異点問題が存在する．ダイナミック特異点は、手先作業空間内に多く分布し、キネマティック特異点の性質と異なりその分布がミニピュレータ姿勢とともに時系列で変化する．つまり、事前にダイナミック特異点を予測し回避することが困難となる⁽⁵⁾．

この問題を緩和するため、我々は手先制御において経路追従を適用し、ミニマニピュレータがマクロ部先端に掛ける反力（反動）を利用した手先制御を適用する⁽⁸⁾．一般的に、ミニピュレータの手先を動作させる場合、その動作反動がミニピュレータ固定部に掛かる．一方で、ミニピュレータは固定部より反力を得る．これにより、適切な手先位置制御を実現している．一方で、マクロミニマニピュレータシステムの場合、ミニマニピュレータ固定部に掛かる動作反動の一部は、固定部の運動に奪われ、結果ミニマニピュレータの手先制御に必要な制御は得られない．そこで、逆に運動量・角運動量を操作することで、ミニピュレータ全体の重心位置を移動させる．さらに、重心の移動方向に対するミニピュレータ手先の経路追従を行うことで、重心移動による手先動作を実現する．ここでは、 z 軸方向に対する運動量・角運動量変化によるミニピュレータ重心移動を例にあげる．よって、手先は z 軸方向に経路追従を行う．

$$\ddot{q}^{ref} = A_z^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{v}_{ez}^{ref} \\ f_{bmz}^{ref} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{J}_{ez} \dot{q} \\ c_{bz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{v}_{bz} \\ 0 \end{bmatrix} \right) + n_{A_z}, \quad A_z = \begin{bmatrix} J_{ez} \\ h_{bmz} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(5+1) \times 9} \quad (8)$$

A_z^+ は、 A_z の右擬似逆行列を示しており、 $\|\ddot{q}^{ref}\|$ を最小にする局所最適解を得る． $n_{A_z} \in \mathbb{R}^3$ は、 $\ker(A_z)$ より得られる適当な零空間ベクトルでありサブタスクを与えられる．ただし、ダイナミック特異点の問題が存在することに注意されたい．本稿では、第 1 項目に注目するため、零空間ベクトル項を用いたサブタスクは与えない．

最後に、経路追従・反動制御の制御設計を行う．式 (8) の指令手先加速度 \dot{v}_{ez}^{ref} を以下のように設計する．

$$\dot{v}_{ez}^r(s) = \dot{v}_{ez}^d(s) + k_d(v_{ez}^d(s) - v_{ez}) + k_p(x_{ez}^d(s) - x_{ez}) \quad (9)$$

$s = s(x_{ez}(t))$ は軌道パラメータであり、これにより動作中の z 軸方向に対する追従制御を実現する．次に、指令手先負荷力 f_{bmz}^{ref} を以下のように設計する．

$$f_{bmz}^{ref} = f_{bmz}^{des} + k_f(p_{bmz}^{des} - p_{bmz}) + f_{vsz} \quad (10)$$

f_{vsz} は、振動抑制制御 $f_{vs} = D_b^{vs} v_b - H_b \dot{J}_M \dot{q}_M$ の z 軸成分を示す．ただし、 $D_b^{vs} = (J_M (D_M^{vs})^{-1} J_M^T)^{-1}$ は正定値対角行列の振動抑制ゲインであり、 J_M により決定される．つまり、マクロ部の姿勢に依存する．ただし、 D_M^{vs} の対角成分はゼロに設定できないことに注意されたい．上記指令関節角加速度は、計算トルク制御により、指令トルク値としてシステムに入力する．計算トルクコントローラは、式 (1) の下段より以下のように設計することができる．

$$\tau = H_m \ddot{q}^r + c_m + D_m \dot{q} + H_{bm}^T \dot{\mathcal{V}}_b \quad (11)$$

本手法は、マクロ部から受ける反力を利用した手法であり、反動を利用するためには、マクロ部関節の固有角振動数（例えば、第 2 関節の固有角振動数は、 $\omega_n = 0.39 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ）以下の遅さでミニ部を動作させる必要がある．

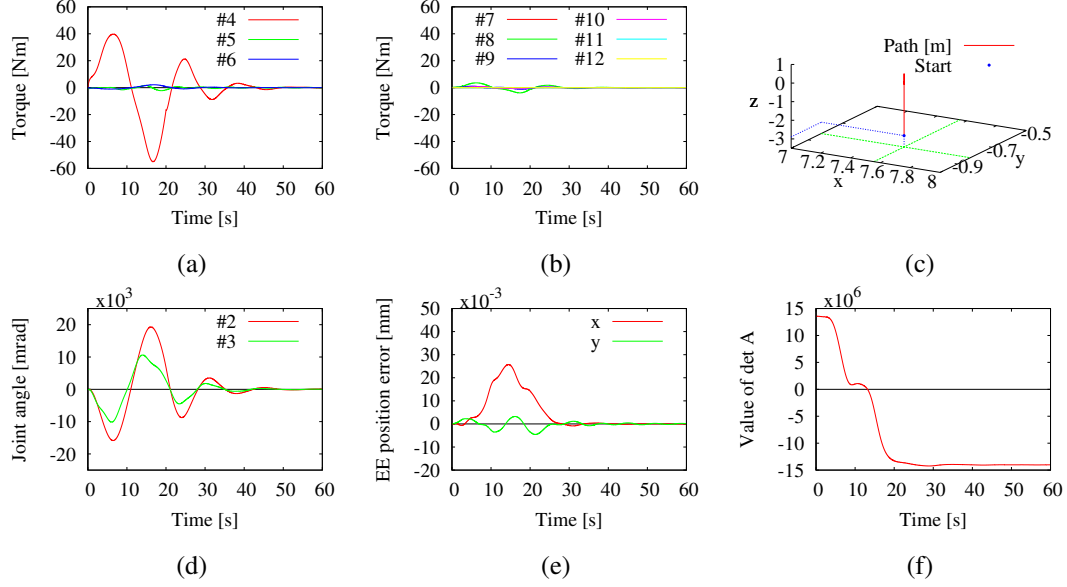


Fig. 3 The results of the numerical simulation via the proposed control for JEMRMS/SFA: input torques ((a) fourth-sixth and (b) seventh-twelfth joint); (c) three-dimensional end-effector position; (d) second and third joint angles; (e) the end-effector (EE) position errors of the mini manipulator along x and y -axes; (f) the value of $\det A$.

4. シミュレーション

図2に示すように、JEMRMS/SFAモデルは6自由度を有するJEMRMSの手先に6自由度のSFAが搭載されたマクロミニマニピュレータシステムである．図中の各パラメータ詳細およびスケルトン図は、文献(12)を参照されたい．また本稿においても、JEMRMSの第4, 5, 6関節とSFAの全関節を三次元上の冗長9自由度のミニ部として扱い、ねじりばねを有する第1, 2, 3関節部分をマクロ部と呼ぶ．シミュレーションの初期姿勢は、 $q_M = [-10 \ 40 \ -110]^T \text{ deg}$ 、 $q_m = [20 \ 0 \ 0 \ 0 \ 50 \ -50 \ 0 \ 0 \ 45]^T \text{ deg}$ である．マニピュレータ手先は、初期姿勢の位置より z 軸方向（図2中の矢印、Desired path direction）へ経路追従させる．これにより、マクロ部の第2, 3柔軟関節が振動する．直線の軌道追従中、ミニ部手先の姿勢は初期姿勢を維持する．ミニ部反動制御の目標値は、五次補間を用いたスプライン関数により生成し、20 sで初期位置から最終位置まで制御する．直線軌道追従後、終点位置にて40 s間静止状態とした．よって、シミュレーションの合計時間は60 sである、またシミュレーションのサンプリング時間は1 msとした．その他の各ゲインの設定値を以下に示す．

$$\begin{aligned}
 K_M &= \text{diag}[8000, 8000, 8000] \text{ Nm} & K_d &= \text{diag}[10, 10, 10, 20, 20, 20] \text{ s}^{-1} \\
 D_M &= \text{diag}[10, 10, 10] \text{ Nsm} & K_p &= \text{diag}[1000, 1000, 1000, 50, 50, 50] \text{ s}^{-2} \\
 D_m &= \text{diag}[10, 10, 10, 8, 8, 8, 8, 8, 8] \text{ Nsm} & D_M^{vs} &= \text{diag}[10000, 10000, 10000] \text{ s}^{-1} \\
 D_{mc} &= \text{diag}[1, 1, 1000, 1, 1, 1, 1, 1, 1] \text{ Nsm} & k_f &= 0.5 \text{ s}^{-1}
 \end{aligned}$$

図2より確認できる通り、 z_6 および z_7 は軸が平行であり、さらに軸間が狭い．これは、動作中に z_6 の関節に対し過大な角速度を発生させる可能性がある．このため、ミニ部の第3関節（JEMRMSの第6関節）の制御粘性 D_{mc} の値を他のゲインより高く設定した．

シミュレーション結果を図3に示す．(a) および (b) はミニ部関節（第4関節から第12関節まで）に入力したトルク値を、(c) はミニ部手先の経路を、(d) はマクロ部関節の第2関節および第3関節の関節変位を、(e) はミニ部手先の時系列に対する x 軸および y 軸方向の位置誤差を、(f) は行列式 A の値をそれぞれ示す．

(a) および (b) より、ミニ部の一番根元関節である第4関節がマニピュレータ動作に大きく影響していることが分かる．これは、マクロ部 z 軸方向に対し力を掛けるために、ミニ部重心を加速させた結果である．この反動制御により、(d) のマクロ部第2関節および第3関節が大きく変異していることが確認できる．(d) に示すように、マクロ部関節の角振動数はミニ部動作反動による影響を受け、より小さくなっている．そのため、本シミュレーショ

ンのミニ部動作は、マクロ部振動に対し速く、これ以上速くするとマクロ部からの反力を利用できない。スプライン関数により連続的な軌道を与えていながらも 20 s で (a) の第 4 関節トルク値が一時離散的になっているのも、ミニ部の全室量が 480 kg と非常に大きく動作が速いためである。ただし、動作に影響はない。また、ミニ部手先の z 軸方向に対する経路追従が (c) より確認できる。一方で、それ以外のミニ部手先位置姿勢誤差は、(g) より十分得られていることが確認できる。さらに、ミニ部経路追従と振動抑制を総括したことにより、ダイナミック特異点を通過していることが確認できる。

5. 結 言

本稿では、マクロミニマニピュレータシステムのミニ部反動制御とミニ部手先の経路追従制御を総括する手法について述べた。また、JEMRMS/SFA を対称とした動力学モデルのシミュレーションを通して、提案手法の有効性について議論した。

本手法は、手先の経路追従を行うため、位置制御の精度は失われる。しかし、反動を用いたミニ部動作生成と振動抑制制御を総括して扱える。結果、制御に必要な拘束を減らせダイナミック特異点による不安定な状態を解決可能である。ただし、本シミュレーションでは運動量のみ扱った。今後は、角運動量の制御についても検討したい。

文 献

- (1) 土井忍, 若林靖史, 松江達夫, 佐藤直樹, “ロボットアーム”, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 50, No. 476, (1987), pp. 7–14.
- (2) Lee, S. H., and Book, W. J., “Robot Vibration Control Using Inertial Damping Forces,” in *Proceedings of 8th CISM-IFTOMM Symposium RoManSy 8*, Cracow, Poland, (1990), pp. 252–259.
- (3) Cannon, D. W., Magee, D. P., Book, W. J., and Lew, J. Y., “Experimental Study on Micro/Macro Manipulator Vibration Control,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1996), pp. 2549–2554.
- (4) Abiko, S., and Yoshida, K., “An Adaptive Control of a Space Manipulator for Vibration Suppression,” in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, (2005), pp. 2888–2893.
- (5) Papadopoulos, E., and Dubowsky, S., “Dynamic Singularities in Free-Floating Space Manipulators,” in *contributed chapter in Space Robotics: Dynamics and Control*, Xu, Y., and Kanade, T., Eds. Boston, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, (1993), pp. 77–100.
- (6) Hara, N., Fukazu, Y., Kanamiya, Y., and Sato, D., “Singularity-Consistent Torque Control of a Redundant Flexible-Base Manipulator,” in *Motion and Vibration Control*, Ulbrich, H., and Ginzinger, L. Eds. Springer Science+Business Media B.V. (2009), pp. 103–112.
- (7) Hara, N., Kanamiya, Y., and Sato, D., “Stable Path Tracking With JEMRMS Through Vibration Suppression Algorithmic Singularities Using Momentum Conservation,” in *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, (2010), pp. 214–221.
- (8) Hara, N., Sato, D., Kanamiya, Y., “Path-Following Control of a Flexible-Base Manipulator Considering Dynamic Singularities and External Force,” in *Proceedings of SICE Annual Conference*, (2011), pp. 2654–2659.
- (9) 原直行, 佐藤大祐, 金宮好和, “作業空間の定式化による JEMRMS/SFA の振動制御”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2012), 1A2-J10.
- (10) Khatib, O., “A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: the Operational Space Formulation,” *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 1, (1987), pp. 43–53.
- (11) Quinn, R. D., “Equations of Motion for Structures in Terms of Quasi-Coordinates,” *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, No. 3, (1990), pp. 745–749.
- (12) Fukazu, Y., Hara, N., Kanamiya, Y., and Sato, D., “Reactionless Resolved Acceleration Control With Vibration Suppression Capability for JEMRMS/SFA,” in *Proceedings of the IEEE international conference on Robotics and Biomimetics*, (2009), pp. 1359–1364.