

# 特異点適合法に基づいた 柔軟ベース上冗長マニピュレータの振動抑制制御

## Singularity-Consistent Vibration Suppression Control of a Redundant Manipulator Mounted on a Flexible Base

学 菱沼 利光 (武蔵工大) 正 Dragomir N. Nenchev (武蔵工大)

Toshimitsu HISHINUMA, Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo  
Dragomir N. NENCHEV, Musashi Institute of Technology

**Abstract:** This paper describes an experimental system for teleoperation of a redundant manipulator mounted on a flexible base. Kinematic redundancy is resolved with the help of an additional constraint, obtained from vibrational dynamics. The problem of kinematic and algorithmic singularities is addressed via the Singularity-Consistent method developed in our previous research. Experimental data show vibration suppression with high efficiency. When no vibrations are present, our approach ensures effectively reactionless motion within a relatively large workspace. The efficiency while moving through an algorithmic singularity is also demonstrated.

**Key Words:** Flexible Structure Mounted Manipulator System, Redundant Manipulator, Vibration Suppression, Teleoperation, Singularity-Consistent Method

### 1 緒言

マクロマイクロマニピュレータシステムという概念が Sharon と Hardt[1] によって持ち出されました。マイクロマニピュレータはマクロマニピュレータの先端に取り付けられ作業空間を移動する。このシステムにはマクロ部分の構造のゆがみと既存の動力学の間に継ぎ手となる運動に影響を与える部分が存在する。例として、long-reach manipulators(LRM's) と呼ばれる長大な支持部 (Flexible base) の先端に剛体アームを取り付けたもので先端のアームの動作反力が支持部に影響を与える。マクロマイクロマニピュレータシステムまたは LRM 概念は、核廃棄物処理 [2] と宇宙ロボティクス [3] の主に 2 つのアプリケーション要求に応じるために年々進化している。

過去の我々の研究において、宇宙ロボットとして使われるために反動零空間 (Reactionless Null Space) と呼ばれる概念を、柔軟ベース上単腕マニピュレータ [4] と柔軟ベース上双腕マニピュレータ [5] の運動生成の制御に適用した。我々は反動零空間を通して、関節スペースを分解しマクロ部とマイクロ部の間の動力学を分離しました。このように、マクロ部に対して効率的な方法を適用することにより、振動を抑制することが可能であり、無反動な動作を実現している。

柔軟ベース上単腕マニピュレータの無反動な運動生成の研究において、我々は初期姿勢により先端の動作が特定の軌道を動作する限定された問題に直面した。この問題は動力学的な冗長性 [6] を用いることで、1 つのマニピュレータの動作反応をもう 1 つのマニピュレータで補償する、柔軟ベース上双腕マニピュレータによって解決できる。しかし、この場合でも補償するマニピュレータが作業をおこな

うマニピュレータの作業空間に影響を与えることで作業が制限される可能性があるという問題点がある。

本論文では運動学的な冗長性を用いて柔軟ベース上単腕マニピュレータの制御を紹介する。冗長性を用いた研究として、吉田ら [7][8] は反動零空間の概念をもとに無反動な動作と振動抑制を組み合わせた制御を柔軟ベースに適用している。我々は、すべての動作に対して制約を課すことで冗長性を解決している。過去に制約として無反動な動作を適用 [9] したが、振動抑制のための制約を用いることで効率的に無反動な動作を可能となることが確認できた。またこの場合、制約を課すことでアルゴリズム的特異点が存在する。アルゴリズム的特異点を含む特異点問題に対して、我々は過去の研究 [10] で開発した特異点適合法 (SC 法: Singularity-Consistent method) に基づく統合された制御法を適用する。

### 2 研究背景

#### 2.1 運動方程式 [4]

柔軟ベース上のマニピュレータの運動方程式は、以下のよう表すことができる。

$$\begin{bmatrix} H_b & H_{bm} \\ H_{bm}^T & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_b \dot{x}_b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b x_b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、ベース部先端の並進速度を  $v_b$ 、姿勢角速度を  $\omega_b$  とし、 $\dot{x}_b = (v_b^T, \omega_b^T)^T$  とする。式中で使用した記号の意味は以下のとおりである。

$\theta \in R^n$  : 関節角ベクトル

$H_m \in R^{n \times m}$  : マニピュレータ慣性行列

$H_b \in \mathbf{R}^{m \times m}$  : ベース部慣性行列  
 $H_{bm} \in \mathbf{R}^{m \times n}$  : ベース部とマニピュレータ慣性行列  
 $c_m \in \mathbf{R}^n$  : マニピュレータ遠心力・コリオリ力項  
 $c_b \in \mathbf{R}^m$  : ベース部遠心力・コリオリ力項  
 $K_b \in \mathbf{R}^{m \times m}$  : ベース部剛性行列  
 $D_b \in \mathbf{R}^{m \times m}$  : ベース部粘性行列  
 $\tau \in \mathbf{R}^n$  : マニピュレータの関節トルク  
 $x_b \in \mathbf{R}^m$  : ベース部変位

## 2.2 振動抑制制御 [4]

振動抑制制御を適用する上で、以下のような二つの仮定をする。

1. 初期状態を静止しているとするため、非線形速度依存項である  $c_m$  と  $c_b$  を 0 に近似する。
2. ベース部変位を十分小さいと仮定し、慣性行列は変位のみの関数として近似する。

FSMS の場合、この二つの仮定より速度依存項は無視することができる。その結果、以下のように運動方程式を線形化することができる。

$$H_b \ddot{x}_b + D_b \dot{x}_b + K_b x_b = -H_{bm} \ddot{q}. \quad (2)$$

振動を抑制するため、速度依存の制御をする  $\ddot{\theta}$  項を以下のように置く。

$$\ddot{q} = H_{bm}^+ G_b \dot{x}_b \quad (3)$$

式中の  $G_b$  は位置フィードバックゲインを意味する。 $H_{bm}^+ \in \mathbf{R}^{n \times m}$  は慣性干渉行列の右擬似逆行列を意味し、 $H_{bm} H_{bm}^+ = I$  となる。ここで  $I$  は単位行列である。

## 2.3 特異点適合法

特異点適合法を簡潔に示す [10]。マニピュレータ先端の並進回転の合力を  $\dot{x} \in \mathbb{R}^m$  とする。

$$\dot{x} = J \dot{q}, \quad (4)$$

ここで、 $J(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$  はマニピュレータのヤコビ行列である。式 (4) を以下のように書き換える。

$$J \dot{q} - \alpha t = 0, \quad (5)$$

ここで、 $t$  は normalized end-effector twist、 $\alpha$  は大きさである。列拡張ヤコビ行列を用いて、 $\tilde{J} = \begin{bmatrix} J & -t \end{bmatrix}$  とし、式 (5) を書き換える。

$$\tilde{J} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \alpha \end{bmatrix} = 0. \quad (6)$$

式 (6) の  $\tilde{J}$  は零空間より無限の解が得られる。非冗長マニピュレータ ( $n = m$ ) のヤコビ行列  $J$  は正方行列となる。その場合、零空間  $\mathcal{N}(\tilde{J})$  の零空間ベクトルは以下のように 1 つだけ求めることができる。

$$\tilde{n} = \begin{bmatrix} n^T & \det J \end{bmatrix}^T, \quad (7)$$

$$n = (\text{adj} J) t, \quad (8)$$

$\text{adj} J$  はヤコビ行列  $J$  の余因子行列を表す [11]。特異点適合法を適用させた関節角速度は以下ようになる。

$$\dot{q} = b n \quad (9)$$

ここで、 $b$  は制御入力とし任意のスカラー量とする。 $b = \alpha / \det J$  とすることにより、マニピュレータ先端の目標速度を満たすことができる。また、 $\alpha = \bar{b} \det J$  とし、 $\bar{b}$  を適当な一定値とすることで、特異点 ( $\det J = 0$ ) においても安定した動作が可能となる。

## 3 冗長自由度を用いた振動抑制制御

### 3.1 振動抑制制約に関する冗長性の解決策

運動学的な冗長性を解決する有名な方法は、新たに制約を加えることである [12]。我々は関節角速度に対して振動抑制に関する新たな制約を加えた。振動抑制制御の加速度に関する式 (3) を時間積分する。

$$\dot{q} \approx -\bar{H}_{bm}^+ G_b x_b. \quad (10)$$

ただし、 $\bar{H}_{bm}^+$  は関節角度に依存する  $H_{bm}^+$  を一定であると仮定したものである。これは、ベース部変位  $x_b$  の変動が関節角度より非常に速いためである。

また、式 (10) は次のようになる。

$$H_{bm} \dot{q} = -G_b x_b. \quad (11)$$

ベース部の変位空間の次元  $k$  は、マニピュレータの冗長自由度と同等 ( $k = n - m$ ) であると仮定する。先端を速度制御する式 (4) と式 (11) を結合すると以下の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ -G_b x_b \end{bmatrix} = J_{vs} \dot{q} \quad (12)$$

ここで、 $J_{vs} = \begin{bmatrix} J^T & H_{bm}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$  であり、関節角速度は以下ようになる。

$$\dot{q} = J_{vs}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ -G_b x_b \end{bmatrix}. \quad (13)$$

### 3.2 特異点適合法に基づいた振動抑制制御

上記の方法で関節角速度ベクトルを得ることができるが、我々は行列  $J_{vs}$  が特異点となるときにパフォーマンスが低下することに注意しなければならない。 $\det J = 0$  となる場合にキネマティック特異点となることが知られているが、新たな制約を加えた場合にはキネマティック特異点を含むアルゴリズムック特異点と言われる特異点が現れる。

この特異点問題に対して、我々は上記の関節角速度に特異点適合法を適用する。第 2 章の手順に従い、以下のように列拡張ヤコビ行列を構成する。

$$\tilde{J}_{vs} = \begin{bmatrix} J & -t \\ H_{bm} & G_b x_b \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times (n+1)} \quad (14)$$

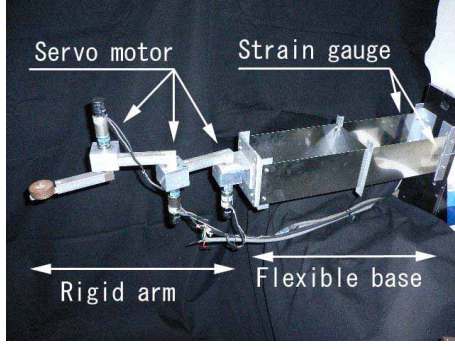


Fig.1: TREP-R experimental setup.

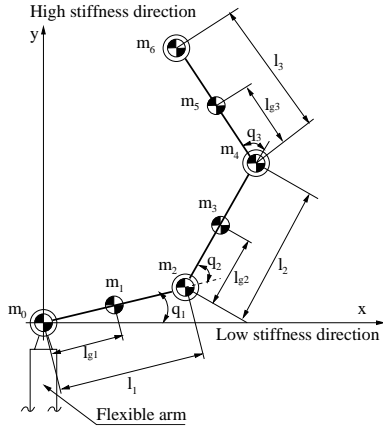


Fig.2: Model of TREP-R.

また、同次方程式は以下になる。

$$\tilde{J}_{vs} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \alpha \end{bmatrix} = 0. \quad (15)$$

零空間の零空間ベクトル  $\mathcal{N}(\tilde{J}_{vs})$  は次のように 1 つだけ求めることができる。

$$\tilde{n}_{vs} = [n_{vs}^T \quad \det J_{vs}]^T \quad (16)$$

ここで、 $n_{vs} = \text{adj} J_{vs} \begin{bmatrix} -t^T & (G_b x_b)^T \end{bmatrix}^T$  となり、そのときの特異点適合法の解は次のようになる。

$$\dot{q} = b_{vs} n_{vs}, \quad (17)$$

ここで、 $b_{vs}$  は任意の変数である。また、 $n_{vs}$  は作業空間の動作方向の和である normalized end-effector twist  $t$  の項とベース部に対する項  $G_b x_b$  を含んだ方程式となっている。そこで、都合上以下のように書き直す。

$$\dot{q} = b_m n_m t + b_b n_b G_b x_b, \quad (18)$$

ここで、 $n_m \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 、 $n_b \in \mathbb{R}^{n \times k}$  であり、 $b_m$  と  $b_b$  は任意の定数である。 $b_m$  と  $b_b$  を決めることにより、先端の制御とベース部の制御を別々におこなうことができる。

#### 4 実験装置

##### 4.1 実験装置概要

実験装置 TREP-R (以下 TREP-R) (Fig. 1) はベース部分に相当するフレキシブルアームとその先端に取り付けられたマニピュレータ部分に相当する 3 リンク剛体マニピュレータによって構成されている。

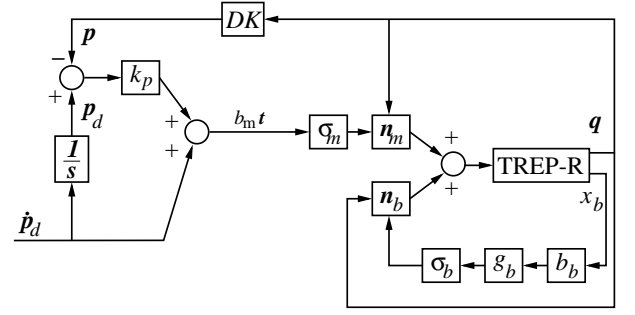


Fig.3: Vibration suppression control block diagram.

##### 4.2 TREP-R の動的モデル

Fig. 2 に TREP-R の動的モデルを示す。座標系は、低剛性方向を  $x$ 、高剛性方向を  $y$  とする。TREP-R は高剛性方向  $y$  に力が加わってもベース部は振動しない。そのため、ベース部は低剛性方向  $x$  についてのみ振動する。また、回転方向は反時計回りが正である。

##### 4.3 TREP-R へ適用

TREP-R は、3 自由度の 3 リンクマニピュレータを 2 自由度の平面上を動作させるため、マニピュレータは 1 つの冗長自由度を持つことになる。そのため、マニピュレータの手先速度  $\dot{x}$  は  $2 \times 1$  ベクトル、ヤコビ行列  $J$  は  $2 \times 3$  行列、関節角速度  $\dot{\theta}$  は  $3 \times 1$  ベクトルとなる。ここで、振動抑制制御を新たな制約として加えるため、式 (11) は次のようになる。

$$h_{bm} \dot{q} = -g_b x_b. \quad (19)$$

ただし、ベース部変位の 1 自由度を考えるためゲイン定数  $g_b$  とベース部変位  $x_b$  はスカラー量として表される。この干渉慣性行列  $h_{bm}$  は  $1 \times 3$  行列である。

以上より、式 (12) より列拡張ヤコビ行列は以下のように表される。

$$\tilde{J}_{vs} = \begin{bmatrix} J & -t \\ h_{bm} & g_b x_b \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 4}. \quad (20)$$

我々は数学演算ソフトウェアの Mathematica ® を用いて、上記の行列の零空間ベクトル  $\tilde{n}_{vs} \in \mathbb{R}^4$  を 1 つだけ求めた。そのときの特異点適合法の関節角速度は次のようになる。

$$\dot{q} = b_{vs} n_{vs} \quad (21)$$

この  $n_{vs} \in \mathbb{R}^3$  は 3 つの項  $\tilde{n}_{vs}$  と任意の変数  $b_{vs}$  により構成されている。次に式 (18) と同様に、先端の制御とベース部の制御の項に分ける。

$$\dot{q} = \sigma_m b_m n_m t + \sigma_b b_b n_b g_b x_b, \quad (22)$$

$n_m \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 、 $n_b \in \mathbb{R}^3$  となる。式中の  $b_m$  と  $b_b$  は適切な定数を代入する。 $\sigma$  は初期状態の正負の値として、 $\sigma_m = \sigma_b = \text{sgn}(\det J_{vs}(q_0))$  とし  $q_0$  は初期姿勢の位置とする。特異点を通過するため、これらの値は運動反射を避けるため調節しなければならない。

Fig. 3 に TREP-R の特異点適合法に基づいた振動抑制制御のブロック線図を示す。ジョイスティック制御信号

より、先端の目標速度  $\dot{p}_d$  が得られる．この速度を時間積分することで、先端の目標位置  $p_d$  が得られる．これらの値を算出し先端速度に対してフィードバック制御をおこなう．

$$b_m \dot{t} \equiv \dot{p}_{ref} = k_p(p_d - p) + \dot{p}_d \quad (23)$$

$k_p$  はフィードバックゲイン、 $p$  はセンサの値より順運動学を用いて算出した先端位置である．

## 5 実験結果

### 5.1 TREP-R の振動抑制制御

マニピュレータ先端の操作時にベース部に振動が生じた場合、冗長自由度を用いた振動抑制制御を適用することで先端位置に影響を与えずにベース部の振動を抑制可能なことを紹介する．また、特異点適合法を適用することでマニピュレータのアルゴリズム的特異点を通過可能なことを示す．ただし、初期姿勢： $q = [2.04, -1.01, 1.36]^T$ 、振動に対するゲイン定数  $g_b$  は  $10 \text{ 1/s}$ 、 $b_b$  は  $1$ 、マニピュレータ先端の位置フィードバックゲイン  $k_p$  は  $50 \text{ 1/s}$  とする．

Fig. 4(a) は、ジョイスティックにより遠隔操作の間の先端位置の座標を表している．Fig. 4(b) から、 $t = 3 \text{ s}$  頃に柔軟ベースが大きく変位していることがわかる．これは、そのときにベース部に対して力を加えているからである．Fig. 4(c) と Fig. 4(d) より、先端位置の補償と振動抑制をするためにマニピュレータのリンクが制御されていることがわかる．また、この実験ではアルゴリズム的特異点及び近傍でも安定した制御が可能であることを示している．Fig. 4(e) より、 $t = 6 \text{ s}$  頃にアルゴリズム的特異点を通過していることがわかる．その点付近においてもグラフはなめらかであり、行列式の正負が変化しているにもかかわらず特異点を不安定にならずに通過していることを示している．これは、特異点を通過後に  $\sigma_b$  を変えることで解決している．

## 6 結言

本論文では、振動問題の解決策として考えられている無反動制御と振動抑制制御の欠点を冗長自由度を用いることで解決する手法を提案した．本手法を用いることで、マニピュレータ先端の制御と重心の制御を同時におこなうことにより、ベース部の振動を関節の自発運動のみで抑制することが可能なことを示した．無反動制御の欠点である作業空間の縮小を冗長自由度を用いた振動抑制制御を用いることにより解決した．また、特異点適合法を適用しアルゴリズム的特異点及び近傍においても安定した動作が可能であることを示した．

## 文 献

- [1] A. Sharon and D. Hardt, "Enhancement of robot accuracy using end-point feedback and a macro-micro manipulator system," in Proc. ACC, San Diego, CA, 1984, pp. 1836–1842.
- [2] J. F. Jansen et al., "Long-reach manipulation for waste storage tank remediation," DSC-Vol. 31, ASME, pp. 67–73, 1991.
- [3] M. A. Torres and S. Dubowsky, "Path-planning in elastically constrained space manipulator systems," in Proc. IEEE Int.

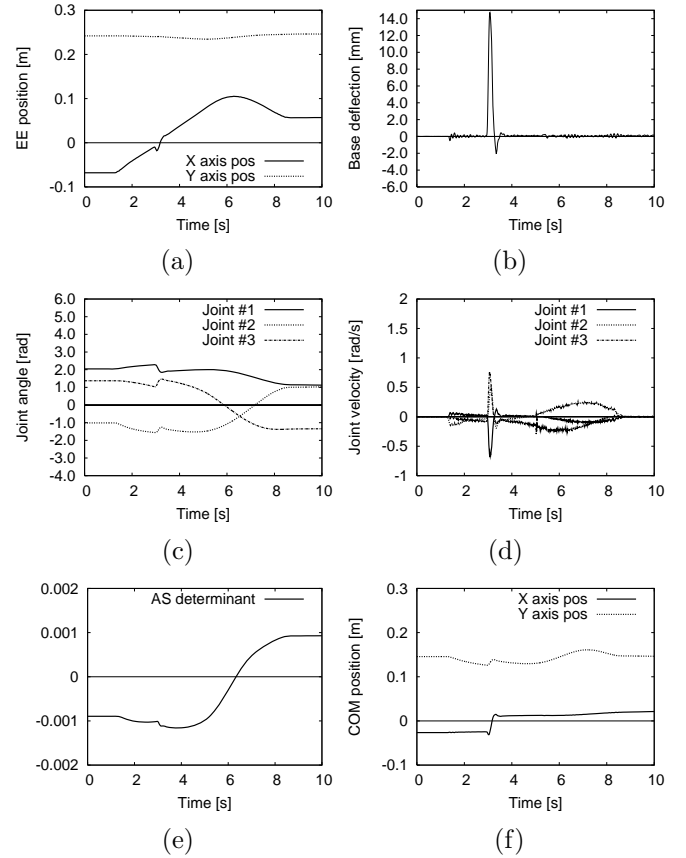


Fig.4: Data from the experiment.

- Conf. Robotics and Automation, Atlanta, Georgia, 1993, pp. 812–817.
- [4] D. N. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat and M. Uchiyama, "Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems," IEEE Tr. on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 6, pp. 1011–1023, December 1999.
- [5] A. Gouo, D. N. Nenchev, K. Yoshida, M. Uchiyama, "Motion Control of Dual-Arm Long-Reach Manipulators," Advanced Robotics, Vol. 13, No. 6, pp. 617–632, 2000.
- [6] 菱沼利光, 阿部崇志, D. N. Nenchev: "柔軟ベース上における特異点適合法に基づいたマニピュレータの遠隔操作," 第10回ロボティクスシンポジウム, 2005.
- [7] Satoko Abiko and Kazuya Yoshida: "An Effective Control Strategy of Japanese Experimental Module Remote Manipulator System (JEMRMS) Using Coupled and Un-Coupled Dynamics," Proc. of the 7th Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Nara, Japan, May 19–23, 2003.
- [8] 吉田和哉, 渡邊紘充: "宇宙用マクロ・マイクロマニピュレータ性御時の特異点問題に関する考察," 第48回自動制御連合講演会, G1-31, 2005.
- [9] 菱沼利光, 阿部崇志, D. N. Nenchev: "柔軟ベース上冗長マニピュレータの遠隔操作," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, 1A1-S-053, 2005.
- [10] D. N. Nenchev, Y. Tsumaki and M. Uchiyama, "Singularity-Consistent Parameterization of Robot Motion and Control," The International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 2, pp. 159–182, February, 2000.
- [11] Y. Tsumaki, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Jacobian Adjoint Matrix Based Approach to Teleoperation," Int. Symp. on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japan, pp. 532–535, 1995.
- [12] D. N. Nenchev, "Redundancy Resolution through Local Optimization: a Review," J. Rob. Syst., Vol. 6, No. 6, pp. 769–798, 1989.