

# 擬似逆行列を用いた 柔軟ベース上冗長マニピュレータの振動抑制制御

## Vibration Suppression Control of a Redundant Manipulator Mounted on a Flexible Base Using the Pseudoinverse Matrix

深津 祐介 (武蔵工大) 菱沼 利光 (武蔵工大)  
正 金宮 好和 (D. N. Nenchev) (武蔵工大)

Yusuke FUKAZU, Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo  
Toshimitsu HISHINUMA, Musashi Institute of Technology  
Yoshikazu KANAMIYA (D. N. Nenchev), Musashi Institute of Technology

**Abstract:** We applied the Singularity-Consistent control method to derive a null-space vector for suppressing vibrations by a kinematically redundant manipulator mounted on a flexible base. To avoid the problem of algorithmic singularities, we control the end-tip motion via the pseudoinverse of the manipulator Jacobian. Experimental results show that vibrations induced during the manipulator motion can be effectivity suppressed.

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

### 1 緒言

マクロミニ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。マクロマニピュレータを静止させた状態でミニマニピュレータによる精細な作業を行う際、マクロマニピュレータの剛性の低さにより振動が生じる。この問題は、柔軟ベース上マニピュレータ (Flexible base) の問題として考えられる。

我々は過去の研究において、運動学的な冗長性を持つ柔軟ベース上単腕マニピュレータを制御する場合、特異点適合法に基づいた振動抑制制御を適用することにより、振動問題、特異点問題を解決してきた [2]。特異点適合法に基づいた振動抑制制御法では、ベース部に対して無反動なマニピュレータ先端の制御と、セルフモーションによりベース部の振動を抑制する重心の制御を同時に行うことが可能となる。しかし、冗長性を解決する際にアルゴリズム的特異点と呼ばれる重心位置に関する姿勢が存在し、アルゴリズム的特異点通過後にマニピュレータ先端が逆方向に動作するため作業空間が縮小するという問題が確認された。

上記の問題に対して、我々は特異点適合法に基づいた振動抑制制御法を拡張し [3][4]、重心を任意に動作させることにより、アルゴリズム的特異点を回避させ、作業空間を拡大させることが可能なことを確認した。しかしながら、マニピュレータの先端速度に対して、重心の速度を正確に設定しなければアルゴリズム的特異姿勢を回避させることは困難であることが確認できた。

そこで本論文では、特異点適合法に基づいた振動抑制制御において、マニピュレータ先端の制御に関しては擬似逆

行列を用いることにより、アルゴリズム的特異姿勢の問題を解決する制御法を提案する。

### 2 研究背景

#### 2.1 特異点適合法に基づいた振動抑制制御

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 [5]。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。

ここで、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。ベース部の振動に対してマニピュレータの重心を制御する振動抑制制御の関節角速度に関する式は以下のように求めることができる [6]。

$$G_b x_b = H_{bm} \dot{q} \quad (1)$$

ただし、式中の  $G_b$  はアクティブダンパゲイン、 $H_{bm} \in \mathbb{R}^{k \times n}$  は慣性干渉行列、 $x_b$  はベース部変位である。ここで、マニピュレータ先端の並進速度を  $v$ 、姿勢角速度を  $\omega$  とし、エンドエフェクタツイストを  $\nu = [v^T \ \omega^T]^T \in \mathbb{R}^m$  としたときの関節角速度との関係は次のようになる。

$$\nu = J(q) \dot{q} \quad (2)$$

また、式 (1) と式 (2) を結合することにより次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \nu \\ G_b x_b \end{bmatrix} = J_{vs} \dot{q} \quad (3)$$

ここで、 $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 、 $J_{vs} = \begin{bmatrix} J^T & H_{bm}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$  であ

り,  $\det J_{vs} = 0$  となる場合, キネマティック特異点を含む新たな制約が影響を与えるアルゴリズム的特異点が存在する. この特異点問題に対して, 我々は式 (3) に特異点適合法を適用し, 以下のように列拡張ヤコビ行列を含めた同時方程式を求めた.

$$\bar{J}_{vs} \dot{q} = \begin{bmatrix} J & -\hat{v} & 0 \\ H_{bm} & 0 & -G_b x_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{q}_* \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

ただし,  $v = \dot{q}_* \hat{v}$  とし,  $\hat{v} = [\hat{v}_x \ \hat{v}_y]^T$  はマニピュレータ先端の並進速度の単位方向ベクトル,  $\dot{q}_* = \|\dot{v}\|$  を表すスカラー量である. また,  $\bar{J}_{vs}$  の零空間の射影行列は次のように求められる.

$$\bar{n}_{vs} = [\bar{n}_m \quad \bar{n}_b] \quad (5)$$

$$\bar{n}_m = [n_m^T \quad \det J_{vs} \quad 0]^T \in \mathbb{R}^{n+2} \quad (6)$$

$$\bar{n}_b = [n_b^T \quad 0 \quad \det J_{vs}]^T \in \mathbb{R}^{n+2} \quad (7)$$

よって, 式 (4) の解は次式のようになる.

$$\dot{q} = b_m \bar{n}_m + b_b \bar{n}_b \quad (8)$$

ただし,  $b_m, b_b$  は任意のスカラー量とする. また, 式 (8) を展開すると以下のようになる.

$$\dot{q} = b_m n_m(q, t) + b_b n_b(q, x_b) \quad (9)$$

$$\dot{q}_* = b_m \det J_{vs} \quad (10)$$

$$1 = b_b \det J_{vs} \quad (11)$$

式 (9) において, 特異点から離れている場合では式 (10), 式 (11) より  $b_m, b_b$  を求める. 特異点近傍では,  $\dot{q}_* = \bar{b}_m \det J_{vs}$ ,  $1 = \bar{b}_b \det J_{vs}$  とし,  $\bar{b}_m, \bar{b}_b$  を正の一定値として切り替えることにより安定した動作が可能となる. なお,  $\bar{b}_b$  は  $G_b$  を含めたものとする. また, 特異点を通過する場合, 式 (10), 式 (11) において  $\det J_{vs}$  の符号が変わるため,  $b_m = \sigma_m \bar{b}_m$ ,  $b_b = \sigma_b \bar{b}_b$  とし正負の単位量を示す  $\sigma_m, \sigma_b$  を調整する必要がある [7].

特異点適合法に基づいた振動抑制制御を行う式 (9) は  $n_m$  の項で無反動なマニピュレータの先端の制御を行い,  $n_b$  の項で重心の制御を行い, セルフモーションによる振動抑制を可能としている. つまり, 特異点適合法に基づいた振動抑制制御を用いることで, 無反動なマニピュレータ先端の制御とセルフモーションによる振動抑制制御を同時に行うことが可能となる. しかしながら, アルゴリズム的特異点通過後に先端が逆方向に動作してしまい, 作業空間が限られてしまう.

### 3 擬似逆行列を用いた振動抑制制御

特異点適合法に基づいた振動抑制制御の場合, 作業空間が限定されてしまうという問題があった. これは,  $n_m$  と  $n_b$  の項の制約が強すぎるために, これら 2 つの項を協調させ制御することは困難だからである. 特に,  $n_m$  の項が

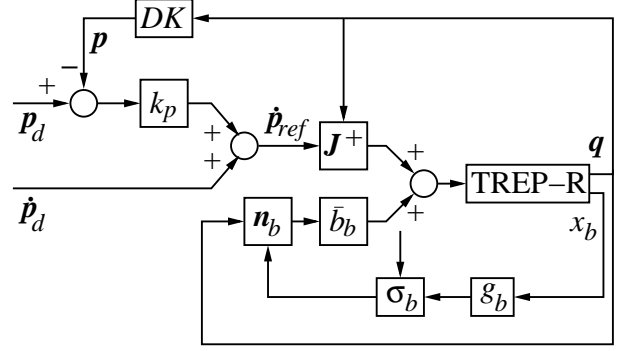


Fig.1: Vibration suppression control block diagram.

重心をベース部の振動の生じる低剛性方向 ( $x$  方向) に完全に動作しないことが主な原因である. そこで,  $n_m$  を擬似逆行列に置き換え, マニピュレータ先端を制御することにより重心を動作させ, アルゴリズム的特異点を回避することができる. これにより, 広い作業空間を得ることができる.

擬似逆行列を用いたマニピュレータ先端の速度と関節角速度の関係式は次式のようになる.

$$\dot{q} = J(q)^+ \nu + (I - J(q)^+ J(q)) \zeta_1 \quad (12)$$

ここで,  $\zeta$  は任意の  $n$  次元ベクトルであり,  $(I - J^+(q)J(q))\zeta$  はマニピュレータのセルフモーションを行う項である. そこで, 式 (12) のセルフモーションを行う第 2 項を, 式 (9) のセルフモーションにより振動抑制制御を行う  $n_b$  の項と置き換えると次式が得られる.

$$\dot{q} = J(q)^+ \nu + b_b n_b(q, x_b) \quad (13)$$

式 (13) は速度レベルの零空間を用いた振動抑制制御の制御式となる.

Fig. 1 に TREP-R の擬似逆行列を用いた振動抑制制御のブロック線図を示す. マニピュレータ先端速度  $\dot{p}_d$  と先端の目標位置  $p_d$  を入力し, マニピュレータ先端の速度に対してフィードバック制御を行う.

$$\nu \equiv \dot{p}_{ref} = \dot{p}_d + K_p(p_d - p) \quad (14)$$

$K_p = \text{diag}(k_p, k_p)$  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.

## 4 実験結果

使用する実験装置 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, 1 つの冗長自由度を持つ構造になっている. この TREP-R を用いて擬似逆行列のみの制御と擬似逆行列を用いた振動抑制制御の 2 つの実験を行った. ただし, 初期姿勢:  $q = [1.53, -1.01, 2.12]^T$  とし, 振動に対するゲイン定数  $G_b$  を含む  $\bar{b}_b$  は  $\bar{b}_b = 20000 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$ , マニピュレータ先端

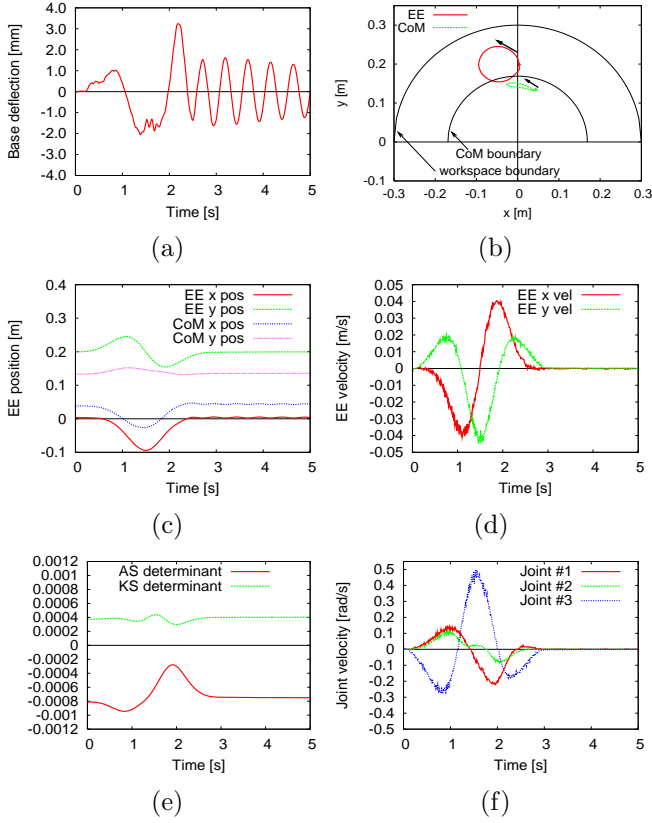


Fig.2: Without vibration suppression.

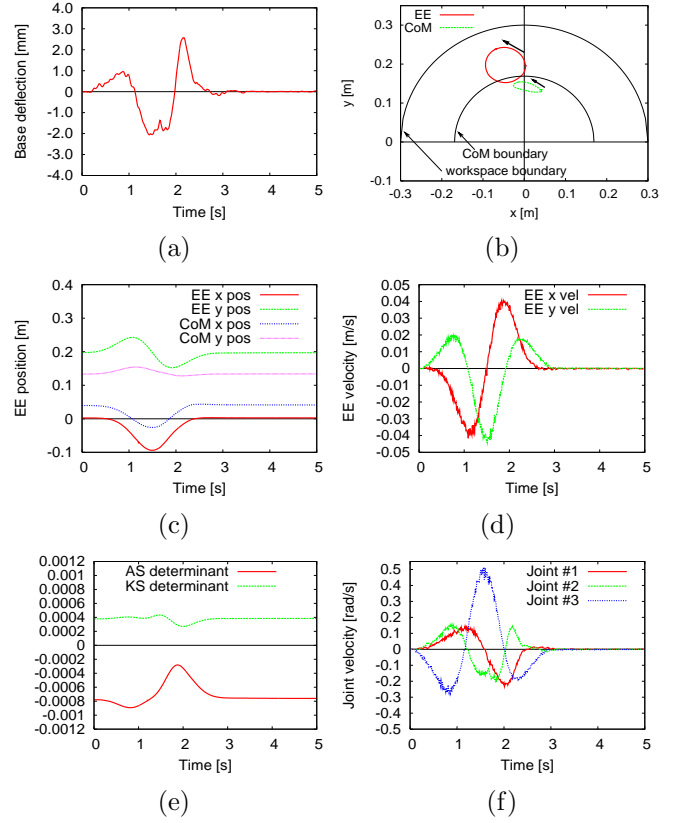


Fig.3: With vibration suppression.

の位置フィードバックゲイン  $k_p$  は  $1 \text{ s}^{-1}$  とする．また，目標軌道は 3 s で半径 0.05 m の円軌道を描かせている．

#### 4.1 擬似逆行列を用いた実験結果

Fig. 2 は，擬似逆行列を用いた実験結果を示している．Fig. 2 上段右より，擬似逆行列を用いることによりマニピュレータ先端が円弧を描き，目標軌道を追従できていることが確認できる．しかし，Fig. 2 上段左より，振動が発生してしまっていることがわかる．これは擬似逆行列に無反動を行う項が含まれないために振動が発生する．

#### 4.2 擬似逆行列を用いた振動抑制制御の実験結果

Fig. 2 は，擬似逆行列を用いた振動抑制制御の実験結果を示している．Fig. 2 上段右より，擬似逆行列を用いることによりマニピュレータ先端の円弧を描いている目標軌道を追従できていることが確認できる．また，Fig. 2 上段左より，マニピュレータの動作により振動は生じてしまうが，振動抑制をする  $n_b$  の効果により，2.5 s 付近で瞬時に振動が抑制されている様子が確認できる．このことより，振動抑制制御の零空間ベクトル  $n_b$  はマニピュレータ先端を制御する擬似逆行列などと同時に制御可能であるといえる．また，マニピュレータ先端の動作後では柔軟ベース部の振動は抑制されているため，すぐに次の作業を行うことが可能である．

## 5 結言

擬似逆行列を用いた振動抑制制御において，擬似逆行列を用いることでアルゴリズム的特異点を回避し，マニピュレータ先端の目標を追従しつつ，振動抑制が可能なことを示した．

## 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] 菱沼利光, D. N. ネンチェフ: "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," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集, 1A1B07, 2006.
- [3] T. Hishinuma and D. N. Nenchev: "Singularity-consistent vibration suppression control with a redundant manipulator mounted on a flexible base," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, October, 9–15, 2006, pp. 3237–3242.
- [4] 菱沼利光, D. N. ネンチェフ: "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," 第 7 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1A1B07, 2006.
- [5] D. N. Nenchev: "Redundancy resolution through local optimization: a review," Journal of Robotic Systems, Vol. 6, No. 6, pp. 769–798, 1989.
- [6] 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.
- [7] 妻木勇一, 小寺真司, D. N. Nenchev, 内山勝: "6 自由度マニピュレータの特異点適合遠隔操作," 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 195–204, 1998.