

作業空間の定式化による JEMRMS/SFA の振動抑制

Vibration Suppression of JEMRMS/SFA via Operational Space Formulation

正 原 直行 (東京都市大学) 正 佐藤 大祐 (東京都市大学)
正 金宮 好和 (東京都市大学)

Naoyuki HARA, Tokyo City University, hara@rls.mse.tcu.ac.jp

Daisuke SATO, Tokyo City University

Yoshikazu KANAMIYA, Tokyo City University

The description of the equation of motion (EoM) based on the Operational Space Formulation (OSF) and the vibration suppression control method based on the description, for Japanese Experiment Module Remote Manipulator System/ Small Fine Arm (JEMRMS/SFA), are proposed. The EoM has damping and spring properties in the first three joints of JEMRMS, called a macro part. Hence, the properties of the tip of the macro part should be changed by the configuration and displacement of each joint angle via OSF. This paper presents the validity of the proposed method through JEMRMS/SFA modeled dynamic simulation.

Key Words: Vibration Suppression, Macro-Mini Manipulator System, Operational Space Formulation

1 緒言

国際宇宙ステーションに搭載されている日本のロボットアームは、親アーム (Japanese Experiment Module Remote Manipulator System: JEMRMS) と子アーム (Small Fine Arm: SFA) で構成されたマクロミニマニピュレータシステムであり、実験装置や搭載機器の交換作業などに用いられる [1]。マクロミニマニピュレータシステムは、マクロマニピュレータ (マクロ部) により粗位置決めを行った後、次にマクロ部の関節を固定した状態でミニマニピュレータ (ミニ部) による精細作業を行う。しかし、ミニ部での作業中に発生する動作反動がマクロ部の関節に伝わり、マクロ部のギアボックス内に存在するバックラッシュ等が関節の振動問題を引き起こす [2]。さらに、この振動問題がマニピュレータ手先の位置精度に悪影響を与える。マクロミニマニピュレータの振動問題に対する取り組みは数多く、Lee らによる慣性力を利用した振動抑制 [3] や、Cannon らによる振動を最小に抑える動作生成 [4]、Mavroidis らによる振動中でのミニ部手先制御 [5] などがあげられる。

JEMRMS/SFA を対象とした他の研究では、此上らが Input Shaping (Preshaping) を利用したフィードフォワード制振制御を適用しており [6]、我孫子らが干渉慣性力を利用した振動抑制の最適制御を提案している [7]。我々の過去の研究では、ミニ部手先追従とマクロ部振動抑制を同時に制御する手法を提案している [14]。しかし、振動抑制で用いているマクロ部のモデリングは異なっている。我孫子らがマクロ部をばねダンパを有する一つの剛体 (柔軟ベース部) として扱っているのに対し、我々はマクロ部を関節の一般化座標で扱っている。柔軟ベース部として扱った場合、マクロ部の姿勢を正確に表現できないため、実際のモデルとは異なるが、逆に我々のモデル化手法ではより実際

に近いモデリングではある一方で、マクロ部手先にかかるミニ部反動の影響は考慮できない。

そこで我々は、マクロ部の姿勢を手先座標系で表現可能な作業空間による定式化 (Operational Space Formulation) を適用する。この手法は、モデリングと力制御の観点より議論されており [8][9]、マクロミニマニピュレータシステムへも適用されている [10]。我々は、マクロ部関節のダンパ特性をマクロ部手先のダンパ特性に反映させるため、作業空間による定式化を利用する。また、上記手法に基づく振動抑制制御を提案する。これにより、振動抑制制御に最適なダンパゲインが、マクロ部関節に設定された振動抑制ゲインとマクロ部の姿勢により決定でき、またマクロ部手先にかかるミニ部反動を考慮しつつマクロ部関節の振動抑制が可能となる。Sharf がマクロ部手先座標系での振動抑制を提案しているが、振動抑制ゲインは一定値を設定しており、マクロ部の姿勢は考慮していない [11]。

以上より本稿では、マクロ部の姿勢依存を考慮しつつ運動方程式を記述可能な作業空間による定式化を適用し、これに基づく新たな振動抑制制御を提案する。以下では、まず作業空間の定式化による JEMRMS/SFA マクロ部のモデリング手法と、これに基づく振動抑制制御を導出する。次に、JEMRMS/SFA をモデルとしたの動力学シミュレーションを通して、提案する振動抑制制御の有効性を示す。

2 マクロミニマニピュレータシステムの振動抑制制御

マクロミニマニピュレータ運動方程式を以下に示す^{*1}。

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

^{*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。

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

式 (1) よりマクロ部の運動方程式は以下ようになる.

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

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 (以降反トルク) であり, ミニ部がマクロ部に掛ける負荷トルク τ_{Mm} (以降負荷トルク) 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. 振動抑制制御は, マクロ部関節の変位に対するマニピュレータ動作により実現でき, $\tau_{Mm} = D_M^{vs} \dot{q}_M$ と設計する. 式中, $D_M^{vs} \in \mathbb{R}^{k \times k}$ は振動抑制ゲイン対角行列である. 以上より, 振動抑制制御は以下のように設計される.

$$\ddot{q}_m = H_{Mm}^+ (D_M^{vs} \dot{q}_M - c_M) + \ddot{q}_{H_{Mm}} \quad (4)$$

式中, $\ddot{q}_{H_{Mm}}$ は反動零空間 [12] の零空間ベクトルである. $(\circ)^+$ は擬似逆行列を示し, 行列式の値が零となった場合に特有の特異点問題を引き起こす.

3 柔軟ベースマニピュレータの振動抑制制御

一つの剛体として柔軟ベースを表した場合, 柔軟ベースマニピュレータは, 以下のように示される^{*2}.

$$\begin{bmatrix} H_b & H_{bm} \\ H_{bm}^T & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_b \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_b & 0 \\ 0 & D_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{V}_b \\ q_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathcal{X}_b \\ q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\mathcal{V}_b \in \mathbb{R}^r$ と $q_m \in \mathbb{R}^n$ はそれぞれ柔軟ベース部とマニピュレータ部の一般化座標, $\Delta \mathcal{X}_b \in \mathbb{R}^r$ ($r \leq 6$) は平衡点からの関節変位を示す. $H_b(\Delta \mathcal{X}_b, q_m) \in \mathbb{R}^{r \times r}$ システム全体の慣性行列を, $H_{bm}(\Delta \mathcal{X}_b, q_m) \in \mathbb{R}^{r \times n}$ は柔軟ベース部とマニピュレータ部の干渉慣性行列を示す. $D_b, K_b \in \mathbb{R}^{r \times r}$ は柔軟ベース部のダンパおよび剛性を示す行列, $D_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はマニピュレータ部のダンパを示す正定値対角行列である. $c_b(\Delta \mathcal{X}_b, q_m, \mathcal{V}_b, \dot{q}_m) \in \mathbb{R}^r$ および $c_m(\Delta \mathcal{X}_b, q_m, \mathcal{V}_b, \dot{q}_m) \in \mathbb{R}^n$ は, それぞれ柔軟ベース部とマニピュレータ部の速度依存項を示す. 柔軟ベース部の運動方程式を取り出すと以下となる.

$$H_b \dot{\mathcal{V}}_b + D_b \mathcal{V}_b + K_b \Delta \mathcal{X}_b = \mathcal{F}_b \quad (6)$$

右辺は, マニピュレータ部動作による柔軟ベース部への反力 $\mathcal{F}_b = -H_{bm} \ddot{q}_m - c_b$ であり, マニピュレータ部動作により発生する負荷力 \mathcal{F}_{bm} と作用・反作用の関係 ($\mathcal{F}_b = -\mathcal{F}_{bm}$) にある. この柔軟ベース部とマニピュレータ部の干渉慣性行列を利用した振動抑制制御は, 以下のよう設計される.

$$\mathcal{F}_b = D_b^{vs} (\mathcal{V}_b^{des} - \mathcal{V}_b) = -\mathcal{F}_{bm} \quad (7)$$

柔軟ベース部の振動を止めるため $\mathcal{V}_b^{des} = 0$ であり, 結果 $\mathcal{F}_{bm} = D_b^{vs} \mathcal{V}_b$ を得る. よって, 求める関節角加速度は,

$$\ddot{q}_m = H_{bm}^+ (D_b^{vs} \mathcal{V}_b - c_b) + \ddot{q}_{H_{bm}} \quad (8)$$

式中, $D_b^{vs} \in \mathbb{R}^{r \times r}$ が振動抑制ゲインであり, 正定値対称行列である. また, $\ddot{q}_{H_{bm}}$ は零空間ベクトルである. ただし, H_{bm} が正規行列の場合は零空間ベクトルは存在しない. しかし, 柔軟ベース部としてマクロ部を扱った場合, 上記の手法では, マクロ部の姿勢が含まれずマクロ部の運動方程式が正確に表できない.

4 作業座標の定式化に基づくマクロ部の振動抑制制御

順運動学より得られる慣性座標系を基準としたマクロ部手先の加速度 $\dot{\mathcal{V}}_b$ は,

$$\dot{\mathcal{V}}_b = J_M \ddot{q}_M + \dot{J}_M \dot{q}_M \in \mathbb{R}^r \quad (9)$$

である. ただし $J_M \in \mathbb{R}^{r \times k}$ はマクロ部手先ヤコビ行列であり, (\circ) は時間微分を示す. ここで簡単化のため, ここでは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 ($r = k \leq 3$) ことを仮定する^{*3}.

このため, マクロ部手先ヤコビ行列 $J_M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は正則行列となる. よって, 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以下のように書き換えられる^{*4}.

$$H_b \dot{\mathcal{V}}_b + D_b \mathcal{V}_b + K_b \Delta \mathcal{X}_b (\Delta q_M) = -\mathcal{f}_{bm} \quad (10)$$

$$H_b = (J_M H_M^{-1} J_M^T)^{-1} \quad (11)$$

$$D_b = (J_M D_M^{-1} J_M^T)^{-1} \quad (12)$$

$$K_b \Delta \mathcal{X}_b = J_M^{-T} K_M \Delta q_M \quad (13)$$

式中, 右辺は

$$\mathcal{f}_{bm} = H_{bm} \ddot{q}_m + c_b \quad (14)$$

$$H_{bm} = J_M^{-T} H_{Mm}$$

$$c_b = J_M^{-T} c_M - H_b \dot{J}_M \dot{q}_M$$

で示される. つまり, マクロ部変位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のように一定ではなく, 式 (12), (13) に示すようにマクロ部関節角度に対して変化する. これにより, マクロ部の姿勢を考慮したまま手先座標系での力を考慮できる.

^{*2} $(\circ)_b, (\circ)_{bm}$ は, それぞれ柔軟ベース部およびそれとマニピュレータ部との干渉を示している.

^{*3} 冗長を考慮したい場合は [9] を, 回転を考慮する場合は [13] をそれぞれ参照されたい.

^{*4} 並進のみ考慮のため, $\mathcal{F} \rightarrow f, \mathcal{V} \rightarrow v, \mathcal{X} \rightarrow x$ とした.

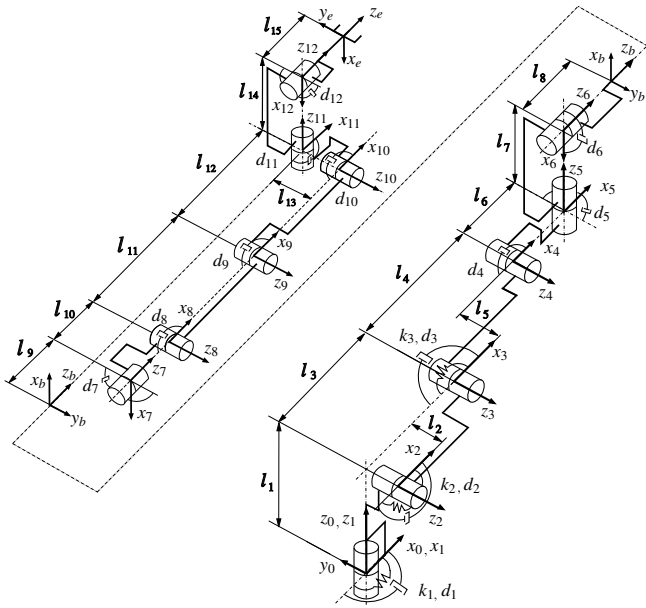


Fig. 1: Kinematic structure of JEMRMS (right figure) and SFA (left figure).

次に、上記までに述べた作業空間による定式化を基に振動抑制制御を導出する．式 (14) を参考に f_{bm} を以下のように設計する．

$$f_{bm} = D_b^{vs} v_b - H_b \dot{J}_M \dot{q}_M \quad (15)$$

$D_b^{vs} = (J_M (D_M^{vs})^{-1} J_M^T)^{-1}$ は正定値対角行列の振動抑制ゲインであり、マクロ部の姿勢状態 J_M により決定される．式 (15) を式 (14) へ代入することにより以下を得られる．

$$\begin{aligned} D_M^{vs} \ddot{q}_M &= H_{Mm} \ddot{q}_m + c_M \\ &= \tau_{Mm} \end{aligned} \quad (16)$$

結果、式 (3) と同等であることが確認できる．よって、求める関節角加速度は、

$$\ddot{q}_m = H_{Mm}^+ (J_M D_b^{vs} v_b - c_M) + \ddot{q}_{H_{Mm}} \quad (17)$$

となる．さらに、式 (15) を式 (2) に代入することで、以下の閉ループシステムを得る．

$$\begin{aligned} H_M \ddot{q}_M + D_M \dot{q}_M + K_M \Delta q_M &= -D_M^{vs} \dot{q}_M \\ \Rightarrow H_M \ddot{q}_M + (D_M + D_M^{vs}) \dot{q}_M + K_M \Delta q_M &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

よって、適当なゲイン行列 D_M^{vs} を選択することで、閉ループシステムは安定である．

4.1 シミュレーション

JEMRMS/SFA の幾何学モデルを Fig. 1 に示す．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（リンク長さ、質量、慣性パラメータ、重心位置）の詳細は、文献 [14] を参照されたい．これら幾何学パラメータに加えて、各関節に粘性減衰および JEMRMS の第 1, 2, 3 関節にねじりばねを設定した．実際、JEMRMS/SFA の柔軟性のほとんどがリンクよりも関節に存在することが報告されている [15]．さらに、Fig. 2 に示すように JEMRMS の第 4, 5, 6 関

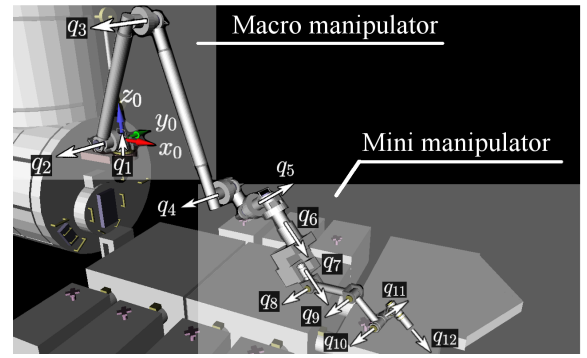


Fig. 2: Macro manipulator (q_1-q_3) and mini manipulator (q_4-q_{12}). This initial configuration and the desired path direction are used in the simulations.

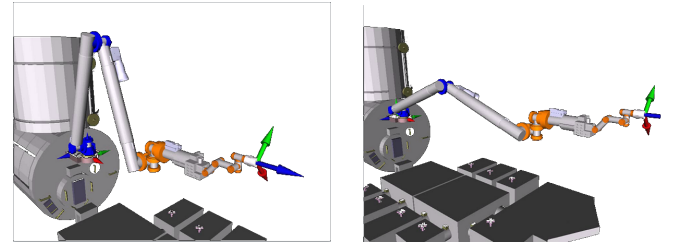


Fig. 3: Configurations of the macro part of JEMRMS/SFA: (a) case 1 and (b) case 2.

節と SFA の全関節は、三次元上の冗長 9 自由度マニピュレータとして扱う．その上で、ねじりばねを有する第 1, 2, 3 関節部分をマクロ部と呼び、冗長 9 自由度マニピュレータをミニ部と呼ぶ．我孫子らは、マクロ部を独立 6 自由度の柔軟ベース部として扱っている [7] が、我々は実際により近い受動的な 3 自由度の柔軟関節としてマクロ部の振動を扱う．なお、JEMRMS はモータ軸にレゾルバおよび出力軸に光学式エンコーダを搭載しており [15]、提案する制御則に必要なマクロ部柔軟関節の振動を評価することは可能である．指令トルク値を算出するための計算トルク制御式は、式 (1) のミニ部の運動方程式より導出できる．

$$\tau^{ref} = H_m \ddot{q}_m^{ref} + D_m \dot{q}_m + c_m + H_{Mm}^T \ddot{q}_M \quad (19)$$

本動力学シミュレータでは、SpaceDynX[16] を採用し、JEMRMS/SFA のモデリングおよび制御実装を行った．

シミュレーションは 2 種類のマクロ部姿勢で行った．具体的なマニピュレータ初期姿勢の数値を Table 1 に示す．また Case 1 と Case 2 の姿勢を、それぞれ Fig. 3 (a) と (b) に示す．図中、マクロ部の関節を青色、ミニ部の関節をオレンジ色として示す．

マクロ部手先の $x_o - z_o$ 平面に焦点を当てる．そのため、マクロ部関節に初期変位 $\Delta q_M = [0 \ 0.1 \ 0.1]^T$ deg を持たせることで振動を発生させた．振動抑制制御は、Method I が式 (8) を、Method II が式 (17) を用いてい

Table 1: Initial configurations of the macro part.

| | q_M | q_m Unit: [deg] |
|--------|---------------------|--|
| Case 1 | $[0 \ 70 \ -140]^T$ | $[70 \ 0 \ 0 \ 0 \ 50 \ -50 \ 0 \ 0 \ 45]^T$ |
| Case 2 | $[0 \ 20 \ -40]^T$ | $[20 \ 0 \ 0 \ 0 \ 50 \ -50 \ 0 \ 0 \ 45]^T$ |

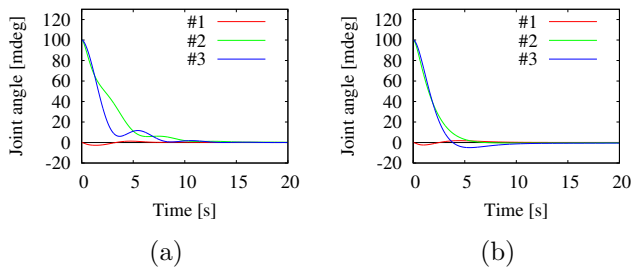


Fig. 4: The results of the numerical simulation in case 1.

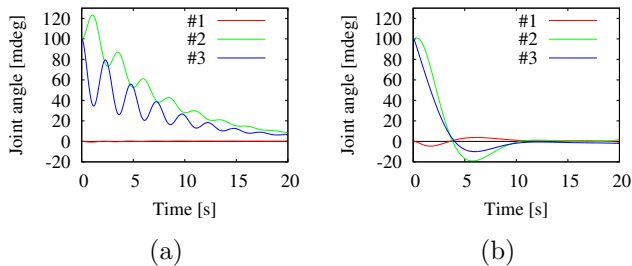


Fig. 5: The results of the numerical simulation in case 2.

た．Method I と II の大きな違いは，Method I の D_b^{vs} が一定であるのに対し，Method II の D_b^{vs} は D_M^{vs} とマクロ部姿勢で決定される可変ゲインである点である．各ゲイン行列は，シミュレーションが発散しない程度に設定し， $D_b^{vs} = \text{diag}(0.4, 0.4, 0.4) \times 10^3 \text{ Nm/s}$ ， $D_M^{vs} = \text{diag}(15, 15, 15) \times 10^3 \text{ Nm rad/s}$ とした．サンプリングタイムおよびシミュレーション時間は，それぞれ 1 s および 20 s とした．Case 1 および Case 2 における結果をそれぞれ Figs. 4, 5 に示す．図中，(a) は Method I の結果を，(b) は Method II をそれぞれ用いた結果を示している．それぞれの Case に対し，Method I および II を適用するため，計四つのシミュレーション結果となる．

Fig. 4 より，Case 1 の初期姿勢では，振動するマクロ部に対し Method I と II とともにマクロ部振動を瞬時に抑制していることが分かる．この結果からは，両者の性能に大きな違いは見られなかった．しかし Fig. 5 より，Case 2 の初期姿勢では，Method I が振動抑制の性能が落ちているのに対し，Method II では Case 1 と同様に，振動を抑制した．以上の結果より，マクロ部の姿勢を考慮した振動抑制が可能であると結論付ける．

5 緒言

本稿では，JEMRMS/SFA モデルを対象とした振動抑制制御において，マクロ部運動方程式を作業空間による定式化により表現することで，マクロ部の姿勢を考慮した振動抑制ゲインを得られる新たな振動抑制制御を提案した．そして，動力学シミュレーションにより新たに提案した振動抑制制御の有効性を示した．しかしながら，本稿では振動抑制制御に関する性能のみに焦点を当てており，ミニ部の手先制御を含んでいない．そのため，今後の研究課題として，ミニ部手先の軌道追従制御も考慮した場合の振動抑制制御について検討を進める．また，マクロ部の特異点問題にも取り組む必要がある．

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, pp. 7–14, 2002.
- [2] Wakabayashi, Y. et. al, “Performance of Japanese Robotic Arms of the International Space Station,” *15th Triennial World Congr. of the Int. Federation of Automat. Control*, Barcelona, Spain, 2002, pp. 21–26.
- [3] Lee, S. H. and Book, W. J., “Robot Vibration Control Using Inertial Damping Forces,” in *Proc. 8th CISM-IFTToMM Symp. RoManSy 8*, Cracow, Poland, Jul. 1990, pp. 252–259.
- [4] Cannon Jr., R. H. and Schmitz, E., “Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot,” *Int. J. Robot. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 62–75, 1984.
- [5] Mavroidis, C., Dubowsky, S. and Raju, V., “ENd-Point Control of Long Reach Manipulator Systems,” in *Proc. 9th World Congr. IFTToMM*, Milano, Italy, Sept. 1995, pp. 1740–1744.
- [6] 此上一也, 松永三郎, 上野浩史, 稲葉一幸, 小田茂茂, “柔軟宇宙ロボットの振動抑制を考慮した制御法の実験的検討,” 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 名古屋, 2004, 1A1-L1-20.
- [7] Abiko, S. and Yoshida, K., “An Adaptive Control of a Space Manipulator for Vibration Suppression,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, Edmonton, Canada, Aug. 2005, pp. 2167–2172.
- [8] Hayati, S., “Hybrid Position/Force Control of Multi-Arm Cooperating Robotics,” in *Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, San Francisco, CA, vol. 3, pp. 82–89.
- [9] Khatib, O., “A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: the Operational Space Formulation,” *Int. J. Robot. Autom.*, vol. RA-3, no. 1, pp. 43–53, Feb. 1987.
- [10] Schubert, H. C., “Impedance Control Flexible Macro/Mini Manipulators,” Ph.D. dissertation, Dept. Aeronautics and astronautics and the committee, Stanford Univ., Stanford, CA, 2000.
- [11] Sharf, I., “Active Damping of a Large Flexible Manipulator With a Short-Reach Robot,” in *Proc. American Control Conf.*, vol. 5 pp. 3329–3333, Jun. 1995.
- [12] Nenchev, D. N., Yoshida, K. and Uchiyama, M., “Reaction Null-Space Based Control of Flexible Structure Mounted Manipulator Systems,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, Kobe, Japan, Dec. 1996, pp. 4118–4123.
- [13] Quinn, R. D., “Equations of Motion for Structures in Terms of Quasi-Coordinates,” *ASME J. Applied Mechanics*, vol. 57, no. 3, pp. 745–749, 1990.
- [14] Fukazu, Y., et. al, “Reactionless Resolved Acceleration Control With Vibration Suppression Capability for JEMRMS/SFA,” in *proc. of the IEEE int. conf. on Robotics and Biomimetics*, (2009), pp. 1359–1364.
- [15] Wakabayashi, Y., et. al, “Performance of Japanese robotic arms of the international space station,” in *Proc. the 15th Triennial World Congr. Int. Federation of Automatic Control*, pp. 21–26, 2002.
- [16] Nenchev, D. N., “Space Robot Modeling and Control based on MaTX and SpaceDyn,” 計測自動制御学会東北支部 35 周年記念学術講演会予稿集, pp. 23–24, 1999.