

# 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

菱沼 利光 阿部 崇志 Dragomir N. Nenchev 武蔵工業大学

## Singularity-Consistent based Teleoperation of a Manipulator Mounted on a Flexible base

Toshimitsu Hishinuma, Takashi Abe and Dragomir N. Nenchev  
Musashi Institute of Technology

**Abstract**—This paper describes an experimental system for teleoperation of a dual-arm manipulator mounted on a flexible base. In previous studies we have developed a reactionless motion control law and vibration suppression control law. In this paper, we introduce the capability of singularity-consistent motion control of the flexible-base manipulator system. Our aim is to obtain a high-performance teleoperation system with very good stability. Experimental data is presented.

**Key Words:** Flexible Structure Mounted Manipulator System, Teleoperation, Singularity-Consistent, Vibration Suppression, Reactionless Motion, Space Manipulator

### 1. 緒言

現在，宇宙空間で使用されるロボットマニピュレータの研究が盛んに行われている．代表的なロボットマニピュレータシステムとして，マクロ・マイクロマニピュレータシステムがある．このシステムは，マクロマニピュレータの剛性の低さより，柔軟ベース上マニピュレータ (Flexible Structure Mounted Manipulator System: FSMS) の問題として考えられる．

このようなシステムでは，マイクロマニピュレータの動作によって生じる反力や反モーメントがマクロマニピュレータに伝わり，マイクロマニピュレータの作業に悪影響を及ぼす．また，生じた振動が宇宙船本体にも伝播し，軌道に影響を及ぼす可能性もある．

宇宙ステーションでは，JEMRMS (JAXA), SSRMS (カナダ), ERA (ヨーロッパ) が大型アームとしてステーション建設やペイロード交換作業を行う．SRMS やこれらの大型アームは，ミッション要求からくる性能は異なるが，最終的な形態，技術を確立しつつある [1]．そのため，現状で行えることに対し，効率を上げるために部品を取り付けることは，開発・導入コストを考えれば避けたいことである [2]．これらを考慮すると，今後，マニピュレータの制御及び操作に関する技術が必要となる．

マニピュレータの振動に対する制御として，ジョイスティックによって得られるランダム性の高い制御信号で，柔軟ベース上の同一の双腕マニピュレータに無反動軌道を用いて動作させた場合において，ベース部に振動を発生させない動作を実現している [3, 4]．また，柔軟ベース上のマニピュレータを遠隔操作し，ベース部に発生した振動に対し振動抑制制御を用いて抑制できることが証明されている [5]．

マニピュレータを操作するうえで，機構の特異点の問題が上げられる．宇宙空間で使用されている SRMS は 6 自由度マニピュレータ，SSRMS は 7 自由度マニピュ

レータである．7 自由度マニピュレータは冗長マニピュレータと呼ばれ，6 自由度マニピュレータに比べ特異点の数が増える．操縦者は，機構的な特異点，マニピュレータの座標系，不測事態対策などを把握するためマニピュレータの操作に関して十分な訓練が必要となる．今後，地上からの遠隔操作を行うことを考慮すると多くの人が容易に操縦できることが望ましい．そのため，操縦者の作業負担の軽減，操作のしやすいユーザーインターフェイスの構築が重要な課題となっている．

我々は特異点問題の解決策として，妻木らによって提案された，特異点適合法 (SC: Singularity-Consistent) 法 [6] を用いる．多くの場合，特異点近傍では関節に過大な角速度が発生するため回避するように制御されている．特異点適合法は，特異点及び特異点近傍でも指令速度方向を正確に追従でき，かつ関節に過大な角速度を生じることなく，安定にマニピュレータを制御することができる．

本論文では，柔軟ベース上のマニピュレータに対し，特異点近傍でも安定した動作と操作のしやすさに重点を置いている．特異点適合法を適応し，特異点及び特異点近傍においても操作可能なことを実験によって示しその有効性を示す．また，本田らによって行われた無反動軌道の実験 [3] では，1 リンクの双腕無反動軌道を行っている．ここでは，2 リンクの双腕無反動軌道の有効性と柔軟ベース部に発生した振動に対し振動抑制制御の有効性を示す．特に振動抑制制御は，単腕を持つ JEMRMS/SFA を想定し，無反動軌道では双腕を持つ CANADARM2/Dextre を想定し，その有効性を期待している．

### 2. 運動方程式

柔軟ベース上のマニピュレータの運動方程式は，以下のように線形項と非線形項，ばね項，剛性項にまとめることができる．

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

式中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
- $x_b \in R^m$  : ベース部位置・姿勢ベクトル
- $H_m \in R^{n \times m}$  : マニピュレータ慣性行列
- $H_b \in R^{m \times m}$  : ベース部慣性行列
- $H_{bm} \in R^{m \times n}$  : ベース部とマニピュレータ慣性行列
- $C_m \in R^n$  : マニピュレータ遠心力・コリオリ力項
- $C_b \in R^m$  : ベース部遠心力・コリオリ力項
- $K_b \in R^{m \times m}$  : ベース部剛性行列
- $D_b \in R^{m \times m}$  : ベース部粘性行列
- $\tau \in R^n$  : マニピュレータの関節トルク

### 3. 制御方法

ベース部に発生する振動の原因は、先端のマニピュレータの動作による反動と外部からの力である。前者の反動は無反動軌道を用いて抑制し、後者の外乱や動作によって生じた振動は振動抑制制御を用いて打ち消す。

#### 3.1 無反動軌道 [4]

無反動軌道を適応する上で、初期状態は静止していると仮定する。式 (1) の柔軟マニピュレータの方程式を  $\theta$  と  $x_b$  を含む項ごとに分ける。

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

これより右边がベース部変位  $x_b$  に影響を与えていることがわかる。マニピュレータがベースに及ぼす反力  $F$  は

$$F = H_{bm} \ddot{\theta} + \dot{H}_{bm} \dot{\theta} \quad (3)$$

となる。 $L(0)=0$  の下で  $F$  を時間積分すると以下のようになる。

$$L = H_{bm} \dot{\theta} \quad (4)$$

この  $L$  は干渉運動量と呼ばれるものである。 $F=0$ ,  $L=\text{const}$  となる  $H_{bm}$  の零空間を反動零空間 (Reaction Null Space) と呼ぶ。この条件を満たすようにマニピュレータを操作する限り、ベース部に反動や振動を生じさせることはない。

#### 3.2 振動抑制制御 [5]

振動抑制制御を適応する上で、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  $C_b$  が 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。

$$H_b \ddot{x}_b + K_b x_b = -H_{bm} \ddot{\theta} \quad (5)$$

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。

$$\ddot{\theta} = H_{bm}^+ H_b G_b \dot{x}_b \quad (6)$$

式中の  $G_b$  はフィードバックゲインを意味する。 $H_{bm}^+ \in R^{n \times m}$  は慣性干渉行列の右擬逆行列を意味し、 $H_{bm} H_{bm}^+ = E$  となり  $E$  は単位行列である。

#### 3.3 特異点適合法 [6]

特異点適合法を実験装置に適用する。実験装置はジョイスティックを介して遠隔操作しマニピュレータの手先を速度制御する。オペレータが与えるマニピュレータの手先の速度を指令手先速度、マニピュレータが実現する手先を単に手先速度と呼び区別する。

マニピュレータの手先速度  $\dot{x}$  と関節角速度  $\dot{\theta}$  の関係は、ヤコビ行列  $J$  を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= J^{-1} \dot{x} \\ &= \frac{1}{\det J} (\text{adj} J) \dot{x} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\det J$  は  $J$  の行列式であり、 $\text{adj} J$  は  $J$  の余因子行列を表す。

特異点において関節角速度が求められない原因は  $\det J$  が 0 になるためである。式 (7) の  $(\det J)^{-1}$  は関節角速度ベクトルの大きさおよび方向の正負に関係するスカラー量である。また、 $(\text{adj} J)^{-1} \dot{x}$  は手先速度方向を実現する各関節角速度間の関係を表している。この関係は、 $(\det J)^{-1}$  を含まないので特異点においても求めることが可能である。したがって、この関節角速度の関係を保ったまま、大きさを適当に設定することにより、特異点や特異点近傍においても過大な関節角速度を生じることになしに、手先速度方向を性格に追従することが可能となる。

この考えに基づき、実験装置の 2 自由度 2 軸マニピュレータの遠隔操作に余因子行列を以下のように適用した。まず、指令手先速度  $\dot{x}_r$  を、大きさ  $\nu_r$  と単位方向ベクトル  $u_r$  に分ける。

$$\dot{x}_r = \nu_r u_r \quad (8)$$

を正負を表す単位量 ( $\sigma = \pm 1$ )、 $b$  を大きさを表すせいのスカラー値とすると、次の関係式が導かれる。

$$\dot{\theta} = \sigma b (\text{adj} J) u_r \quad (9)$$

指令手先速度方向  $u_r$  を尊重し、 $\sigma$  と  $b$  を適当に定めることにより、指令手先速度方向を正確に追従し、かつ過大な関節角速度を生じることなく、安定にマニピュレータを制御することができる。

### 3.4 特異点適合法における速度の決定

特異点適合法を用いると、特異点近傍及び特異点において指令手先速度方向には正確に追従するが、指令手先速度の大きさは保証されない [6]。本実験では 2 軸マニピュレータを使用するため、特異点は第 2 リンクが伸びた状態 ( $\theta_2 = 0$ ) と閉じた状態 ( $\theta_2 = \pm\pi$ ) のみである。速度の大きさ  $b$  に関しては一定の値を使用する。

#### 3.4.1 速度の符号の決定

符合を表す  $\sigma$  は基本的に次式により求められる。

$$\sigma = \text{sgn}(\det \mathbf{J}) \quad (10)$$

式 (10) は、特異点を通過することにより符号が変わることを意味している。しかし、オペレータの与える指令の向きとマニピュレータの手先速度方向が逆になる場合があるため、符号の切り替え時にマニピュレータが微小に振動してしまう問題がある。そのため、特異点を通過した後、オペレータの指令が一度途切れるまで特異点通過前の符号を保持しておくことにより、操作しやすいシステムが構築できる。

## 4. 実験装置

### 4.1 実験装置概要

FSMS の簡単化モデルとして、柔軟ベース上双腕マニピュレータシステム TREP (以下 TREP) を使用する。写真を Fig.1 に示す。

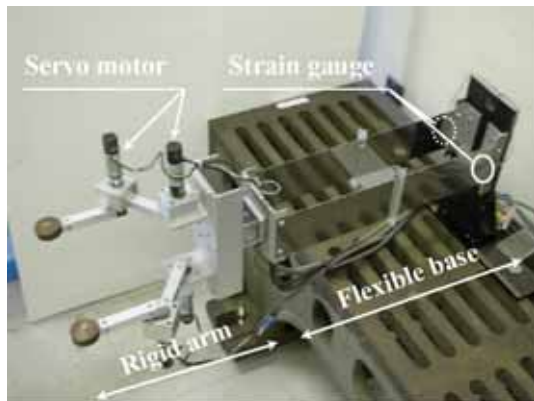


Fig.1 TREP mechanical system.

TREP 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上下に取り付けられたマニピュレータ部分に相当する 2 本の 2 リンク剛体マニピュレータによって構成されている。各ジョイントは、ハーモニックドライブモータで駆動させる。フレキシブルアーム根本中心部の外側部分にひずみゲージが取り付けられており、測定されたひずみからアーム先端部のたわみ量を求めることになる。

### 4.2 制御システム

実験で使用する計測・制御用 PC の主なスペックは、CPU が AMD Athlon 800 MHz、メモリを 384 MB である。ジョイスティックは USB 接続の Microsoft 社製 SIDE WINDER FORCE FEEDBACK2 を使用する。また、OS には実時間性に優れた FSMLabs 社製の

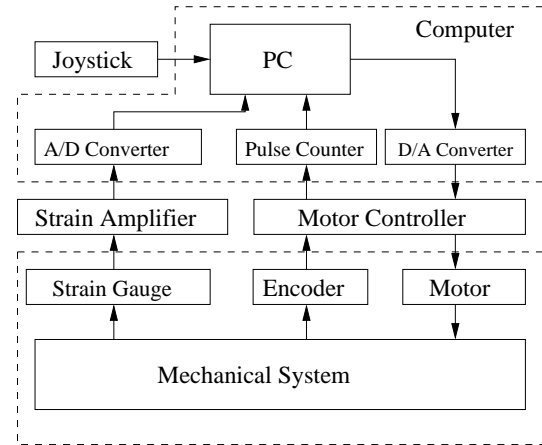


Fig.2 Control architecture of TREP.

RTLinux (Real Time Linux) を使用する。RTLinux は、Linux の環境そのままに実時間性が補償されたリアルタイム環境を構築可能な OS である。TREP の制御システムの構成を Fig.2 に示す。

オペレータはジョイスティックを操作し、上腕部に任意の軌道を描かせることができる。マニピュレータの関節の回転角はモータに取り付けられたエンコーダにより検出される。得られた信号はモータドライバ内部で速度フィードバックに利用されるとともに、カウンタボードを経由して PC に入力される。ひずみゲージの信号は、ひずみゲージアンプによって増幅され A/D 変換ボードを通じて PC に取り込まれる。双腕でマニピュレータを動作させる場合は、PC はそれぞれのエンコーダからの信号より下腕の軌道を計算し、上腕の信号とともに D/A 変換ボードを通じて、モータドライバに制御信号を出力する。

### 4.3 TREP の動的モデル

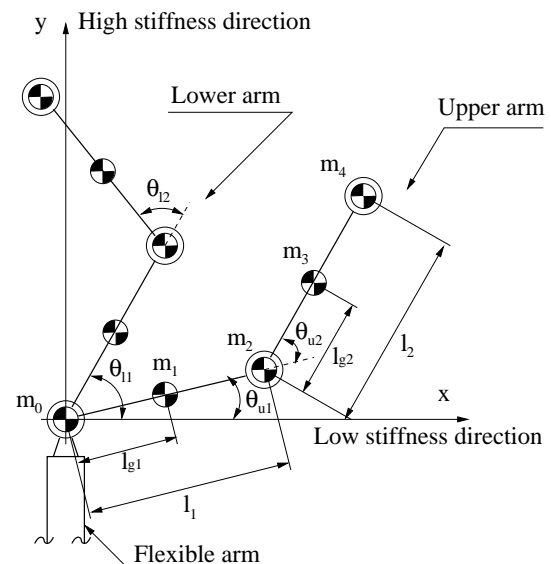


Fig.3 A model of TREP.

TREP のマニピュレータの動的モデルを Fig.3 に示

Table 1 Manipulator link parameters

$l_1$	0.1	[m]
$l_2$	0.1	[m]
$l_{g1}$	0.05	[m]
$l_{g2}$	0.05	[m]
$m_1$	0.025	[kg]
$m_2$	0.285	[kg]
$m_3$	0.025	[kg]
$m_4$	0.095	[kg]
$I_1$	$1.35 \times 10^{-2}$	[kgm <sup>2</sup> ]
$I_2$	$3.07 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]

Table 2 Flexible base parameters

Length	0.4	[m]
Height	0.1	[m]
Width	0.09	[m]
Thickness	$1 \times 10^{-3}$	[m]
Tip mass $H_b(\equiv m_0)$	2.37	[kg]
Stiffness $K_b$	293	[N/m]
Damping $D_b$	2.12	[Ns/m]

す．地上では重力の影響を無視することは難しいため，TREP の動的モデルも平面内にのみ柔軟性を持たせたモデルとしてある．2つのマニピュレータは同じ構造をもつため，上腕 (upper arm)，下腕 (lower arm) のように添え字で区別する．座標系は，低剛性方向を  $x$ ，高剛性方向を  $y$  とする．TREP 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，回転方向は上腕，下腕ともに反時計回りが正である．Table.1 に剛体マニピュレータのパラメータ，Table.1 にフレキシブルアームのパラメータを示す．

## 5. 実験

TREP を用いて以下のような実験を行った．

- 単腕による無反動軌道
- 双腕による無反動軌道と双腕対称動作の比較
- 特異点適合法を適応させ特異点及び特異点近傍の動作
- 単腕による振動抑制制御

実験の初期条件は以下のとおりである．

初期姿勢

$$\begin{aligned} \text{上腕 } \theta_u &= [\pi/2 : 0]^T \\ \text{下腕 } \theta_l &= [\pi/2 : 0]^T \end{aligned}$$

振動抑制制御と無反動軌道においては，あらかじめ上腕をジョイスティックにより任意の動作をさせ，動作時のジョイスティック信号を記録する．記録した信号によって，上腕は Fig.4 のような軌道を描く．単腕による無反動軌道の場合は，ジョイスティックにより任意の

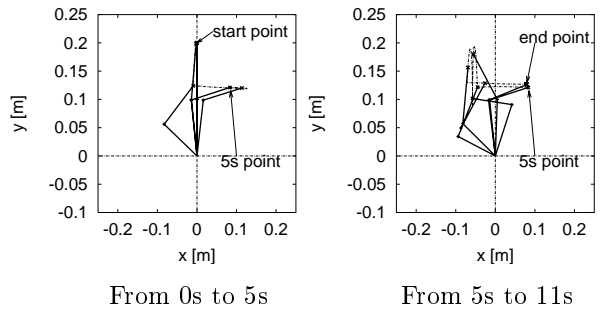


Fig.4 Upper arm locus.

動作をさせる．

### 5.1 単腕による無反動軌道

Fig.5 に単腕無反動軌道を適応させた場合の上腕の関節角度，関節角速度，ベース部のたわみを示す．単腕無反動軌道では，上腕の重心を低剛性方向  $x$  に変位させないように制御するため低剛性方向  $x$  には反力が発生しない．しかし，平面上における動作範囲は制限される．Fig.5 より，上腕の動作時のベース部のたわみは小さいことがわかる．

実験装置が2軸マニピュレータであるため無反動軌

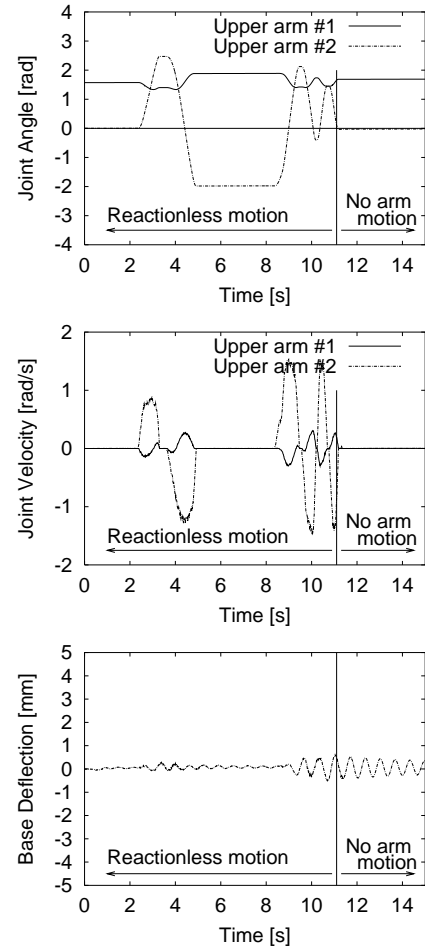


Fig.5 Single-arm reactionless motion.

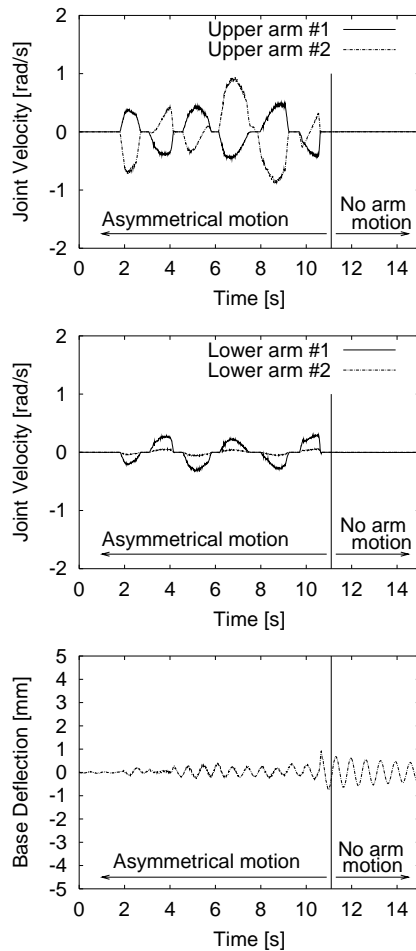


Fig.6 Reactionless teleoperation with asymmetrical motion.

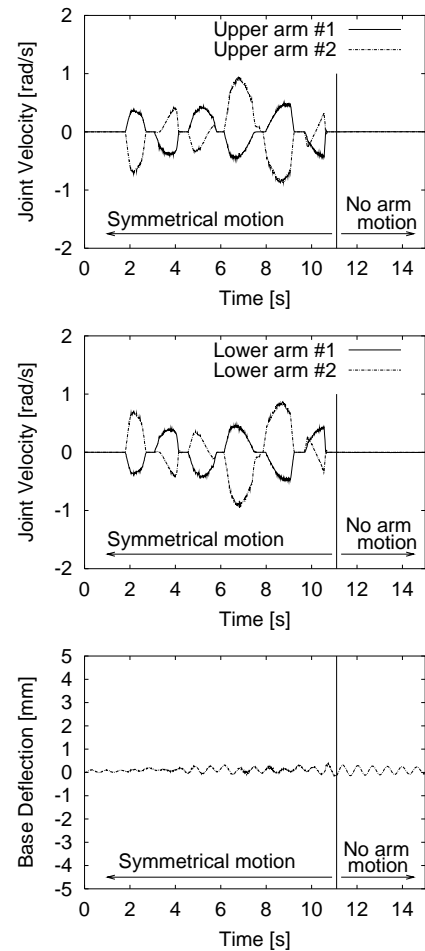


Fig.7 Reactionless teleoperation with symmetrical motion.

道を適応すると動作範囲が制限されてしまうが、腕が伸びた状態の特異点を滑らかに通過していることがわかる。単腕無反動軌道において2軸マニピュレータでは、エンドエフェクタの制御はできないが、マニピュレータに冗長性を与えることにより特異点を気にせずに任意の動作を実現できると考えている。

## 5.2 双腕無反動軌道と双腕対称運動の比較

双腕無反動軌道では、上腕にFig.4のような軌道を描かせ発生した反力を計算し、下腕において発生した反力を補償する。双腕対称運動では、上腕の軌道(Fig.4)に対し下腕の軌道を対称に動作させる。Fig.6に双腕無反動軌道の場合、Fig.7に双腕対称運動の場合の各腕の関節角度、関節角速度、ベース部のたわみを示す。Fig.6, Fig.7より、下腕で上腕を動作させた場合に発生した反力を補償していることがわかる。

2つの制御法では、上腕の動作軌道は同じである。双腕対称運動は動作反力を打ち消し合う理想的な動作である。しかし、上下腕の初期状態が軸に対し対称である必要がある。それに対し、無反動軌道は上下腕が非対称でも動作反力を打ち消し合うことができる。また、上腕の第1リンクと第2リンクの反力をセンサーからの信号より計算で求めているため、下腕で補償する関

節角度、関節角速度の値は最小となっている。

## 5.3 特異点適合法の適応実験

はじめに、TREPに特異点適合法を適応させた結果を示す。Fig.8に特異点適合法を適応させた場合の上腕の関節角度、関節角速度、ベース部のたわみを示す。マニピュレータの初期姿勢は2軸マニピュレータにおいて特異点であるため、本来であれば制御することは難しい。初期姿勢では、ベース部に振動は見られない。動作の始まりにおいても動作における振動は発生しているが、特異点近傍であることが原因と考えられる振動は発生していない。また、上腕の関節角度を示すFig.8より、6.8sと8.6s付近でも特異点(Upper arm #2=0 rad)を通過している。上腕の関節角速度を示すFig.8からわかるように、その付近では関節角速度は0となっていない。そのため、特異点適合法を適用することで特異点状態からの動作、特異点近傍での滑らかな動作が可能となっている。よって、特異点適合法を適用することで、ユーザーインターフェイスとして操作の容易な遠隔操作が可能となる。

## 5.4 単腕による振動抑制制御

上腕にFig.4のような軌道を描かせた後、振動抑制制御を行った。Fig.8に振動抑制制御を適応しなかった

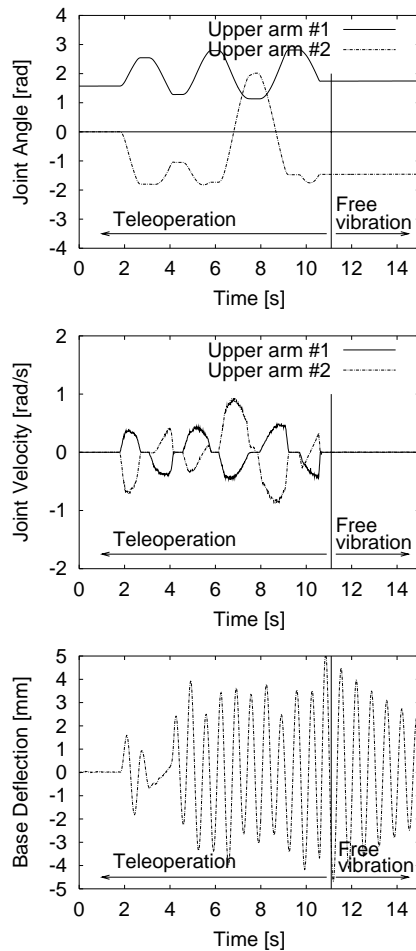


Fig.8 Teleoperation without vibration suppression.

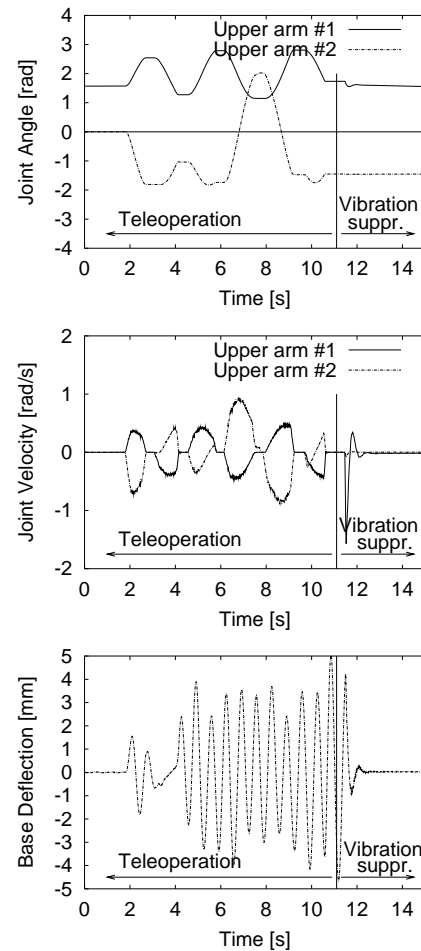


Fig.9 Teleoperation with vibration suppression.

場合, Fig.9 に適応した場合の上腕の関節角速度, ベース部のたわみを示す. 柔軟ベース上であるため, ベース部の振動には長時間の収束時間が必要となる. Fig.8, Fig.9 のベース部のたわみを比較することで振動抑制制御の効果がわかる. 振動抑制制御はベース部のたわみをひずみゲージにより得て, そのたわみに対して打ち消し合う最適な値を求め上腕により打ち消すため, ベース部の振動は瞬時に収束する.

## 6. 結論

FSMS の簡単化モデルである実験装置 TREP に対し, 特異点適合法を適応させた結果以下のような結論が得られた.

- 特異点及び特異点近傍を滑らかに通過するため, FSMS において有効であることが確認できた.
- 無反動軌道を用いた場合, ジョイスティックのようなランダム性の高い信号による遠隔操作においても, 有効な結果が得られた.
- 単腕による無反動軌道において, 無反動制御を行いながら特異点を通過することが確認できた.
- 振動抑制制御を用いることで, ベース部の振動が瞬時に抑制できることが確認できた.

## 7. 今後の予定

今後, 実験装置のマニピュレータに冗長性を持たせ, 柔軟ベース上においてエンドエフェクタの位置制御, 特異点の通過, ベース部の振動抑制, 無反動制御を単腕のみで実現させたいと思っている.

## 参考文献

- [1] 土井忍, 若林靖史, 松枝達夫, 佐藤直樹: “ロボットアーム,” 日本航空宇宙学会誌, vol. 50, no. 576, pp. 7–11, 2002.
- [2] 狼嘉彰, 吉田和哉: “宇宙開発のシナリオと宇宙ロボット,” 日本ロボット学会誌, vol. 14, no. 7, pp. 916–918, 1996.
- [3] 本田弘毅, 野中謙一郎, D. N. Nenchev: “FSMS における双腕マニピュレータの無反動遠隔操作について,” 第 9 回ロボティクスシンポジウム, 2004.
- [4] D. N. Nenchev, T. Hishinuma: “Experimental Teleoperation of a Dual-Arm Manipulator Mounted on a Flexible Structure in Space,” International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, Chengdu, China, pp. 356–361, August 2004.
- [5] 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.
- [6] 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応遠隔操作,” 日本ロボット学会誌, vol. 16, no. 2, pp. 195–204, 1998.