

# 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トルク制御

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

原 直行 (武蔵工大) 深津 祐介 (武蔵工大)  
金宮 好和 (D. N. ネンチェフ) (武蔵工大) 佐藤 大祐 (武蔵工大)

Naoyuki HARA, Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo  
Yusuke FUKAZU, Musashi Institute of Technology  
Yoshikazu KANAMIYA (D. N. Nenchev), Musashi Institute of Technology  
Daisuke SATO, Musashi Institute of Technology

**Abstract:** In a previous study, we have applied the Singularity-Consistent method with vibration suppression control to a redundant manipulator mounted on a flexible base, under velocity control. In this work, a resolved acceleration control base on the pseudoinverse is applied to avoid the problem of algorithmic singularities. For vibration suppression, a null space term is added, derived with the help of the Singularity-Consistent method. Simulations show stable performance, provided kinematic singularities are avoided.

**Key Words:** Redundant manipulator, Flexible base manipulator, Vibration suppression, Singularity-consistent method, Pseudoinverse matrix

### 1 緒言

現在, 宇宙での作業は, 宇宙飛行士の船外活動 (Extra Vehicular Activity: EVA) によって進められている。しかし, 宇宙空間での作業には大きなリスクがあり, その代替としてマクロ・ミニマニピュレータの利用が期待されている。このマクロ・ミニマニピュレータシステムという概念は Sharon と Hardt によって持ち出された [1]。微小重力環境において, 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やバックラッシュにより振動が生じ, ミニマニピュレータの作業に悪影響を及ぼす [2]。

我々は, この問題に対し反動零空間 (Reaction Null Space) [3] を用いて柔軟ベース上単腕マニピュレータの運動制御を行った [4]。また, 吉田らは, 反動零空間の概念を基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上冗長マニピュレータに適用してきた [5]。しかし, 冗長マニピュレータの先端制御を行う場合には, 各関節角速度の解が無限に求められ, 一つの動作の解を求めるためには, 動作に対して制約を与える必要がある [6]。

そこで, 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に, 特異点適合法 (Singularity-consistent method) [7] に基づいた振動抑制制御 (Singularity-consistent vibration suppression: SCVS) を適用し, 振動問題と特異点問題を解決してきた [8][9]。SCVS は, 冗長性に対し制約として振動抑制制御を適用することで, ベース部に対して無反動なマニピュレータ先端

の制御 (無反動制御) 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 (振動抑制制御) を同時に行うことを可能とする。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特異姿勢が存在し, 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, 擬似逆行列を用いた振動抑制制御 (Pseudoinverse vibration suppression: PIVS) を適用した [10]。擬似逆行列を用いることで, マニピュレータの先端に対する制約をなくし, 自由に動作させることが可能となるが, 動作の際に振動が発生する。ここで, 擬似逆行列のセルフモーションを行う項に対して, セルフモーションにより振動抑制を行う制御式 (SCVS の振動抑制制御項) を用いることで瞬時に振動を制御することができた。

以上のように, 我々は SCVS および PIVS という独自の振動抑制制御法を実験機である柔軟ベース上冗長マニピュレータ TREP-R に適用し, その有効性を明らかにしてきた。しかし, そのロボットシステムの制限上, 本振動抑制制御法の研究は, 速度制御されるロボットシステムのみに限定されており, より有効に活用可能なトルク制御を適用したロボットシステムに対して研究がなされていなかった。

そこで本稿では, TREP-R をモデルとしたダイナミックシミュレータを構築し, 分解加速度制御を用いた 3 自由度冗長マニピュレータに PIVS を適用し, その有効性を確

認する．また，PIVS の制御式より由来する特異点問題に対して，キネマティック特異点付近を通過させる円軌道を描かせ，安定に振動抑制することも示す．

本研究に用いるダイナミックシミュレータのトルク制御式を示すため，第 2 章では基礎運動方程式を，第 3 章では特異点適合法に基づいた振動抑制制御を第 4 章では，擬似逆行列を用いた振動抑制制御について述べる．第 5 章では，2～4 章で導出された制御式を実験機およびダイナミックシミュレータに適用し，第 6 章においては，トルク制御される柔軟ベース上マニピュレータの擬似逆行列を用いた振動抑制制御実験を行い，その結果を考察する．そして，最後に第 7 章で結言を述べる．

## 2 運動方程式

以下に，柔軟ベース上マニピュレータの運動方程式を示す．

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

ここで， $\dot{x}_b = \begin{bmatrix} v_b^T & \omega_b^T \end{bmatrix}^T$  であり， $v_b$  はベース部先端の並進速度， $\omega_b$  は姿勢角速度である．その他の記号については以下の通りである．行列の表記に使用されている  $n$  は関節角度空間， $m$  は作業座標空間の自由度を示す．また，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．

$q$	$\in \mathbb{R}^n$	: 関節角度ベクトル
$H_m$	$\in \mathbb{R}^{n \times m}$	: マニピュレータ慣性行列
$H_b$	$\in \mathbb{R}^{m \times m}$	: ベース部慣性行列
$H_{bm}$	$\in \mathbb{R}^{k \times n}$	: ベース部とマニピュレータの 干渉慣性行列
$c_m$	$\in \mathbb{R}^n$	: マニピュレータ遠心力 ・コリオリ力項
$c_b$	$\in \mathbb{R}^m$	: ベース部遠心力・コリオリ力項
$K_b$	$\in \mathbb{R}^{m \times m}$	: ベース部剛性行列
$D_m$	$\in \mathbb{R}^{m \times m}$	: マニピュレータ部粘性行列
$D_b$	$\in \mathbb{R}^{m \times m}$	: ベース部粘性行列
$\tau$	$\in \mathbb{R}^n$	: マニピュレータの関節トルク
$\Delta x_b$	$\in \mathbb{R}^m$	: ベース部微小変位

## 3 特異点適合法に基づいた振動抑制制御 (SCVS)

### 3.1 関節角速度を用いる場合

$n$  自由度の関節角度空間を持つマニピュレータは， $m$  自由度の作業空間において  $m < n$  である場合， $n - m$  個の冗長自由度を持つ冗長マニピュレータとなる．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  $\nu = \begin{bmatrix} v^T & \omega^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^n$  とすると，関

節角速度との関係は次のようになる．

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

ただし，ヤコビ行列は  $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$  である．また，マニピュレータをアクティブダンパとして動作させ振動を抑制する振動抑制制御式は，以下のように求めることができる．(詳細に関しては，文献 [4] を参照されたい.)

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

ここで， $G_b$  はアクティブダンパゲインである．式 (3) を関節角速度に関する式にするために時間積分すると，

$$G_b \Delta x_b = H_{bm} \dot{q} \quad (4)$$

が得られる．この際， $H_{bm}$  は  $\Delta x_b$  と比べ変化が小さいため，一定値としている．冗長性を解決するため，式 (2) と，(4) を結合し，

$$\begin{bmatrix} \nu \\ G_b \Delta x_b \end{bmatrix} = J_{vs} \dot{q} \quad (5)$$

が得られる．ここで， $J_{vs} = \begin{bmatrix} J^T & H_{bm}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$  であり，正方行列となるため行列式  $\det J_{vs}$  が得られる．この  $\det J_{vs} = 0$  となる場合，新たな制約である振動抑制制御によって与えられ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 (5) 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次方程式を求めた．

$$\bar{J}_{vs} \dot{q} = \begin{bmatrix} J & -t_* & 0 \\ H_{bm} & 0 & -G_b \Delta x_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{q}_* \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

ここで， $\nu = \dot{q}_* t_*$ ， $\dot{q}_*$  はスカラー量であり， $t_*$  はマニピュレータ先端の単位ツイストを示す． $\bar{J}_{vs}$  の零空間の射影行列を求めることで，式 (6) の解は次式のようになる．

$$\dot{q} = b_m \bar{n}_m + b_b \bar{n}_b \quad (7)$$

ただし， $b_m$ ， $b_b$  は任意のスカラー量とする．また，式 (7) を展開すると，

$$\dot{q} = b_m n_m(q, t_*) + b_b n_b(q, \Delta x_b) \quad (8)$$

$$\dot{q}_* = b_m \det J_{vs} \quad (9)$$

$$1 = b_b \det J_{vs} \quad (10)$$

となる．式 (8) において， $n_m$  は無反動制御項， $n_b$  は振動抑制項である．特異点から離れている場合では式 (9)，(10) より  $b_m$ ， $b_b$  を求め，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マニピュレータの安定した動作が可能となる．なお， $\bar{b}_b$  には  $G_b$  が含まれる．

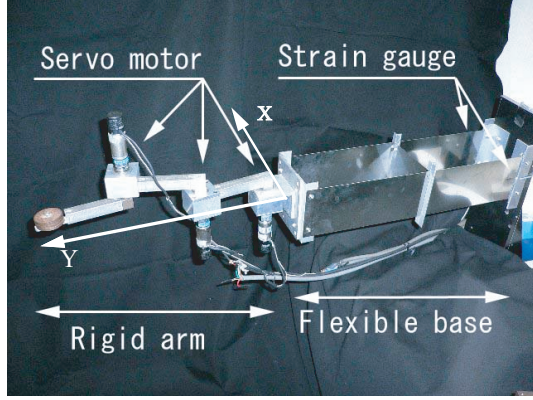


Fig. 1: TREP-R.

### 3.2 関節角加速度を用いる場合

SCVS の加速度レベルにおける式を以下に示す．式 (2) を時間微分すると，

$$\dot{\nu} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (11)$$

となり，式 (3) と結合することによって，式 (12) が得られる．

$$\begin{bmatrix} \dot{\nu} - \dot{J}(q)\dot{q} \\ G_b \dot{x}_b \end{bmatrix} = J_{vs} \ddot{q} \quad (12)$$

式 (6) と同様に，式 (5) 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次方程式 (13) を得る．

$$\tilde{J}_{vs} \ddot{q} = \begin{bmatrix} J & -t_* & a \\ H_{bm} & 0 & -G_b \dot{x}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_* \\ \ddot{q} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

ここで， $\dot{\nu} = \ddot{q}_* t_* + \dot{q}_* \dot{t}_*$ ， $a = \dot{J}\dot{q} - \dot{q}_* \dot{t}_*$  である． $a$  は， $\nu$  を微分した際に得られる速度項をまとめたものである． $\tilde{J}_{vs}$  の零空間の射影行列を求めることで，展開した解は次式で表される．

$$\ddot{q} = b_m n_m(q, t_*) + b_b n_b(\dot{q}, \dot{x}_b, a) \quad (14)$$

$$\ddot{q}_* = b_m \det J_{vs} \quad (15)$$

$$1 = b_b \det J_{vs} \quad (16)$$

## 4 擬似逆行列を用いた振動抑制制御 (PIVS)

Fig. 1 に示した TREP-R に対して，特異点適合法に基づいた振動抑制制御を行った場合，作業空間に制限がかかる問題があった．これは，反動零空間法より求められた，X 方向に動作させない無反動制御項の  $n_m$  と X 方向に動作し振動を抑制する振動抑制項の  $n_b$  の制約が強すぎることで，これら二つの項を協調させ制御することが困難なためである．特に，ベース部の振動が生じる低剛性方向 (X 方向) へ重心を動作させにくくする  $n_m$  の項が主な原因であった．この問題に対し， $n_m$  を擬似逆行列に置き換えることで，マニピュレータ先端制御により重心を動作可能とし，アルゴリズム的特異点を回避可能となる．これにより，より広い作業空間を得ることができる．以下に，

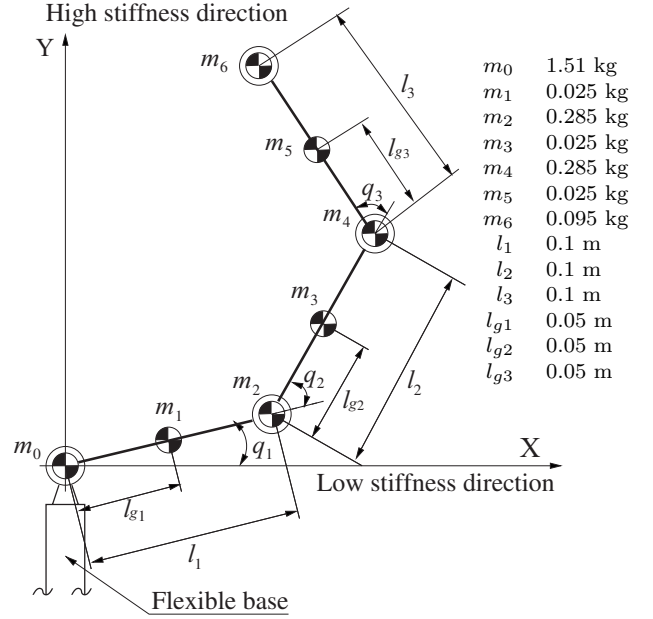


Fig. 2: Model of TREP-R.

PIVS を関節角速度と関節角加速度に用いた場合について，それぞれの一般的な制御式を示す．

### 4.1 関節角速度を用いる場合

冗長マニピュレータを用いる場合，式 (2) のヤコビ行列  $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$  は長方形列となり逆行列を求めることができない．そこで，式 (2) に対して，左から  $J(q)$  の擬似逆行列をかけることにより，マニピュレータ先端の速度と関節角速度の関係式が求まる．

$$\dot{q} = J^+(q)\nu + (I - J^+(q)J(q))\zeta_v \quad (17)$$

ここで， $\zeta_v$  は任意の  $n$  次元ベクトルであり， $(I - J^+(q)J(q))\zeta_v$  はマニピュレータのセルフモーションを表す項である．この式 (17) のセルフモーションを行う第 2 項を，式 (8) 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，

$$\dot{q} = J^+(q)\nu + b_b n_b(q, \Delta x_b) \quad (18)$$

が得られ，式 (18) 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．

### 4.2 関節角加速度を用いる場合

マニピュレータ先端の加速度と関節角加速度の関係を表す式 (11) より，冗長マニピュレータの関節角加速度について解くと次式が得られる．

$$\ddot{q} = J^+(q) \left( \dot{\nu} - \dot{J}(q)\dot{q} \right) + (I - J^+(q)J(q))\zeta_a \quad (19)$$

ここで， $\zeta_a$  は任意の  $n$  次元ベクトルである．式 (18) と同様に式 (14) の  $n_b$  項と置き換えると，

$$\ddot{q} = J^+(q) \left( \dot{\nu} - \dot{J}(q)\dot{q} \right) + b_b n_b(q, \dot{x}_b) \quad (20)$$

となる．ここで，速い動作を行わない場合には， $\dot{J}$ ， $\dot{t}_*$  の値は小さいため， $\dot{J}\dot{q}$ ， $\dot{t}_* \dot{q}_*$  をゼロに近似し， $a = 0$  とした．

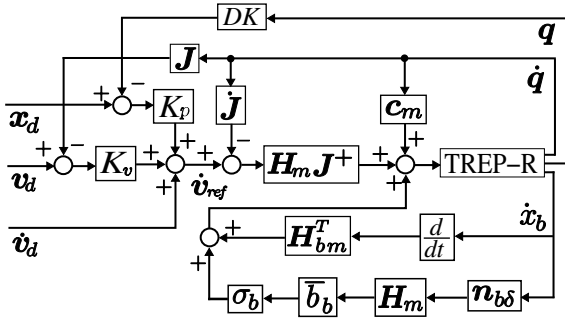


Fig. 3: Block diagram of the torque based PIVS controller.

## 5 ダイナミックシミュレータおよび実験機に適用される制御式

PIVS を用いるダイナミックシミュレータに適用する分解加速度制御と、実験機に適用する分解速度制御について述べる．実験機の全体写真を Fig. 1 に、モデルを Fig. 2 に示す．マニピュレータは、平面上並進 2 自由度に対し並進 3 自由度を持つため、並進 1 自由度の冗長を有し、柔軟ベースの低剛性方向を X 方向とする．慣性座標系は、Flexible base 固定端 (Fig. 1 の右側) を中心とし、Flexible base とマニピュレータの固定部をマニピュレータの基準座標系とする．Fig. 2 の座標系はマニピュレータに対する基準座標系を示す．また、シミュレーションでは Fig. 2 の Flexible base がばね・ダンパに置き換えられる．

### 5.1 分解加速度制御 (ダイナミックシミュレータ)

マニピュレータ先端の目標軌道  $x_d$ 、目標速度  $v_d$ 、目標加速度  $\dot{v}_d$  より、マニピュレータ先端の加速度  $\dot{v}_{ref}$  は、

$$\dot{v}_{ref} = \dot{v}_d + K_v(v_d - v) + K_p(x_d - x) \quad (21)$$

ここで、 $K_v, K_p$  は適当なゲイン行列であり、 $v$  は現在のマニピュレータ先端速度である．マニピュレータ先端の目標加速度  $\dot{v}_{ref}$  を実現する関節角加速度は  $\ddot{q}_{ref}$  は、式 (20) より次式で示される．

$$\ddot{q}_{ref} = J^+(q) (\dot{v}_{ref} - \dot{J}(q)\dot{q}) + b_b n_{b\delta}(q) g_b \dot{x}_b \quad (22)$$

ここで、 $n_b(q, \dot{x}) = n_{b\delta}(q) g_b \dot{x}_b$  であり、 $g_b$  はアクティブダンパゲインでスカラー量である．ベース部は平面 X 方向のみ並進運動するため  $\dot{x}_b$  である．

また、動力学計算を行うためのトルク式を示す．マニピュレータ部の運動方程式は式 (1) より

$$\tau = H_m(q)\ddot{q} + H_{bm}^T(q)\ddot{x}_b + c_m(q, \dot{q}) \quad (23)$$

である．よって、求めるトルク制御式は、式 (23) に式 (22) を代入することで、

$$\begin{aligned} \tau_{ref} = & H_m(q)J^+(q) (\dot{v}_{ref} - \dot{J}(q)\dot{q}) \\ & + c_m(q, \dot{q}) + H_{bm}^T(q)\ddot{x}_b + b_b H_m(q)n_{b\delta}\dot{x}_b \end{aligned} \quad (24)$$

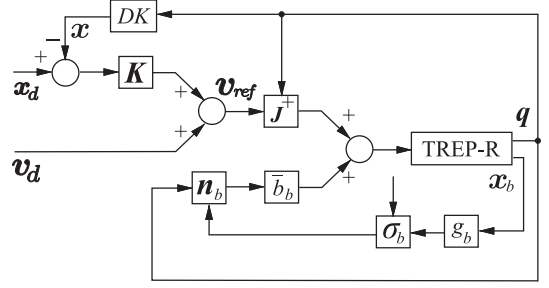


Fig. 4: Block diagram of the velocity based PIVS controller.

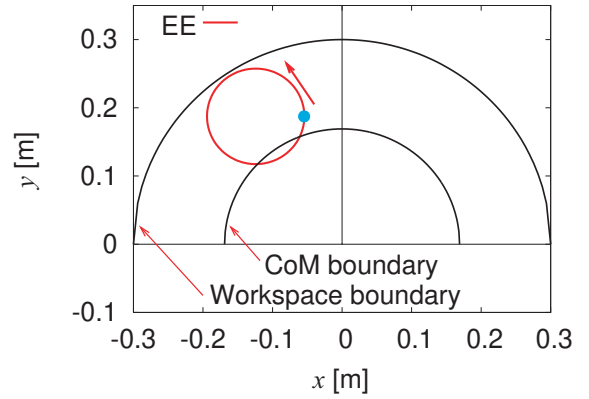


Fig. 5: Target trajectory of end-effector.

となる．ただし、式 (22) のアクティブダンパゲイン  $g_b$  は  $b_b$  に含める．また、ベース部は平面 X 方向の並進運動するため  $\dot{x}_b$  である．Fig. 3 にシミュレーションに適用する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．

### 5.2 分解速度制御 (実験機)

マニピュレータ先端の目標速度  $v_d$  と、目標位置  $x_d$  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．

$$v \equiv v_{ref} = v_d + K_p(x_d - x) \quad (25)$$

$K_p$  は適当なゲイン行列とする． $x$  は角度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．式 (18) より、マニピュレータ先端の目標速度  $v_{ref}$  から求められる、マニピュレータの目標関節速度  $\dot{q}_{ref}$  は、

$$\dot{q}_{ref} = J^+(q)v_{ref} + b_b n_{b\delta}(q) g_b \Delta x_b \quad (26)$$

となる．ここで、 $\Delta x_b$  は柔軟ベースの微小変位である．Fig. 4 に実験機に適用する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．

## 6 PIVS を用いた振動抑制制御実験

### 6.1 実験方法

今回、ダイナミックシミュレータを用いたトルク制御と、実験機を用いた速度制御の場合の実験を行った．両実験は同じ初期条件の下で行った．共通パラメータとして、

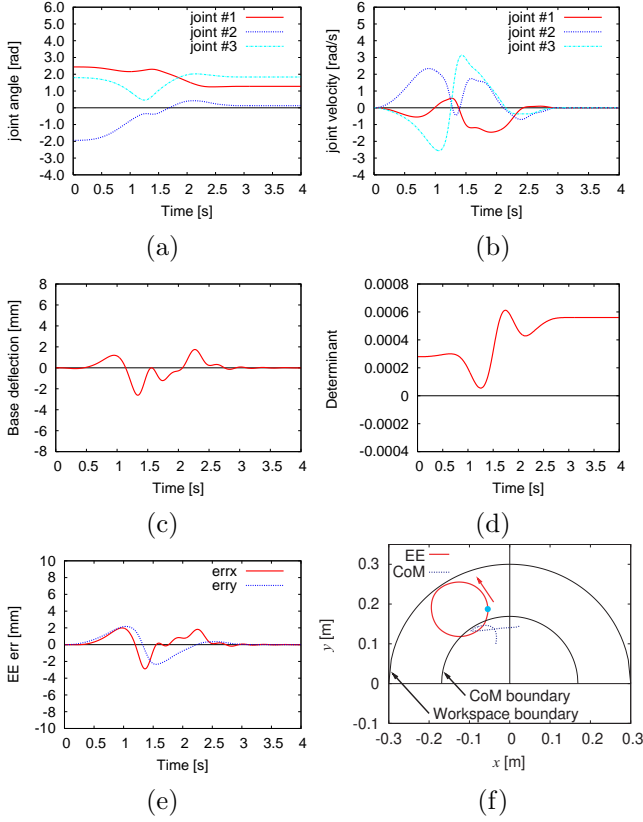


Fig. 6: The results of simulation using PIVS.

初期関節角度は  $q = [139.6, -111.2, 103.0]^T$  [°], 振動抑制のゲイン定数は  $b_b = 20000$  [m<sup>-3</sup>],  $K_v = 200$  [s<sup>-1</sup>],  $K_p = 2500$  [s<sup>-2</sup>] とした。また, シミュレーションでは, 実験機のアクチュエータに存在する粘性摩擦項を模擬し, 粘性摩擦行列を  $D_m = \text{diag}[-0.05, -0.05, -0.05]$  [kg·m/s] とした。本実験では, マニピュレータ先端に半径 0.07 [m] 円軌道を 3 [s] 間で描かせ, 1 [s] 間静止させたデータを取った。Fig. 5 に目標の円軌道を示す。なお, 目標位置  $x_d$ , 目標速度  $v_d$ , 目標加速度  $\dot{v}_d$  には, 5 次スプライン補間を用いた。さらに, 上記のパラメータを用いることで, 動作時にキネマティック特異点付近を通過させ, その挙動を確認することが可能となる。

## 6.2 実験結果および考察

Fig. 6 に擬似逆行列を用いた振動抑制制御 (PIVS) シミュレーションの結果を示す。各グラフは, (a) 関節角度, (b) 関節加速度, (c) ベース部変位, (d) 擬似逆行列の行列式, (e) 慣性座標系からのマニピュレータ先端エラー, (f) マニピュレータ先端・重心の軌道を示す。

PIVS では, キネマティック特異姿勢やその付近において擬似逆行列の行列式  $\det J J^T$  が過大な値となり, 各関節のアクチュエータに対し適切な角速度・角加速度を与えることが不可能となる。そのため, Fig. 6 の (f) で作業範囲限界付近 (キネマティック特異姿勢付近) を通過した際, (b) の 1.25 [s] で, 角速度の変化率が大きくなった。キネ

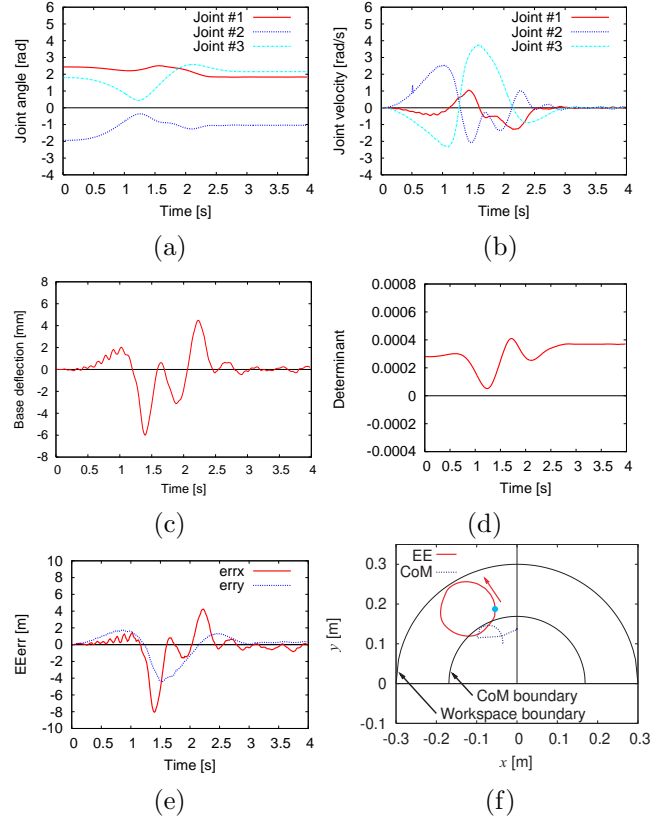


Fig. 7: The results of experiment using PIVS.

マティック特異姿勢に近づいたことは, (d) の 1.25 [s] で値がゼロに近づいていることから確認できる。また, その際にベース部変位が大きく変化した。これは, アクチュエータの関節角加速度が増加した際の慣性力と重心の X 方向への動作によるものである。さらに (c) より, 重心の移動によって, 円弧を描いている 3 [s] までの間, ベース部の振動が発生することが確認できた。しかし, 3 [s] 以降の静止している 1 [s] 間では姿勢を安定させ, 速やかにベース部の振動が抑制されていた。よって, 式 (18) の振動抑制制御による, ベース部の振動抑制が働いたことが確認できた。

次に, Fig. 7 が示した実験機での制御実験結果とシミュレーションの結果を比較する。Fig. 6, Fig. 7 の (c), (d), (f) の挙動が似ていることがわかった。しかし (a) を比べると, 1.25 [s] 以降にて第二関節角度の挙動が大きく異なった。これは, 式 (21) のマニピュレータの先端のフィードバック制御として関節空間でなかったことや, 速度制御とトルク制御では, 出力される値が異なったこと, また, 擬似逆行列を用いたため, 関節空間の結果が周りの状況によって変化したことにより, 各関節が状況に合わせ動作し, 両結果の関節角度の挙動が異なった。また, 関節角度の挙動が違う影響より (f) の重心位置に関する二つの結果も異なった。これにより, ベース部に与える X 方向の力が異なり, (c) のベース部変位量が変化した。さらに, ベース

部の変位量の違いによる慣性力の違いや，制御法の違いより，(e) の値が異なった．上記のように，関節角度の挙動の違いより，実験結果が一致することはなかったが，シミュレーションによるトルク制御が安定して行われたことは確認できた．

## 7 結言

今回，PIVS をトルク制御されたマニピュレータのダイナミックシミュレータに適用し，その有効性を示した．また，キネマティック特異点付近を通過させる軌道を与え，安定に動作を終了することが可能であることを示した．実験機とシミュレーションを比較した結果，先端位置制御に関し，与えられた円軌道を描いていることが確認できた．また，先端位置のエラーの精度向上を確認することができた．しかし擬似逆行列を用いたことで，関節空間に関して制御が行われず，関節角度の挙動が異なった．キネマティック特異点付近通過に対する結果として，シミュレーションおよび実験機のどちらにおいても，キネマティック特異点付近に達した場合，PIVS の特異点問題によるアクチュエータへの過大な入力値や，振動抑制制御の性能が落ちた事により，ベース部に振動が発生した．しかし，円軌道の終了地点にて，再び安定し振動抑制制御を行っていることが確認できた．

## 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, pp. 1836–1842, 1984.
- [2] H. Motiomoto, N. Satoh, Y. Wakabayashi, M. Hayashi, and Y. Aiko, "Performance of Japanese Robotics Arms of the International Space Station," 15th IFAC World Congress, 2002.
- [3] D. N. Nenchev and K. Yoshida, "Impact analysis and post-impact motion control issues of a free-floating space robot subject to a force impulse," IEEE Tr. on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 3, pp. 548–557, June 1999.
- [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] 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制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.
- [6] D. N. Nenchev: "Redundancy resolution through local optimization: a review," J. of Robotic Systems, Vol. 6, No. 6, pp. 769–798, 1989.
- [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.
- [8] 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.
- [9] 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, pp. 3237–3242, 2006.
- [10] 深津祐介, 菱沼利光, D. N. ネンチェフ: "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", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 講演論文集, 2A1B02, 2007.