

ダイナミック特異点を考慮した 柔軟ベース上マニピュレータの軌道追従・反動制御*

原 直行^{*1}, 佐藤 大祐^{*1}, 金宮 好和^{*1}

Trajectory Tracking Reaction Control of a Flexible-Base Manipulator Considering Dynamic Singularities

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

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

The main point of this study is to control both the end-effector motion of a flexible-base manipulator and the spatial force imposed by the manipulator motion on its base. Such simultaneous control, however, leads to the appearance of dynamic singularities. At the singularities, the control performance degrades and the system may be destabilized. In this paper, we introduce a trajectory tracking and reaction control method that ensures stable performance even for paths passing through dynamic singularities. In this way, the problem of reduced workspace due to the presence of such singularities can be alleviated. The results of simulation studies with a simple planar model and a realistic three-dimensional manipulator (JEMRMS/SFA) demonstrate the capabilities of the proposed controller.

Key Words : Flexible-Base Manipulator, Vibration Control, Dynamic Singularity, Reactionless Motion, Trajectory Tracking, Space Robot, Flexible Structure, Manipulator, Robot

1. 緒 言

柔軟ベース上マニピュレータを制御する場合、マニピュレータ動作による反動が柔軟ベースの振動問題を引き起こす。また同時に、振動問題はマニピュレータ先端の位置精度に悪影響を与える。このため我々は、振動抑制と同時にマニピュレータの先端制御を行うことに主眼を置いている。これまでの研究では、振動問題に対して、振動抑制制御^{(1)~(3)}や残余振動を最小に抑える制御⁽⁴⁾、振動抑制の最適制御⁽⁵⁾などが提案されている。マニピュレータの先端制御においては、一般的にキネマティック特異点問題が存在し、過去に冗長自由度を利用した特異点回避⁽⁶⁾や特異点低感度法⁽⁷⁾などが提案され、特異点低感度法の減衰因子の選び方が議論されている⁽⁸⁾。さらに、振動抑制とマニピュレータの先端制御を同時に扱う場合、ダイナミック特異点が現れる。文献 (9) では、フリーフローティングロボットの制御にダイナミック特異点が存在することが述べられており、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ことを指摘している。柔軟ベース上マニピュレータにおいても、マニピュレータを固定している柔軟ベース部とマニピュレータ部の間の干渉慣性を利用した振動抑制に由来するダイナミック特異点が存在する。

ダイナミック特異点の分布は、制御がマニピュレータの幾何学パラメータのみならず、質量および慣性パラメータに依存しているため、非線形の影響を受けマニピュレータ姿勢により時間変化する。過去の研究では、ダイナミック特異点の分布変化の議論や特異点付近での統括された制御手法の提案がされ、マニピュレータの作業範囲内において、先端位置制御と振動抑制制御を同時に達成可能であることが示された⁽¹⁰⁾。特に、タスク優先度⁽¹¹⁾の概念⁽¹²⁾⁽¹³⁾に基づき幾何学的な冗長自由度を利用することで、先端制御と同時にこの先端制御に起因する振動を抑制可能であることが示されている⁽¹⁴⁾。マニピュレータの幾何学的な冗長自由度が、マニピュレータ動作による振

* 原稿受付 2011 年 7 月 1 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)

E-mail: hara@rls.mse.tcu.ac.jp



動を抑制するのに有効な手段であることは過去より議論されており⁽¹⁵⁾，また作業範囲内に存在するダイナミック特異点付近では新たな振動問題も確認している⁽¹⁶⁾．

そこで本稿では，先端制御と振動抑制制御を同時に扱う場合に現れるダイナミック特異点およびその近傍付近での振動問題について扱う．我々は，マニピュレータ運動量制御の問題と捉え，解決のための2通りの切り替え制御を提案する．一つはダイナミック特異点付近にて振動抑制制御を停止する切り替え制御，もう一つはダイナミック特異点付近にて振動抑制制御から運動量保存則に基づくマニピュレーションへの切り替え制御である．前者は，ダイナミック特異点付近において振動問題を引き起こす原因となる，冗長自由度を利用した振動抑制制御を停止することで解決する．本手法は，比較的低速な動作に対しては非常に有効である一方で，比較的高速な動作に対しては逆に振動を許す結果となった．後者は，この比較的高速な動作において有効な手法であり，ダイナミック特異点付近で柔軟ベースとマニピュレータ間の干渉運動量⁽¹⁷⁾を一定になるようにフィードバック制御することで振動を発生させない．この干渉運動量は，マニピュレータと柔軟ベース間の動力学的な運動干渉により得られる，マニピュレータの運動が柔軟ベースに与える運動量である．以降ではマニピュレータ運動量と呼ぶ．また，マニピュレータ先端動作方向と幾何学的に矛盾しないマニピュレータ運動量を求めることで，振動抑制におけるダイナミック特異点問題を解決した．過去の研究においても，初期運動量を零と仮定し，マニピュレータ運動量を変化させず柔軟ベースの振動を誘発させない無反動制御を実現している⁽¹⁸⁾が，本提案手法は，初期運動量が零でない状態を仮定した，初期運動量保存に従う非零干渉運動量での無反動制御である．そのため，運動量保存制御と呼ぶ．これまでに，これら二つの提案手法に対する基礎的特性について二次元モデル⁽¹⁹⁾と三次元モデル⁽²⁰⁾で成果を得ている．その上で，得られた成果に基づいた柔軟ベース上マニピュレータのための新たな切り替え制御手法を提案し，その有効性および問題点について述べる．

これら制御手法の有効性について示すため，二つの動力学シミュレーションを構築し用いる．制御対象は，二次元モデルとして柔軟ベース上3リンク冗長マニピュレータ⁽¹⁰⁾を，三次元モデルとして JEMRMS/SFA (Japan Experiment Module Remote Manipulator System/Small Fine Arm)⁽²¹⁾をそれぞれ用いた．また，プログラミングには二次元モデルに対し高機能プログラミング言語 MaTX⁽²²⁾を，三次元モデルに対し MaTX 言語で書かれた宇宙ロボット用モデリングツールボックス SpaceDynX⁽²³⁾を用いた．JEMRMS/SFA は，国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」に搭載されたロボットアーム JEMRMS と，JEMRMS の先端に取り付けられた小型ロボットアーム SFA で構築されている⁽²⁴⁾．このようなロボットはマクロミニ(マクロマイクロ)マニピュレータシステムと呼ばれ⁽²⁵⁾，これまでに核廃棄物処理⁽²⁶⁾と宇宙マニピュレータ⁽²⁷⁾の二つのアプリケーションを対象として研究されてきた．このシステムは，大まかな位置決めをマクロマニピュレータ部(以降マクロ部)で行い，マクロ部の関節をロックした後，ミニマニピュレータ部(以降ミニ部)での細かな位置決めを行う．しかし，ミニ部の動作によるマクロ部の振動問題および遠隔操作されたミニ部先端制御におけるキネマティック特異点問題が存在する．また，ミニ部動作による反力が関節をロックされたマクロ部に作用し，マクロ部の関節に存在するバックラッシュが振動の原因となる⁽²⁸⁾．これらの問題を同時に解決するために，幾何学的冗長自由度を利用する．そこで，JEMRMS に存在する6自由度のうち JEM との固定部からの3自由度をマクロ部として，残りの3自由度と SFA の6自由度を合わせた9自由度を冗長マニピュレータとして用いる．

本稿の2節では，柔軟ベース上マニピュレータシステムのモデリングや，先端制御と反動制御を同時に行う二重タスクの定式化を行い，ダイナミック特異点問題について述べる．3節では，振動抑制制御や運動量保存制御を導出し，切り替え制御について示す．4，5節では，二次元上における柔軟ベース上3リンク冗長マニピュレータをモデルとした動力学シミュレータと三次元における JEMRMS/SFA モデルの動力学シミュレーションの結果より，ダイナミック特異点問題に対する提案手法の有効性について議論し，最後に6節で結言を述べる．

2. 柔軟ベース上マニピュレータモデル

2.1 運動方程式

図1に示す柔軟ベース上マニピュレータの運動方程式は，以下のように示される⁽¹⁸⁾．

$$\begin{bmatrix} H_b & H_{bm} \\ H_{bm}^T & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\gamma}_b \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{C}_b \\ c_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_b \gamma_b \\ D_m \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b \Delta \mathcal{X}_b \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

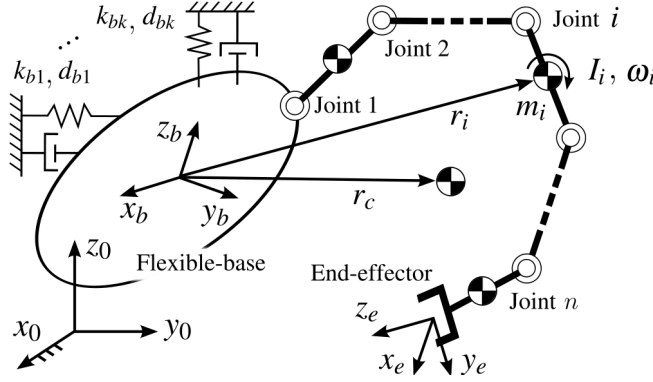


Fig. 1 Model of a flexible-base manipulator system.

式中, $\Delta \mathcal{X}_b \in \mathbb{R}^k$ は平衡点からの柔軟ベース部 (以降ベース部) 空間変位¹⁾, $\mathcal{V}_b = [v_b^T \ \omega_b^T]^T \in \mathbb{R}^k$ はベース部の空間速度, $q \in \mathbb{R}^n$ はマニピュレータの一般化座標である. $H_b(\Delta \mathcal{X}_b)$ はシステム全体の慣性項を, $D_b, K_b \in \mathbb{R}^{k \times k}$ はそれぞれベース部の粘性項, 剛性項を示す. $H_m(q), D_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は, マニピュレータ部の慣性項, 粘性項であり, $H_{bm}(\Delta \mathcal{X}_b, q) \in \mathbb{R}^{k \times n}$ は干渉慣性行列である. 下付き文字 $(\circ)_{bm}$ はマニピュレータとベース部の干渉を意味し²⁾, $\mathcal{C}_b(\Delta \mathcal{X}_b, q, \mathcal{V}_b, \dot{q}) \in \mathbb{R}^k$, $c_m(\Delta \mathcal{X}_b, q, \mathcal{V}_b, \dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ は速度依存項を, $\tau \in \mathbb{R}^n$ は関節トルクを示す. なお, 本論文では外乱がない理想的な完全モデルを仮定し, モデルの不確かさやロバスト性に関する問題は扱わない.

2.2 二重タスクの定式化

本節では, マニピュレータ先端制御 (以降先端制御) と, マニピュレータとベース部間に発生する反空間力制御を同時に行うための二重タスクについて定式化する. 式 (1) より, 慣性座標系 (図 1 の Σ_0) を基準としたベース部運動方程式は,

$$H_b \dot{\mathcal{V}}_b + D_b \mathcal{V}_b + K_b \Delta \mathcal{X}_b = \mathcal{F}_b \quad (2)$$

と書ける. \mathcal{F}_b はベース部における反空間力 (以降反力) であり, マニピュレータ動作によるベース部に対する負荷空間力 (以降負荷力) \mathcal{F}_{bm} と作用・反作用の関係 ($\mathcal{F}_b = -\mathcal{F}_{bm}$) にある. マニピュレータがベース部に与える負荷力は, ベース座標系 (図 1 の Σ_b) を基準として以下の式で示される.

$$\mathcal{F}_{bm} = H_{bm}(q) \ddot{q} + \dot{H}_{bm}(q, \dot{q}) \dot{q} \in \mathbb{R}^k \quad (3)$$

ここで \mathcal{C}_b はベース部の変位が小さいと仮定し, $\mathcal{C}_b \approx \dot{H}_{bm} \dot{q}$ と近似する. ベース部は \mathcal{F}_{bm} を通じて, マニピュレータ動作による影響を受けるため, 以降ベース負荷力と呼ぶ. このベース負荷力は, ベース座標系に対する干渉空間運動量⁽¹⁷⁾ (以降マニピュレータ運動量) $\mathcal{L}_{bm} \in \mathbb{R}^k$ に関する時間微分として示すことができる⁽²⁹⁾.

$$\mathcal{F}_{bm} = \frac{d}{dt} \mathcal{L}_{bm}, \quad \mathcal{L}_{bm} = \begin{bmatrix} m_t \dot{r}_c \\ r_c \times m_t \dot{r}_c + \sum_{i=1}^n (I_i \omega_i + r_i \times m_i \dot{r}_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, m_t と r_c は, システムの全質量とベース座標系からのシステムの重心位置, また, I_i, ω_i, m_i, r_i はそれぞれ, i 番目のリンク座標系における慣性パラメータ, 角速度, 質量, ベース座標系からの重心位置を示す (図 1 参照). 次に, 慣性座標系を基準とした先端の空間速度 $\mathcal{V}_e = [v_e^T \ \omega_e^T]^T \in \mathbb{R}^m$ の時間微分を示す.

$$\dot{\mathcal{V}}_e = J_e \ddot{q} + \dot{J}_e \dot{q} + \dot{\mathcal{V}}_b \quad (5)$$

ただし, $J_e(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ はベース座標系に対する先端ヤコビ行列である. 二重タスクは, 式 (3) と式 (5) より以下のように定式化できる.

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

¹⁾並進および回転を合わせた 6 軸の座標系は「Spatial」と表現される. 本稿ではこれを「空間」と表現し, 式中ではカリグラフィ文字を用いる.

²⁾ $(\circ)_m, (\circ)_b, (\circ)_e, (\circ)_c$ はそれぞれ, マニピュレータ部, ベース部, マニピュレータ先端, マニピュレータ重心を意味する.

また、二重タスクに対して冗長自由度を有する ($m+k \leq n$) マニピュレータを仮定した場合、 $[\dot{\mathcal{V}}_e^T \ \mathcal{F}_{bm}^T]^T$ に対する関節角加速度を以下で導出できる。

$$\ddot{q} = A^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_e \\ \mathcal{F}_{bm} \end{bmatrix} - \dot{A}\dot{q} - \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_b \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \ddot{q}_A \quad (7)$$

(\circ)⁺ は擬似逆行列を示す。また、 $\ddot{q}_A \in \mathcal{N}_A$ は A の零空間 \mathcal{N}_A を張る零空間ベクトルであり、物理的には冗長マニピュレータが有する冗長自由度によるセルフモーションの加速度を示す。この運動は、式 (7) の右辺第 1 項目と直交関係にあり、マニピュレータ先端の運動に対し直接影響を与えない。よって、式 (7) を用いることで先端およびベース負荷力を同時にかつ線形的に扱うことが可能となる。ただし、 A が正方行列となる場合は、 A の零空間が存在せず、擬似逆行列 A^+ は逆行列 A^{-1} となる。

2.3 ダイナミック特異点

先端自由度 m 個に対して冗長 ($m < n$) であり、ベース自由度を含む $m+k$ 個に対して非冗長 ($m+k = n$) であるマニピュレータにおいて、マニピュレータ先端制御とベース負荷力 \mathcal{F}_{bm} を同時に制御するための関節角加速度は、 A の逆行列により得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_e' \\ \mathcal{F}_{bm} - \dot{H}_{bm}\dot{q} \end{bmatrix} &= A\ddot{q}, \quad \dot{\mathcal{V}}_e' \triangleq \dot{\mathcal{V}}_e - J_e\dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_b \\ \ddot{q} &= A^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_e' \\ \mathcal{F}_{bm} - \dot{H}_{bm}\dot{q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

A の逆行列が得られない $\det A = 0^3$) の場合にダイナミック特異点となる。ダイナミック特異点は、マニピュレータ先端とベース負荷力を同時に扱う場合に現れるものであり、この特異点上では、 A の階数が先端自由度の次元より少なくなるため、過拘束状態に陥りシステムが不安定になる。また、ダイナミック特異点は、 $\det(J_e J_e^T) = 0$ (キネマティック特異点) および $\det(H_{bm} H_{bm}^T) = 0$ を同時に含み、一般化座標を変数として持つため、その分布はマニピュレータの姿勢により決定される。よって、ある時刻における姿勢に対するその分布は、幾何学的に解析可能であるが、非線形な影響を受ける制御中においては、時系列におけるマニピュレータの姿勢が予測できないため、結果的にダイナミック特異点の分布が予測できない⁽⁹⁾。さらに、自由度が増しモデル誤差や外乱を考慮する必要がある場合、分布予測はより一層困難となる。この詳細については、我々の先行研究⁽¹⁴⁾において、平面における柔軟ベース上 3 リンク冗長マニピュレータを対象に、ダイナミック特異点がマニピュレータ先端の作業範囲内に分布し、キネマティック特異点と比較して、マニピュレータの姿勢変化により連続的に変化する性質を持つことを示している。また、過去の研究において、このダイナミック特異点の影響によるマニピュレータ先端の作業領域が縮小する問題に直面している⁽¹⁰⁾。

そこで、タスク優先度⁽¹¹⁾を基にした、先端の作業領域を得るための擬似逆行列を利用した先端制御と、セルフモーション示す先端ヤコビ行列に関する零空間を利用したベース負荷力の制御を同時に行う以下の制御則を用い解決した⁽¹⁴⁾。

$$\ddot{q} = J_e^+ (\dot{\mathcal{V}}_e - J_e\dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_b) + \ddot{q}_{J_e}(\mathcal{F}_{bm}) \quad (9)$$

優先度の高い右辺第 1 項目により先端制御を行うことで、作業領域縮小問題を解決した。優先度の低い右辺第 2 項目の $\ddot{q}_{J_e} \in \mathcal{N}_{J_e}$ はベース負荷力を含む先端ヤコビ行列の零空間ベクトルであり、右辺第 1 項目の解と直交しているため、幾何学的には直接影響を与えない。つまり、セルフモーションを利用したベース負荷力の制御は、先端制御に無関係である。しかしながら、右辺第 2 項目 $\ddot{q}_{J_e} \in \mathbb{R}^{n \times k}$ にもダイナミック特異点が存在する。 \ddot{q}_{J_e} は、先端に影響を与えない範囲 ($\dot{\mathcal{V}}_e' = 0$) でのベース負荷力 \mathcal{F}_{bm} を実現するための関節角加速度であり、以下の式で示される。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \mathcal{F}_{bm} - \dot{H}_{bm}\dot{q} \end{bmatrix} = A\ddot{q}_{J_e}, \quad \ddot{q}_{J_e} = A^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathcal{F}_{bm} - \dot{H}_{bm}\dot{q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

³⁾ $m+k < n$ の場合、 $\det(AA^T) = 0$ である。

よって、この第2項目に現れるダイナミック特異点についての考慮が必要であり、以下では、その制御手法について議論していく。

3. ベース部への反動補償

これまでの研究成果では、式(9)を用いた先端とベース負荷力の制御において、ダイナミック特異点およびその近傍を通過する間のみ、式(9)の右辺第2項の振動抑制を担う零空間ベクトル $\ddot{q}_{Je}(\mathcal{F}_{bm})$ を除くことで、先端を制御しつつもベース部の振動を誘発させずにダイナミック特異点が通過可能であることを示した⁽¹⁶⁾。しかし、この方法は比較的低速な動作に対し有効であったが、比較的高速な動作においては、マニピュレータ先端制御によりマニピュレータの重心が加速してしまうために、ダイナミック特異点およびその近傍において振動を抑制することが不可能であった。そこで、ダイナミック特異点およびその近傍において、マニピュレータ重心の加速を抑える運動量保存制御を開発した。以下では、ベース部への反動補償を行う振動抑制制御と運動量保存制御について述べ、ダイナミック特異点およびその近傍を通過するための切り替え手法について述べる。また、これら制御に対する閉ループシステムを導出する。

3.1 振動抑制および運動量保存制御

振動抑制制御は、ベース部の変位や変位速度などを状態変数として用い、振動抑制制御のためのベース負荷力を算出し振動を抑制している。ここでは、ベース部の変位速度 \mathcal{V}_b を状態変数として用いる⁽⁴⁾。

$$\mathcal{F}_b^r = K_{vs}(\mathcal{V}_b^d - \mathcal{V}_b) = -\mathcal{F}_{bm}^r \quad (11)$$

ただし、 K_{vs} は正定値対角フィードバックゲイン行列である。また、式(11)は慣性座標系を基準としていることに注意されたい。振動抑制制御では、目標変位速度を零 ($\mathcal{V}_b^d = 0$) とすることでベース部振動を抑制するため

$$\mathcal{F}_{bm}^r = K_{vs}\mathcal{V}_b \quad (12)$$

を得る。

次に、運動量保存制御ではマニピュレータ運動量 \mathcal{L}_{bm} を状態変数として用いる⁽⁵⁾。正定値対角フィードバックゲイン行列を K_{mc} として、

$$\mathcal{F}_{bm}^r = K_{mc}(\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d - \mathcal{L}_{bm}) \quad (13)$$

となる。ただし、式(13)はベース座標系を基準としていることに注意されたい。マニピュレータ運動量が目標とする一定の運動量となる ($\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d = \mathcal{L}_{bm}$) 場合に $\mathcal{F}_{bm}^r = 0$ となり、ベース負荷力を与えない非零干渉運動量状態における無反動制御が可能となる。なお、切り替え時の $\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d$ は、サンプルホールド制御を採用することで得られる。

3.2 振動抑制および運動量保存制御の切り替え

比較的高速な動作中においてもダイナミック特異点およびその近傍を通過するために、上記の運動量保存制御則を利用するが、それ以外の領域においては振動抑制制御を用いる。そのため、ダイナミック特異点近傍へ進入する際、式(9)の右辺第2項目を式(11)の振動抑制制御から式(13)の運動量保存制御へ切り替え、通過後には運動量保存制御から振動抑制制御へ戻す。したがって、求める指令関節角加速度 \ddot{q}^r は、以下のように設計する。

$$\ddot{q}^r = J_e^+(\dot{\mathcal{V}}_e^r - \dot{J}_e\dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_b) + \ddot{q}_{Je}(\mathcal{F}_{bm}^r) \quad (14)$$

$$\dot{\mathcal{V}}_e^r = \dot{\mathcal{V}}_e^d + K_d(\mathcal{V}_e^d - \mathcal{V}_e) + K_p(\mathcal{X}_e^d - \mathcal{X}_e), \quad \mathcal{F}_{bm}^r = \begin{cases} K_{mc}(\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d - \mathcal{L}_{bm}) & \text{if } t_{in} \leq t \leq t_{out} \\ K_{vs}\mathcal{V}_b & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

⁽⁴⁾(○)^r および (○)^d は、それぞれ指定値、目標値を示す。

⁽⁵⁾上付きバー (○) は一定値を意味する。

$\mathcal{X}_e \in \mathbb{R}^m$ はマニピュレータ先端の位置および姿勢, K_p および $K_d \in \mathbb{R}^{m \times m}$ は正定値対角フィードバックゲイン行列, t_{in} および t_{out} はダイナミック特異点近傍への入出時刻を定義する. t_{in} の時点で, 指令値 \mathcal{F}_{bm}^r を振動抑制制御より運動量保存制御へ切り替え, t_{out} で運動量保存制御より振動抑制制御へ戻す. ただし, サンプルホールド制御より $\tilde{\mathcal{L}}_{bm}^d = \tilde{\mathcal{L}}_{bm}^d(t_{in})$ である.

ダイナミック特異点において A の階数が落ちることで, 冗長解である式 (14) の右辺第 2 項目 \ddot{q}_{J_e} を失う. よって, ダイナミック特異点定義内 ($t_{in} \leq t \leq t_{out}$) での運動量保存制御は, あらかじめ式 (7) の右辺第 2 項目 \ddot{q}_A を用いず, 次式のように右辺第 1 項のみを用いる.

$$\ddot{q}^r = A^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_e^r \\ \mathcal{F}_{bm}^r \end{bmatrix} - \dot{A}\dot{q} - \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_b \\ 0 \end{bmatrix} \right), \quad A \in \mathbb{R}^{(m+k) \times n} \quad (m+k \leq n) \quad (16)$$

3.3 柔軟ベース上マニピュレータでの計算トルク制御

比較的高速な動作での軌道追従制御は, 非線形の影響が増加するため, 非線形システムの線形化補償として計算トルク法, および線形化されたシステムに対するサーボ補償として分解加速度制御を利用する⁽³⁰⁾.

まず, 計算トルク制御について述べる. 柔軟ベース上マニピュレータにおける計算トルクコントローラは, 式 (1) より以下のように設計することができる.

$$\tau = H_m \ddot{q}^r + c_m + D_m \dot{q} + H_{bm}^T \dot{\mathcal{V}}_b \quad (17)$$

式 (17) のコントローラをマニピュレータの運動方程式に代入することで, 閉ループの動力学式 $\ddot{q} = \ddot{q}^r$ を得る. この閉ループの動力学式に, 式 (14) および式 (15) を代入することにより, 以下の誤差動力学方程式を得る.

$$(\dot{\mathcal{V}}_e^d - \dot{\mathcal{V}}_e) + K_d(\mathcal{V}_e^d - \mathcal{V}_e) + K_p(\mathcal{X}_e^d - \mathcal{X}_e) = 0 \quad (18)$$

ただし,

$$\ddot{q}_{J_e}(\mathcal{F}_{bm}^r) = P_{J_e} \zeta_e(\mathcal{F}_{bm}^r), \quad P_{J_e} = (U - J_e^+ J_e) \quad (19)$$

より $J_e \ddot{q}_{J_e} = 0$ であることに注意されたい. また, ζ_e は \mathcal{F}_{bm}^r により決定される任意ベクトルである. 動力学パラメータがモデルと一致している場合, 上記に適当なフィードバックゲインを与えることで, 任意の先端フィードバック制御が実現可能である.

一方で, この動作はベース部に対し振動を与える. 式 (1) のベースの運動方程式より,

$$H_b \ddot{\mathcal{V}}_b + D_b \dot{\mathcal{V}}_b + K_b \Delta \mathcal{X}_b = -H_{bm} \ddot{q} - \dot{H}_{bm} \dot{q} \quad (20)$$

を得る. $\zeta_e(\mathcal{F}_{bm}^r)$ は先端に影響を与えない範囲 ($\dot{\mathcal{V}}_e - J_e \dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_b = 0$) でのベース負荷力 \mathcal{F}_{bm} により決定されるベクトルであり, 以下の式を得る⁽³¹⁾.

$$\zeta_e = (H_{bm} P_{J_e})^+ (\mathcal{F}_{bm}^r - \dot{H}_{bm} \dot{q}) \quad (21)$$

よって, 式 (20) は,

$$H_b \ddot{\mathcal{V}}_b + D_b \dot{\mathcal{V}}_b + K_b \Delta \mathcal{X}_b = -H_{bm} J_e^+ (\dot{\mathcal{V}}_e^r - \dot{J}_e \dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_b) - \mathcal{F}_{bm}^r \quad (22)$$

として書き直せ, \mathcal{F}_{bm}^r は前述の振動抑制制御 (式 (12)) や運動量保存制御 (式 (13)) を実現する. 振動抑制制御および運動量保存制御を用いた場合の閉ループシステムは, それぞれ以下の式として示すことができる⁽¹⁸⁾.

$$H_b \ddot{\mathcal{V}}_b + (D_b + K_{vs}) \dot{\mathcal{V}}_b + K_b \Delta \mathcal{X}_b = -H_{bm} J_e^+ (\dot{\mathcal{V}}_e^r - \dot{J}_e \dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_b) \quad (23)$$

$$H_b \ddot{\mathcal{V}}_b + D_b \dot{\mathcal{V}}_b + K_b \Delta \mathcal{X}_b = -H_{bm} J_e^+ (\dot{\mathcal{V}}_e^r - \dot{J}_e \dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_b) - K_{mc} (\tilde{\mathcal{L}}_{bm}^d - \mathcal{L}_{bm}) \quad (24)$$

タ冗長 1 自由度によるセルフモーションを示す零空間ベクトルであり，負荷力の指令値 $f_{bm}^r = k_{vs}v_{bx}$ に従い振動抑制制御を行う．ただし， k_{vs} は振動抑制ゲイン， v_{bx} は歪みゲージなどのセンサから得られるベース部速度である． β は任意のスカラーであり， $\beta = 1/\det A$ （ただし， $A = [J_e^T \ h_{bm}^T]^T$ ）を満たすとき，振動抑制制御の性能が最大となる．ただし，ダイナミック特異点近傍へ進入した場合， $\det A$ が零に限りなく近づき β が過大となる問題が存在するため， $\beta = 0$ ⁷⁾とし振動抑制制御を停止する．

マニピュレータ先端の指令値は，式 (15) より以下となる．

$$\dot{v}_e^r = \dot{v}_e^d + K_d(v_e^d - v_e) + K_p(x_e^d - x_e) \quad (27)$$

式中， $K_d = \text{diag}[k_d, k_d]$ および $K_p = \text{diag}[k_p, k_p]$ は，正定値対角フィードバックゲイン行列であり， $x_e^d = x_e^d(s)$ は，軌道パラメータ $s = s(t)$ により適切に決定されるマニピュレータ先端の関数である． $x_e = [x_{ex} \ x_{ey}]^T$ は，関節角度と順運動学の関係から得られるマニピュレータ先端の位置である．

4.2 ダイナミック特異点近傍領域内における制御

本モデルにおいて，ダイナミック特異点問題を通過する場合に A の階数が落ちるため，先端 2 自由度とマニピュレータ運動量を同時に制御することはできない．そこで，マニピュレータ先端 y 軸方向のみ軌道追従制御し， x 軸方向はマニピュレータ運動量を制御する．式 (16) および式 (6) を参考に以下の式を導出する．

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{ey} \\ f_{bm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{ey} \\ h_{bm} \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} J_{ey} \\ h_{bm} \end{bmatrix} \dot{q} \quad (28)$$

ここで，負荷力 f_{bm} と J_{cx} との関係 $f_{bm}/m_t = \dot{v}_{cx} = J_{cx}\ddot{q} + J_{cx}\dot{q}$ より

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{ey} \\ \dot{v}_{cx} \end{bmatrix} = J\ddot{q} + J\dot{q}, \quad J = \begin{bmatrix} J_{ey} \\ J_{cx} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 3} \quad (29)$$

と書き直すことができる．式中， J_{ey} は y 軸方向に関する先端ヤコビ行列， J_{cx} は x 軸方向に関するマニピュレータ重心ヤコビ行列である．また，マニピュレータ運動量と重心速度の関係は $l_{bm} = m_tv_{cx}$ である．次に，求める指令関節角加速度は，式 (29) より以下となる．

$$\ddot{q} = J^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{v}_{ey} \\ \dot{v}_{cx} \end{bmatrix} - J\dot{q} \right) + \ddot{q}_J \quad (30)$$

$\ddot{q}_J \in \mathcal{N}_J$ は，零空間 \mathcal{N}_J を張る J の零空間ベクトルであるが，ダイナミック特異点通過のため利用しない．式 (30) では， y 軸方向に関する先端制御と x 軸方向に関する重心制御を行い，この結果， x 軸方向に関する先端位置は重心制御に従い決定される．ここで，先端の線形フィードバック制御式を以下に示す．

$$\dot{v}_{ey}^r(s) = \dot{v}_{ey}^d(s) + k_d(v_{ey}^d(s) - v_{ey}) + k_p(x_{ey}^d(s) - x_{ey}) \quad (31)$$

$s = s(x_{ex}(t))$ は軌道パラメータであり， t が進入時刻 t_{in} から通過時刻 t_{out} までの間は， $s = s(x_{ex}(t))$ の関係により定義される再軌道パラメータを用いる．一方，指令重心加速度 \dot{v}_{cx}^r は式 (13) を参考に以下となる．

$$\dot{v}_{cx}^r = k_m(\bar{v}_{cx}^d - v_{cx}) \quad (32)$$

ただし， $\bar{v}_{cx}^d = v_{cx}(t_{in})$ であり，重心速度の現在値は順運動学により得られる．

4.3 シミュレーション

モデルパラメータの詳細を図 2 に示す．初期姿勢は $q = [0 \ 20 \ 20]^T$ deg，目標軌道は x 方向と平行に初期姿勢の位置より負の方向とした．図 4 の原点から目標軌道上の点まで連なる 3 本の実線は 3 リンクマニピュレータを示し， $t = 0$ s（一番左）に初期姿勢を示す．また， $y = 0.1$ m にある横破線は目標軌道を示す．マニピュレータ先

⁷⁾ β の上限値を決める手法もあるが， $\det A$ の符号が切り替わることによるスイッチングの問題が現れる．そのため $\beta = 0$ としている．

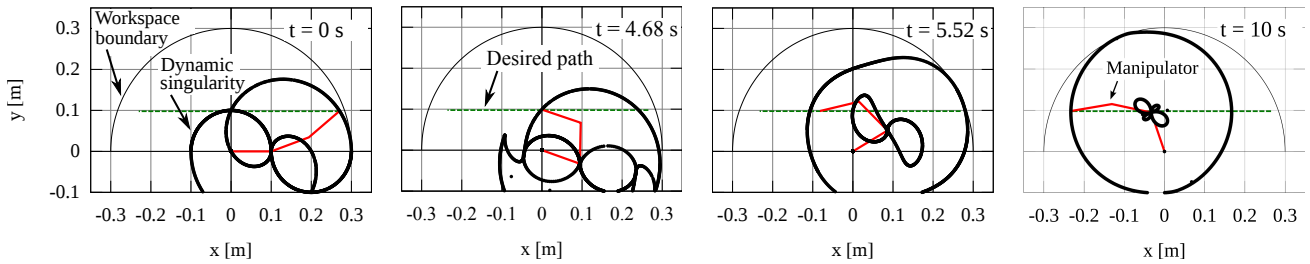


Fig. 4 Snapshots showing the variation of the dynamic singularities loci (bold solid curve) located within the manipulator workspace (outer solid semicircle) during desired path (broken line) tracking from right start position to left goal position with a relatively low speed. The three-link manipulator is described with the three solid lines from the origin point to the current point on the desired path. The curves are parameterized by the first joint angle and are centered, therefore, at the second joint.

端目標軌道 $(x_e^d, v_e^d, \dot{v}_e^d)$ は、五次補間法を用いたスプライン関数 $s(t)$ により定義した。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。フィードバックゲインは、それぞれ $K_d = \text{diag}[2.0, 2.0] \times 10^2 \text{ s}^{-1}$, $K_p = \text{diag}[2.0, 2.0] \times 10^4 \text{ s}^{-2}$, $k_m = 2.0 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$, 関節の粘性係数は $D_m = \text{diag}[0.05, 0.05, 0.05] \text{ Nms/rad}$, 振動抑制ゲインは $k_{vs} = 10 \text{ Ns/m}$ とした。ダイナミック特異点近傍の定義は, t_{in} についてはベース部の加速度が $|\dot{v}_b| \geq a_{max}$ となる場合, また t_{out} についてはダイナミック特異点が $|\det A| \geq d_{max}$ となる場合とした。それぞれの閾値は, $a_{max} = 0.2 \text{ m/s}^2$, $d_{max} = 1.5 \times 10^3 \text{ kgm}^3$ とした。ただし, ダイナミック特異点近傍への t_{in} から t_{out} の間は, 再定義された軌道パラメータ $s(x_{ex}(t))$ により生成され, また特異点近傍を通過した後も, t_{out} より滑らかな軌道を得るため, 再度軌道パラメータ $s(t)$ の計算を行った。以下では, 比較的低速な動作でのシミュレーション二つと比較的高速な動作でのシミュレーション二つの計四つのシミュレーション結果を示す。

4.3.1 比較的低速な動作の場合

比較的低速な動作での二つのシミュレーション結果を図 5, 6 にそれぞれ示す。シミュレーションでは, マニピュレータ先端の軌道追従制御を 9 s 間で行い, 1 s 間静止状態とした。(a) の上段はマニピュレータ重心速度, 下段はベース部の変位, (b) の上段は $\det A$ を, 下段は $\det A$ の逆数 $\beta = 1/\det A$ を示す。図 4 は, 図 6 に示すシミュレーション結果のスナップショットであり, 直線の目標軌道 (破線: Desired path) を追従制御した際に作業空間 (外形の半円: Workspace boundary) 内に現れるダイナミック特異点の分布 (太い曲線: Dynamic singularity) を示している。この分布は, 評価関数 $\det A = 0$ の解の一部を作業座標にプロットしたものである。ただし, 第 1 関節により関数化した, 第 2, 3 関節に関する評価関数を用いているため, 第 2 関節を中心とした分布となり, また第 1 関節の角度によりその分布形状が変化する。マニピュレータ先端がダイナミック特異点の分布と重なった場合, ダイナミック特異点となる。例えば, $t = 5.52 \text{ s}$ (左から 3 番目) 以外の図において, マニピュレータ先端位置がダイナミック特異点の分布に接近している。つまり, ダイナミック特異点近傍である。これは, 図 6 の (b) 上部と比較することで $\det A$ との関係が明確になる。

図 5 より, (a) 上段において, 振動抑制制御によりベース部変位が抑えられているが, 5 s 近傍では (a) 下段の重心速度が大きく変化し, ベース部が振動している。(b) 上段より, ダイナミック特異点近傍であることが分かる。つまり, ダイナミック特異点により (b) 下段の β が過大な値となり振動抑制制御によりベース部が振動している。ただし, ダイナミック特異点近傍を通過直後から, 振動は抑制されている。

図 6 の結果では, ダイナミック特異点近傍で $\beta = 0$ とし振動抑制制御を行っていない。これは, (b) 下段で確認できる。これにより, (a) 下段でベース部の振動が発生せず, (b) 上段においてダイナミック特異点を通過している。

4.3.2 比較的高速な動作の場合

次に, 比較的高速な動作でのシミュレーション結果を図 7, 8 に示す。ここでは, 目標軌道の終了時間を 3.5 s と設定した。ただし, 前シミュレーション結果より定義したダイナミック特異点近傍では $\beta = 0$ とした。(c) の上段はマニピュレータ先端の y 方向位置誤差を, 下段はマニピュレータ先端の x 方向における速度を示す。(d) は各関

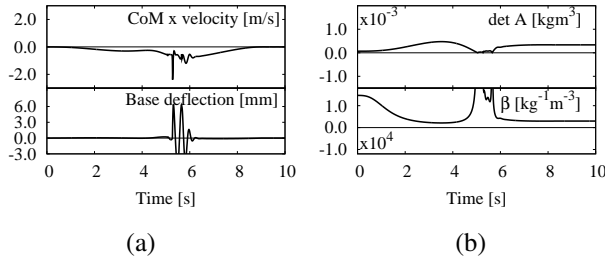


Fig. 5 Low-speed path tracking with vibration suppression around the singularity. Significant base vibrations are induced. The singularity could not be crossed.

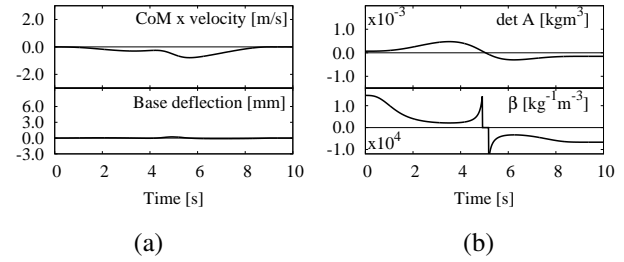


Fig. 6 Low-speed path tracking without vibration suppression around the singularity. The base deflects insignificantly. The singularity could be crossed.

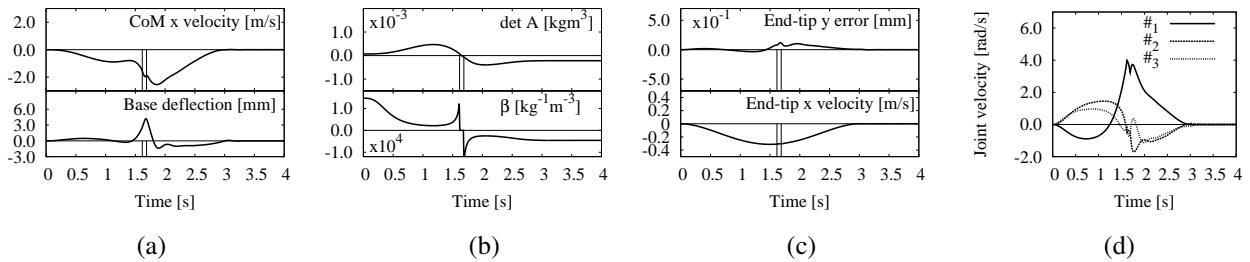


Fig. 7 High-speed path tracking without momentum conservation around the singularity. The base deflects significantly due to the large acceleration of the CoM.

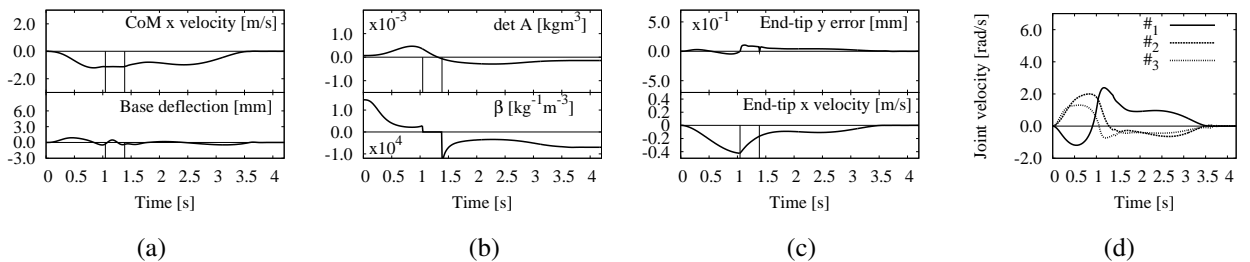


Fig. 8 High-speed path tracking with momentum conservation around the singularity. Trajectory reparameterization helped to ensure insignificant base deflection.

節の角速度を示す。

図7では、(b)上段より1.6s近傍の縦線がダイナミック特異点近傍領域を示す。この範囲では、(b)下段において $\beta = 0$ としダイナミック特異点を通過しているが、(c)下段のマニピュレータ先端速度が速い状態であり、(a)上段の重心速度が大きく変化し(a)下段にてベース部が振動している。振動抑制制御を行っていないために発生するこの振動は想定範囲内の問題であり、式(23)および式(24)の右辺第1項に示すマニピュレータ先端制御による影響である。また、(d)に示す関節の速度やトルクは、ダイナミック特異点近傍での制御切り替え時に、離散的挙動を示している。

上記の結果に対し、図8ではダイナミック特異点近傍で運動量保存制御を用いた。(a)上段の重心速度を一定にすることで、(a)下段のベース部変位が抑えられ、また(b)上段においてダイナミック特異点を通過している。(c)下段では、マニピュレータ先端軌道が運動量保存制御時に再軌道パラメータが与えられている。図7および8の(c)上段を比較すると、先端の位置誤差が同程度であることが分かる。(d)の比較からはより滑らかに動作していることがわかる。

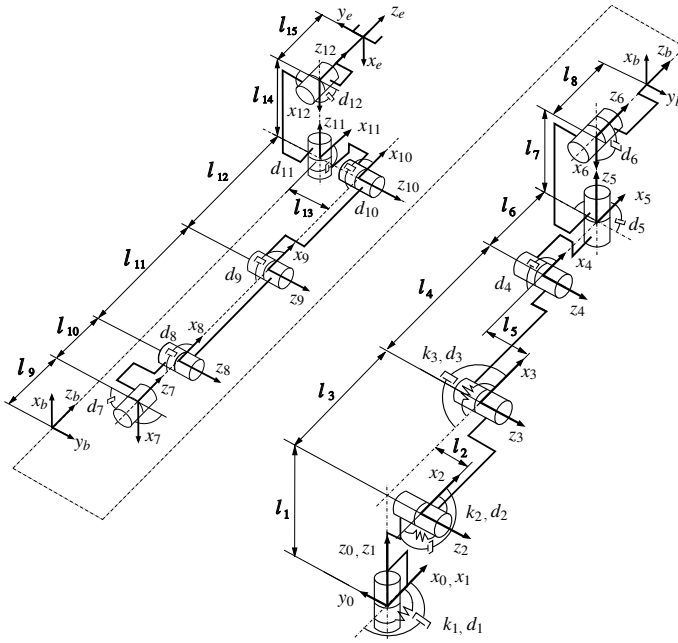


Fig. 9 Kinematic structure of JEMRMS (right figure) and SFA (left figure).

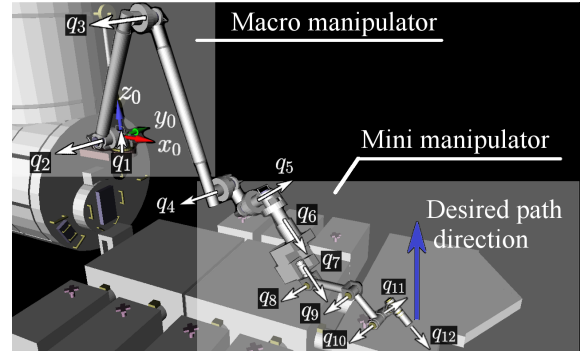


Fig. 10 Macro manipulator (q_1-q_3) and mini manipulator (q_4-q_{12}). This initial configuration and the desired path direction are used in the simulations.

5. 三次元 JEMRMS/SFA モデルへの適用

本節では、三次元モデル JEMRMS/SFA を対象とした動力学シミュレーションを通して、運動量保存制御への切り替え制御の有効性を議論する。以下に、モデリングとシミュレーション結果について述べる。

5.1 モデリング

図 9 に JEMRMS/SFA の幾何学モデルを示す。JEMRMS/SFA モデルは、6 自由度を有する JEMRMS の先端に 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。今回用いた各パラメータ（リンク長さ、質量、慣性パラメータ、重心位置）は、文献 (15) を参照されたい。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指摘されている⁽²⁸⁾。図 10 に示すように、JEMRMS の第 4, 5, 6 関節と 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。以下では、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 自由度ベース部として扱っている⁽⁵⁾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⁽²⁸⁾、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。

次に、JEMRMS/SFA の運動方程式を以下に示す⁽⁸⁾。

$$\begin{bmatrix} H_M & H_{Mm} \\ H_{Mm}^T & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_M \\ \ddot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_M & 0 \\ 0 & D_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_M \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_M \\ q_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_M \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (33)$$

式中、 $q_M \in \mathbb{R}^3$ と $q_m \in \mathbb{R}^9$ はそれぞれマクロ部とミニ部の一般化座標、 $\Delta q_M \in \mathbb{R}^3$ は平衡点からの関節変位を示す。 $H_M(\Delta q_M) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ および $H_m(q_m) \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ はマクロ部およびミニ部の慣性行列を、 $H_{Mm}(\Delta q_M, q_m) \in \mathbb{R}^{3 \times 9}$ はマクロ部とミニ部間の干渉慣性行列を示す。 $D_M, K_M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はマクロ部のダンパおよび剛性を示す正定値対角行列、 $D_m \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ はミニ部のダンパを示す正定値対角行列である。 $c_M(\Delta q_M, q_m, \dot{q}_M, \dot{q}_m) \in \mathbb{R}^3$ および $c_m(\Delta q_M, q_m, \dot{q}_M, \dot{q}_m) \in \mathbb{R}^9$ は、それぞれマクロ部とミニ部の速度依存項を示し、 $\tau \in \mathbb{R}^9$ は関節トルクを示す。

⁸⁾ $(\circ)_M$, $(\circ)_m$, $(\circ)_{Mm}$ 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。

5.2 計算トルクコントローラを用いたミニマニピュレータの制御

JEMRMS/SFA の振動抑制制御について述べる．式 (33) よりベース部の運動方程式は以下となる．

$$H_M \ddot{q}_M + D_M \dot{q}_M + K_M \Delta q_M = -H_{Mm} \ddot{q}_m - \dot{H}_{Mm} \dot{q}_m = \mathcal{F}_M \quad (34)$$

\mathcal{F}_M はマクロ部反力であり，ミニ部がマクロ部に与える負荷力 \mathcal{F}_{Mm} （以降マクロ部負荷力）と，作用・反作用（ $\mathcal{F}_M = -\mathcal{F}_{Mm}$ ）の関係にある．ただし，マクロ部の変位が小さいと仮定し $c_M \approx \dot{H}_{Mm} \dot{q}_m$ と近似する．振動抑制制御は，式 (3) を参考に \mathcal{F}_{Mm} を用いて以下の式で示す．

$$\mathcal{F}_{Mm}^r = H_{Mm} \ddot{q}_m + \dot{H}_{Mm} \dot{q}_m = K_{vs} \dot{q}_M \quad (35)$$

式中， $K_{vs} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は正定値対角フィードバックゲイン行列である． \mathcal{F}_{Mm} を通してマクロ部関節の振動抑制制御を実現する．ミニ部先端位置制御とセルフモーションを利用した振動抑制制御の式は式 (14) より以下の式となる．

$$\ddot{q}_m^r = J_m^+ (\dot{\mathcal{V}}_e^r - \dot{J}_m \dot{q} - \dot{\mathcal{V}}_M) + \ddot{q}_{J_m}(\mathcal{F}_{Mm}^r) \quad (36)$$

$$\ddot{q}_{J_m} = P_{J_m} \zeta_m(\mathcal{F}_{Mm}^r), \quad P_{J_m} = U - J_m^+ J_m, \quad \zeta_m(\mathcal{F}_{Mm}^r) = (H_{Mm} P_{J_m})^+ (\mathcal{F}_{Mm}^r - \dot{H}_{Mm} \dot{q}_m + H_{Mm} J_m^+ \dot{J}_m \dot{q}_m) \quad (37)$$

ここで， $\dot{\mathcal{V}}_m$ と $\dot{\mathcal{V}}_M$ はそれぞれミニ部とマクロ部先端の空間加速度である．マクロ部先端の空間加速度は非常に小さいため無視する（ $\dot{\mathcal{V}}_M \approx 0$ ）． $J_m(q_m) \in \mathbb{R}^{6 \times 9}$ は，ミニ部とマクロ部の間にあるベース座標系（ z_4 ）に関するミニ部先端ヤコビ行列である． $\ddot{q}_{J_m}(\mathcal{F}_{Mm}^r)$ は，零空間ベクトルであり二つの制約を満たす．一つは先端加速度に対する制約 $J_m \ddot{q}_m + \dot{J}_m \dot{q}_m = 0$ ，もう一つは式 (35) に示す振動抑制である．よって，先端の動作に影響を与えずに振動抑制制御を行う．また，行列式 $\det A = 0$ （ $A = [J_m^T \ H_{Mm}^T]^T \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ ）の場合に，ダイナミック特異点となる．

ダイナミック特異点では，ミニ部の 1 自由度分が減り，残りの 8 自由度分のみ制御できる．本稿では，運動量保存制御において x 軸方向を無視し，先端制御に 6 自由度，運動量保存制御に 2 自由度用いる．求める指令値は以下として得られる．

$$\ddot{q}^r = A_{yz}^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_e^r \\ \mathcal{F}_m^r \end{bmatrix} - \dot{A}_{yz} \dot{q} \right) + \ddot{q}_{A_{yz}} \quad (38)$$

$$A_{yz} = \begin{bmatrix} J_m \\ H_{bmyz} \end{bmatrix}, \quad H_{bmyz} = \begin{bmatrix} h_{bmy} \\ h_{bmz} \end{bmatrix}, \quad \mathcal{F}_m^r = K_m (\bar{p}_{myz}^d - \bar{p}_{myz}), \quad \bar{p}_{myz}^d = \begin{bmatrix} \bar{p}_{my}^d \\ \bar{p}_{mz}^d \end{bmatrix}$$

ここで， $H_{bmyz}(q_m) \in \mathbb{R}^{2 \times 9}$ ， $p_{myz}(q_m) \in \mathbb{R}^2$ はそれぞれ，ベース座標系に関する干渉慣性行列，ミニ部運動量であり， $(\circ)_{yz}$ は x 軸方向成分を無視していることを意味する． K_m は正定値対角フィードバック行列， $\bar{p}_{my}^d(t_{in})$ および $\bar{p}_{mz}^d(t_{in})$ は，サンプルホールド制御により時刻 t_{in} での値を参照する．零空間ベクトル $\ddot{q}_{A_{yz}}$ はダイナミック特異点近傍のため使用しない．以下，JEMRMS/SFA モデルに対する振動抑制制御と運動量保存制御の有効性を，二つのシミュレーション結果を通して評価する．

5.3 シミュレーション

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．マニピュレータ先端は，初期姿勢の位置より z 軸方向（図 10 中の矢印，Desired path direction）へ 3.0 m 直線移動させる．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，ミニ部先端の姿勢は初期姿勢を維持する．ミニ部先端の目標軌道（位置・速度・加速度）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 20 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 40 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．以下に各ゲインの設定値を示す．

K_M	$= \text{diag}[8000, 8000, 8000] \text{ Nm}^{-1}$	K_d	$= \text{diag}[10, 10, 10, 20, 20, 20] \text{ s}^{-1}$
D_M	$= \text{diag}[10, 10, 10] \text{ Nsm}^{-1}$	K_p	$= \text{diag}[1000, 1000, 1000, 50, 50, 50] \text{ s}^{-2}$
D_m	$= \text{diag}[10, 10, 10, 8, 8, 8, 8, 8, 8] \text{ Nsm}^{-1}$	K_{vs}	$= \text{diag}[5000, 5000, 5000] \text{ s}^{-1}$
D_{mc}	$= \text{diag}[1, 1, 1000, 1, 1, 1, 1, 1, 1] \text{ Nsm}^{-1}$	K_m	$= \text{diag}[50, 50] \text{ s}^{-1}$

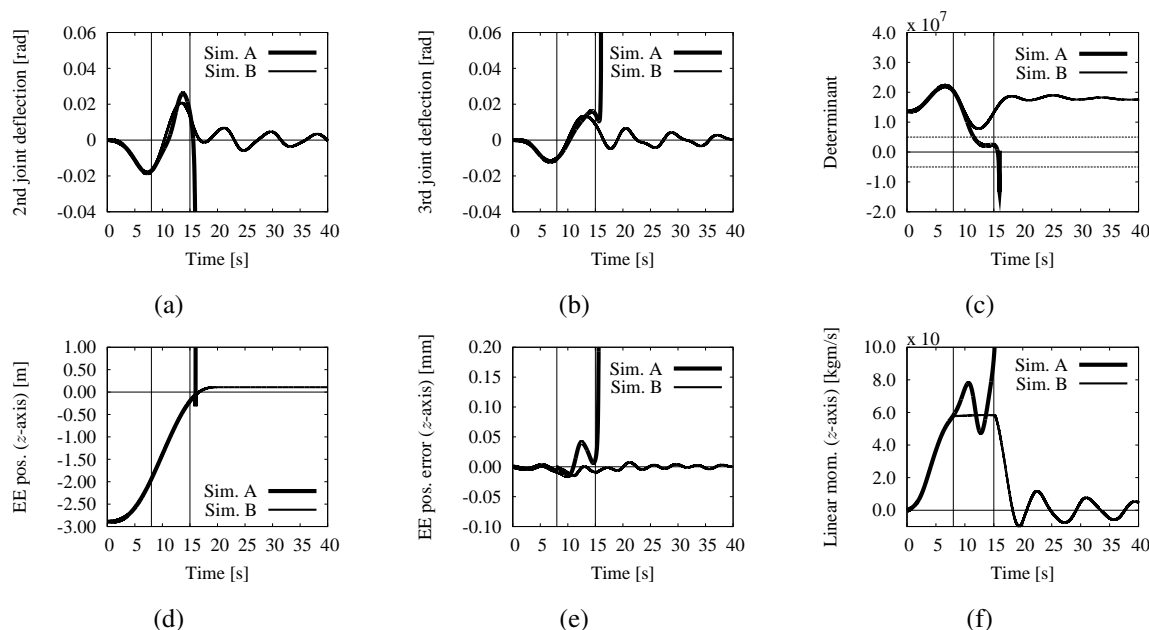


Fig. 11 Vibration suppression control of JEMRMS/SFA (Sim. A) vs momentum conservation control (Sim. B). With momentum conservation control it is possible to go through the dynamics singularity of vibration suppression control.

図 10 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。

一つ目のシミュレーション (Sim. A) では、振動抑制制御を用いた。ただし、ダイナミック特異点近傍 ($t_{in} < t < t_{out}$) では、振動抑制制御を停止させた ($K_{vs} = \text{diag}[0, 0, 0] \text{ s}^{-1}$)。ダイナミック特異点近傍の定義について、 t_{in} は $|\det A| \leq d_{max}$ 、 t_{out} は $|\det A| \geq d_{max}$ となる場合とし、 $d_{max} = 5.0 \times 10^6$ と定義した⁹⁾。

二つ目のシミュレーション (Sim. B) では、ダイナミック特異点近傍に入る前 ($t < t_{in}$) まで振動抑制制御を用い、ダイナミック特異点近傍へ入った後 ($t_{in} < t$)、運動量保存制御へ切り替えた。また、ダイナミック特異点近傍通過後 ($t_{out} < t$) は、振動抑制制御へ戻した。ただし、切り替え時刻 t_{in} および t_{out} は、それぞれ 8 s および 15 s と手動で設定した。JEMRMS/SFA の軌道計画は、主にオフライン生成で行っている。よって、事前にダイナミック特異点分布を確認可能であり、これを基に手動でのダイナミック特異点近傍を定義することは可能である。

Sim. A, B の結果を図 11 に示す。(a) および (b) は、マクロ部の第 2, 3 柔軟関節の角度変位を示している。(c) は $\det A$ の値を示している。 x 軸の上下にある 5.0×10^6 および -5.0×10^6 の横点線の間が、定義したダイナミック特異点近傍である。(d), (e) および (f) は、 z 軸方向に関するミニ部先端の位置、その位置誤差およびミニ部運動量を示す。 x および y 軸方向の誤差は、 z 軸と同様の大きさであったため図示しない。なお、図中“pos.”、“mom.”は、それぞれ“position”、“momentum”の略表記である。以下、時間ごとに 3 段階に分けて、図 11 の結果より考察する。

第 1 段階は、開始から 8 s である。Sim. A, B 共に振動抑制制御を行っており、(a) ~ (f) は同じ結果となった。(a) および (b) より、柔軟リンクである第 2, 3 柔軟関節の振動を確認した。ミニ部の全質量が 460 Kg と非常に大きく、先端制御のために重心を加速させる必要があるため、必然的な振動である。 K_{vs} をより大きくすることでこの振動を抑えることは可能であるが、それは同時に、重心の加速を制限することと同意であり、結果、無反動制御と等しくなる。つまり、先端の作業範囲を縮小する問題を引き起こす。

第 2 段階は、8 s から 15 s である。Sim. A は振動抑制制御を継続し、Sim. B は 8 s で運動量保存制御へ切り替えた。Sim. A は振動抑制制御により (f) のミニ部運動量の値が増加しつづける。一方で Sim. B は一定である。Sim. A

⁹⁾ダイナミック特異点に関する単位は、マニピュレータ自由度が増えるごとに複雑化し、解析が困難である。また、物理的意味を単位から類推することは大きな意味を持たないため、具体的な単位は記載していない。

は振動抑制制御のため、(a) および (b) で Sim. A のベース部変位が Sim. B より抑えられた．その後 Sim. A は、11 s 近傍で (c) に示す $\det A$ の値がダイナミック特異点近傍へ達した．この時点より、Sim. A は前述の二次元モデルと同様に、振動抑制制御を停止した．その結果、11 s から 15 s にかけて、先端フィードバック制御による動作がベース部へ反動を与え続け、最終的にシミュレーションが破綻した．一方で、Sim. B は安定した先端制御が実現できた．運動量保存制御は振動を抑制しないが、初期振動状態以上を発生させない．これは、式 (24) より確認できる．ミニ部先端フィードバック制御によるミニ部運動量の変化を運動量保存制御により抑え、ベース負荷力を抑制できる．結果、安定な先端制御を実現できた．15 s からは、再度振動抑制制御へ戻したことで (f) のミニ部運動量が減少した．

第 3 段階は、15 s から 40 s である．Sim. B では、振動抑制制御によりベース部の変位速度を抑えるため、(a) と (b) のベース部変位および (f) のミニ部運動量が零へ収束していく．しかし Sim. B の 20 s から 40 s において、(c) の $\det A$ の値が低くなく、ダイナミック特異点近傍でないにもかかわらず、(a) および (b) において、振動が抑制されているものの、顕著に抑制しているとは言えない．これは、9 自由度マニピュレータの制御に対する幾何学的な限界を、行列式 $\det A$ のみで評価しているため、振動抑制を行う方向に対する可操作度を正確に把握することができないためと考える．今後、JEMRMS/SFA などの自由度が比較的多いモデルに対して有効なダイナミック特異点の解析手法を検討する必要がある．

6. 結 言

本稿では、柔軟ベース上マニピュレータの先端および反力を同時に扱う制御手法について議論した．また、これにより現れるダイナミック特異点問題について述べた．そして、振動抑制制御および運動量保存制御を用いた切り替え制御を提案し、ダイナミック特異点近傍でのマニピュレータ運動量制御について、平面における柔軟ベース上冗長マニピュレータ（二次元モデル）、および JEMRMS/SFA（三次元モデル）を対象モデルとした動力学シミュレーションを行い、その有効性について議論した．二次元モデルにおいては、比較的遅い先端制御と比較的速い先端制御の場合に分け、振動抑制制御によるダイナミック特異点近傍での新たな振動問題について示し、この問題が運動量保存制御により解決可能であることを示した．三次元モデルにおいては、ダイナミック特異点近傍で振動抑制制御を停止する手法はシステムを不安にしたが、運動量保存制御はダイナミック特異点を通過し、振動を増加させず目標位置まで先端制御を達成した．

運動量保存制御が、ダイナミック特異点に対し有効であることを示したが、対象モデル別にベース部の状態を考慮した経験的手法による切り替え制御が必要であった．軌道追従・反動制御では、先端位置とマニピュレータ運動量が一般化座標に依存するため、幾何学的に両立可能なマニピュレータ運動量を与える必要がある．またシミュレーション結果から、この適切なマニピュレータ運動量がダイナミック特異点の単純な定義のみでは与えられないことがわかった．以上より、切り替えを必要としないマニピュレータ運動量制御について、より一層の検討が必要である．今後は、三次元モデルを対象として、経験的手法によらない制御手法の検討や、新たなダイナミック特異点解析手法の提案、本稿で扱っていない外乱やモデル誤差、マニピュレータ先端の姿勢制御を考慮した制御について研究を進める．

文 献

- (1) 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.
- (2) Torres, M. A., Dubowsky, S., and Pisoni, A. C., "Vibration control of deployment structures' long-reach manipulators: The P-PED method," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1996), pp. 2498–2504.
- (3) Lew, J. Y., and Trudnowski, D. J., "Vibration control of a micro/macro manipulator system," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 16, No. 1 (1996), pp. 26–31.
- (4) 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.

- (5) 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.
- (6) Yoshikawa, T., "Analysis and control of robot maipulators with redundancy," *Robotics Research: The First International Symposium*, Brady, M., and Paul, R., Eds., Cambridge, MA,: The MIT Press, (1984), pp. 735–757.
- (7) Nakamura, Y., and Hanafusa, H., "Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control," *Transactions of the ASME, Journal on Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 108, (1986), pp. 163–171.
- (8) Sugihara, T., "Solvability-unconcerned inverse kinematics based on Levenberg-Marquardt method with robust damping," in *Proceedings of 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, (2009), pp. 555–560.
- (9) 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.
- (10) Hishinuma, T., and Nenchev, D. N., "Singularity-consistent vibration suppression control with a redundant manipulator mounted on a flexible base," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2006), pp. 3237–3242.
- (11) Nakamura, Y., Hanafusa, H., and Yoshikawa, T., "Task priority based redundancy control of robot manipulators," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 2 (1987), pp. 3–15.
- (12) Konstantinov, M. S., Markov, M. D., and Nenchev, D. N., "Kinematic control of redundant manipulators," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Industrial Robots*, (1981), pp. 561–568.
- (13) Hanafusa, H., Yoshikawa, T., and Nakamura, Y., "Analysis and control of articulated robot arms with redundancy," in *Control Science and Technology for the Progress of Society (Proceedings of the 8th Triennial World Congress of IFAC, Kyoto, Japan, 1981)*, Akashi, H., Eds, Pargamon Press, Vol. 4, (1981), pp. 1927–1932.
- (14) Fukazu, Y., Hara, N., Hishinuma, T., Sato, D., and Kanamiya, Y., "Pseudoinverse-based motion control of a redundant manipulator on a flexible base with vibration suppression," *Journal on Robotics and Mechatronics*, Vol. 20, No. 4 (2008), pp. 621–627.
- (15) Kim, S. J., and Park, Y. S., "Self-motion utilization for reducing vibration of a structurally flexible redundant robot manipulator system," *Robotica*, Cambridge University Press, Vol. 16, (1998), pp. 669–677.
- (16) 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.
- (17) Nenchev, D. N., "Reaction null-space based control of flexible structure mounted manipulator systems," in *Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control*, Vol. 4, (1996), pp. 4118–4123.
- (18) Nenchev, D. N., Yoshida, K., Vichitkulsawat, P., and Uchiyama, M., "Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 6 (1999), pp. 1011–1023.
- (19) Hara, N., Nenchev, D., Sun, Q., and Sato, D., "Momentum conserving path tracking through dynamic singularities," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2010), pp. 5392–5397.
- (20) 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.
- (21) 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.
- (22) Koga, M., and Furuta, K., "MaTX: a high-performance programming language (interpreter and compiler) for scientific and engineering computation," *IEEE Symposium on Computer-Aided Control System Design*, (1992), pp. 15–22.
- (23) 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, (1999), pp. 23–24.

- (24) 上野浩史, “国際宇宙ステーションにおけるロボット技術”, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 5 (2009), pp. 498–501.
 - (25) Sharon, A., and Hardt, D., “Enhancement of robot accuracy using endpoint feedback and a macro-micro manipulator system,” in *Proceedings of the American Control Conference*, (1984), pp. 1836–1842.
 - (26) Jansen, J. F., Babcock, S. M., Kress, R. L., Burks, B. L., and Hamel, W., “Long-reach manipulation for waste storage tank remediation,” in *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting*, Vol. 31, (1991), pp. 67–73.
 - (27) Torres, M. A., and Dubowsky, S., “Path-planning in elastically constrained space manipulator systems,” in *Proceedings of the IEEE International Conference Robotics and Automation*, (1993), pp. 812–817.
 - (28) Wakabayashi, Y., Morimoto, H., Satoh, N., Hayashi, M., Aiko Y., and Suzuki, M., “Performance of Japanese robotic arms of the international space station,” in *Proceedings of the 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control*, (2002), pp. 21–26.
 - (29) Yamada, K., and Tsuchiya, K., “Force control of a space manipulator,” in *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, C21-2 (1990), pp. 255–258.
 - (30) Luh, J. Y. S., Walker, M. W., and Paul, R. P. C., “Resolved-acceleration control of mechanical manipulators,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-25, No. 3 (1980), pp. 468–474.
 - (31) Nenchev, D. N., “Restricted Jacobian matrices of redundant manipulators in constrained motion tasks,” *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 6 (1992), pp. 584–597.
-