

# 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

武蔵工業大学 本田 弘毅 野中謙一郎 Dragomir N. Nenchev

## On the Reactionless Teleoperation of a Dual-Arm FSMS

Hiroki Honda, Kenichiro Nonaka and Dragomir N. Nenchev  
Musashi Institute of Technology

### ABSTRACT

In our previous research, we have introduced a method for reaction compensation for a dual-arm flexible structure mounted manipulator system (FSMS) to be used in space applications. The method was tested with an experimental FSMS called TREP, along prespecified paths, i.e. in autonomous mode of operation. The aim of this work is to examine the performance of the system under teleoperation. The control system is a real-time Linux based one. The input command is generated via a joystick.

**Key words:** FSMS, Vibration Suppression, Reaction Null Space, Manipulator, Teleoperation

### 1 研究の背景

近年、宇宙空間で用いら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。マニピュレータは宇宙ステーションの組み立てや修理、燃料の補給に加え、危険を伴う宇宙飛行士の船外活動の補佐や代替として幅広く使用されることになる。これらロボットマニピュレータは、ペイロードの各種制限や打ち上げコスト抑制のため、軽量化に重点を置いた上で要求された諸機能を実装する必要がある。この条件を満たすため、広範囲の作業領域を確保しつつ精度の高い作業を行うマニピュレータとして、マクロマニピュレータとその先端にマイクロマニピュレータを取り付けたマクロ・マイクロマニピュレータシステム<sup>\*1</sup>が提案、実用化されている。実用例をFig.1に示す。

このようなシステムでは、軽量化された長大なマクロマニピュレータの剛性の低さが問題となる。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。

この問題の解決策として、反動零空間を利用した無反動制御法やマニピュレータの双腕化による反動補償制御法が提案され効果が確認されている[1]。これらの結果では、あらかじめ与えられた軌道に対する無反動制御を実現している。しかし、ジョイスティック等を用いたランダム性の高い軌道を遠隔操作で実行した場合、遠隔操作でない場合に比べて振動補償が十分に行われない現象が確認されている[2]。そこで本研究では、この問題を解決することを目的として、FSMSの簡単化したプロト

タイプマニピュレータについて、ジョイスティックでマイクロマニピュレータを操作し無反動制御を用いて制振する。双腕マニピュレータにおいて片腕で作業を行い、片腕で振動抑制制御を行うことは作業量の観点からは望ましくないが、アクティブダンパのような別の機器を取り付けることなく必要に応じて振動を抑制できることに利点がある。また、これに関連して操作に伴い生じてしまった振動を打ち消すため、片腕での振動抑制制御の効果についても言及する。

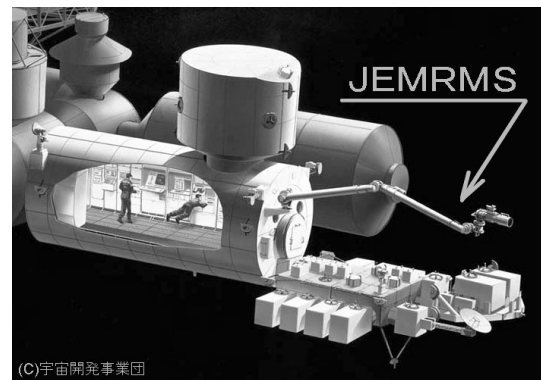


Fig.1: JEM "KIBOU" with JEMRMS(©JAXA)

### 2 運動方程式

柔軟ベース上のマニピュレータにおける運動方程式は、マイクロマニピュレータの式(1)及び柔軟ベースの運動方程式(2)を用いて表現できる。

$$\tau = H_m(\theta, e)\ddot{\theta} + H_{bm}^T(\theta, e)\ddot{e} + C_m(\theta, \dot{\theta}, e, \dot{e}) \quad (1)$$

$$0 = H_{bm}(\theta, e)\ddot{\theta} + H_b(\theta, e)\ddot{e} + C_b(\theta, \dot{\theta}, e, \dot{e}) + K_b e \quad (2)$$

<sup>\*1</sup> 各国により呼称が異なるが、Macro-Micro Manipulator System, 親アーム・子アーム, CANADARM2, Dextre 等いずれも FSMS の問題に帰着できる。

式中で使用した記号の意味は以下の通りとした。

- $\theta \in R^n$  : 関節角ベクトル
- $e \in R^m$  : 柔軟ベース部位置・姿勢ベクトル
- $H_m \in R^{n \times n}$  : マニピュレータ慣性行列
- $H_b \in R^{m \times m}$  : 柔軟ベース部慣性行列
- $H_{bm} \in R^{m \times n}$  : 柔軟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
- $C_b \in R^m$  : 柔軟ベース部遠心力, コリオリ力項
- $K_b \in R^{m \times m}$  : 柔軟ベース部剛性行列
- $\tau \in R^n$  : マニピュレータの関節トルク

ベース部が静止していると仮定する。この場合、式 (1), (2) のベース部の動的な挙動を表す  $\dot{e}$  の項は無視することができる。さらにベース部の変位を示す  $e$ , 慣性行列中の  $e$  は十分に小さいため無視できるので、これら運動方程式は以下の式 (3) のように線形項と非線形項、ばね項にまとめることができる。

$$\begin{pmatrix} \tau \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_m(\theta) & H_{bm}^T(\theta) \\ H_{bm}(\theta) & H_b(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{e} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_m(\theta, \dot{\theta}) \\ C_b(\theta, \dot{\theta}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ e \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 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制御を用いて、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ことができる。

#### 3.1 無反動制御法 [1]

マニピュレータの動作とベースの関係性を評価するため、式 (3) の柔軟マニピュレータの方程式を  $\theta$  と  $e$  を含む項毎に分ける。

$$H_{bm}\ddot{\theta} + C_b = -H_b\ddot{e} - K_b e \quad (4)$$

これより左辺がベース部の変位  $e$  に影響を与えていることがわかる。左辺第二項は  $\dot{H}_{bm}\dot{\theta}$  に書き換えられるのでマニピュレータがベース部に及ぼす反力  $F$  は

$$F = H_{bm}\ddot{\theta} + \dot{H}_{bm}\dot{\theta} \quad (5)$$

となる。さらにこれを時間に関して積分すると次式を得る。

$$L = H_{bm}\dot{\theta} \quad (6)$$

この  $L$  は特に干渉運動量と呼ばれるものである。

ベース部への反動を零にするには式 (5) において  $F = 0$  とする。すなわち、式 (6) で  $L$  を一定にしなければならない。このような  $\ddot{e}$  の一般解は次式で与えられる。

$$\ddot{\theta} = -H_{bm}^+ \dot{H}_{bm}\dot{\theta} + (I - H_{bm}^+ H_{bm})\zeta \quad (7)$$

$$\dot{\theta} = H_{bm}^+ L + (I - H_{bm}^+ H_{bm})\zeta \quad (8)$$

ここで  $H_{bm}^+ \in R^{n \times m}$  は右疑似逆行列を、 $\zeta$  は任意のベクトルを示す。  $(I - H_{bm}^+ H_{bm})$  は  $H_{bm}$  の零空間射影であり、特にこの空間を反動零空間 (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 反動補償制御 [3]

マイクロマニピュレータの動作がベースに及ぼす振動を抑制するため、双腕のマイクロマニピュレータの一方で所定の作業を行い、もう一方でその反動を打ち消す動作を行う双腕協調動作による反動補償制御について考える。

ジョイスティックによって、任意の作業を行わせるマニピュレータを上腕 (upper arm), 反動補償制御を行うマニピュレータを下腕 (lower arm) とする。これを前述の干渉運動量  $L = 0$  を満たすよう設定する。

$$\dot{\theta}_l = -H_{bml}^+ H_{bmu}\dot{\theta}_u + (I - H_{bml}^+ H_{bml})\zeta \quad (9)$$

ところで、式 (9) において第二項は下腕自身の反動を意味するため  $\zeta = 0$  にとると式 (9) は以下ようになる。

$$\dot{\theta}_l = -H_{bml}^+ H_{bmu}\dot{\theta}_u \quad (10)$$

さらに式 (10) を積分することで、下腕の目標となる関節角度を容易に求めることができ、双腕化による反動補償制御が可能となる。

#### 3.3 振動抑制制御 [3, 4]

外乱や自身の動作によって生じてしまった振動を打ち消す振動抑制制御について考える。運動方程式 (2) を変形する。

$$\ddot{\theta} = -H_{bm}^+ H_b \ddot{e} - H_{bm}^+ K_b e - H_{bm}^+ C_b \quad (11)$$

これに計算トルク法を適用し  $u_e$  を制御入力とする非線形フィードバック補償を行う。

$$\ddot{\theta}_e = -H_{bm}^+ H_b u_e - H_{bm}^+ K_b e - H_{bm}^+ C_b \quad (12)$$

$u_e$  として  $\ddot{e}_d$  を与えれば振動を抑制する加速度  $\ddot{\theta}_e$  が得られるが、モデル誤差や外乱を考慮してサーボ補償を加味すると  $u_e$  は

$$u_e = \ddot{e}_d + G_v(\dot{e}_d - \dot{e}) + G_p(e_d - e) \quad (13)$$

式中の  $G_v$  及び  $G_p$  はそれぞれフィードバックゲインを意味し、適当な値を選択する。式 (13) を式 (12) に代入し  $\dot{e}_d = e_d = 0$ ,  $G_p = 0$  とおいた上で、非線形項である  $K_b$ ,  $C_b$  が十分小さいとして無視すると

$$\ddot{\theta}_e = H_{bm}^+ H_b G_v \dot{e}_d \quad (14)$$

となり、これを制御入力とすれば振動抑制制御が実現できる。

## 4 実験装置

### 4.1 実験装置概要

柔軟ベース上双腕マニピュレータシステム TREP は FSMS の簡単化されたモデルである。写真を Fig.2 に示す。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成り立つ。各ジョイントは、ハーモニックドライブシステムズ社製の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央には歪みゲージが取り付けられており、測定された歪みからアーム先端のたわみ量を求めることになる。また、剛体マニピュレータの動作に伴って生じる反力とトルクを測定するため、フレキシブルアームと剛体マニピュレータの接続部分にユニット化された 3 軸力センサ [5] が設置してある。

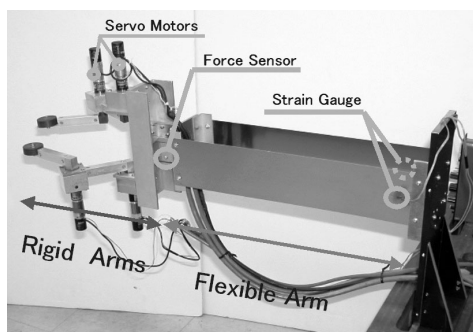


Fig.2: TREP experiment setup

### 4.2 制御システム

本実験装置の計測・制御は CPU が Pentium4 2.4 GHz, メモリを 512 MB 搭載した PC で行う。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 RTLinux (Real Time Linux) を採用した。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 [6]。

TREP の制御システムの構成を Fig.3 に示す。

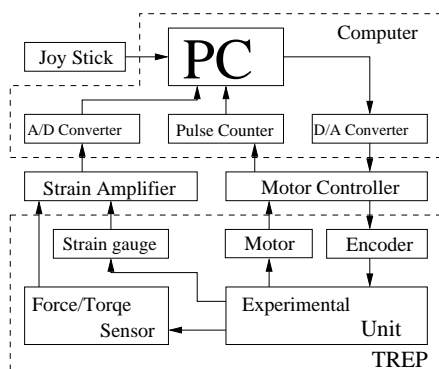


Fig.3: TREP control system

オペレータはジョイスティックを操作し、上腕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し、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。歪みゲージの信号は、歪みゲージアンプにて増幅され A/D 変換ボードを通じて PC に取り込まれる。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 変換ボードを通し、モータドライバに制御信号を出力する。

## 5 TREP のモデル

TREP のマニピュレータモデルを Fig.4 に示す。2 つのマニピュレータは同じ構造を持つため、紙面上部から見て近い方を上腕、遠い方が下腕とする。座標系は、上腕が伸びている図右方向が低剛性方向  $y$ , 下腕が伸びている図上方向を高剛性方向  $x$  としている。また、回転方向に関しては上腕、下腕ともに反時計回りが正である。

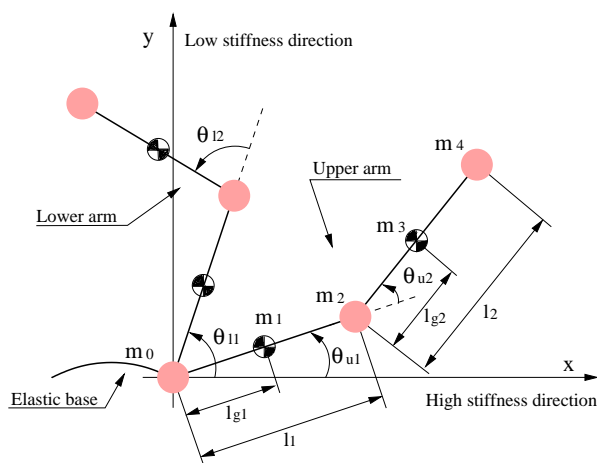


Fig.4: Model of TREP

図中で使用した記号の意味は以下の通りである。

$\theta_{u1}, \theta_{u2}$  : 上腕の関節角度

$\theta_{l1}, \theta_{l2}$  : 下腕の関節角度

$l_1, l_2$  : リンク長さ

$l_{g1}, l_{g2}$  : リンク根本から重心位置までの長さ

$m_0$  : リンク全体質量

$m_1$  : リンク 1 質量

$m_2$  : リンク 1 先端部分質量

$m_3$  : リンク 2 質量

$m_4$  : リンク 2 先端部質量

Fig.4 に示すように、高剛性方向である  $x$  方向に力が加わってもベースは振動しない。そのため、 $y$  方向についてのみ考慮する。

## 6 制御法の TREP への適用

### 6.1 無反動制御法の適用 (双腕動作)

前述の Fig.4 に示したモデルをふまえて、制御方法を適用する。上腕とベース部の干渉を表す慣性行列と下腕とベースの動的干渉を表す慣性行列は以下のようになる。

$$\mathbf{H}_{bmu} = [-PS_{u1} - QS_{u1} \dot{\cdot} - QS_{u12}] \quad (15)$$

$$\mathbf{H}_{bml} = [-PS_{l1} - QS_{l1} \dot{\cdot} - QS_{l12}] \quad (16)$$

式中で利用する記号の意味は以下の通りである。

$$P = m_1 l_{g1} + m_2 l_1 + m_3 l_1 + m_4 l_1$$

$$Q = m_3 l_{g1} + m_4 l_2$$

$$S_{u1} = \sin(\theta_{u1})$$

$$S_{u12} = \sin(\theta_{u1} + \theta_{u2})$$

$$S_{l1} = \sin(\theta_{l1})$$

$$S_{l12} = \sin(\theta_{l1} + \theta_{l2})$$

これを式 (5) に代入し、反力  $F$  が零とすると

$$\mathbf{H}_{bml} \dot{\theta}_l + \mathbf{H}_{bmu} \dot{\theta}_u = 0 \quad (17)$$

となる。ここで、 $\dot{\theta}_u = [\dot{\theta}_{u1}, \dot{\theta}_{u2}]^T$ ,  $\dot{\theta}_l = [\dot{\theta}_{l1}, \dot{\theta}_{l2}]^T$  である。この結果

$$\dot{\theta}_l = -\mathbf{H}_{bml}^+ \mathbf{H}_{bmu} \dot{\theta}_u \quad (18)$$

となり、式 (18) は TREP の上腕における  $y$  方向の反動を補償する下腕の関節角速度を求める式である。

次に、マニピュレータの特異点について考える。 $\mathbf{H}_{bml}^+$  が存在しない場合は特異点であり、次式が零になる場合である。

$$\mathbf{H}_{bml} \mathbf{H}_{bml}^T = P^2 S_{l1}^2 + 2PQ S_{l1} S_{l12} + 2Q^2 S_{l1}^2 \quad (19)$$

これが零になるには、 $\theta_{l2} = n\pi$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) この状態は、マニピュレータを  $x$  軸方向に伸ばしきってしまった場合と、 $l_1$  と  $l_2$  が重なり合った場合である。実験時には、下腕がこの点に到達しないようにする必要がある。

今回の無反動制御実験では、歪みゲージによるフィードバック実験は行っていない。

### 6.2 振動抑制制御法の適用 (片腕動作)

前述の Fig.4 に示したモデルをふまえ制御方法を適用する。上腕のみを考慮し下腕は固定されているものとする。上腕とベース部の干渉を表す慣性行列は式 (15) と同じように扱うことができる。ただし、柔軟ベース部慣性スカラー列となり  $h_b = m_0 + 2 * (m_1 + m_2 + m_3 + m_4)$  で表す。これらを式 (14) に代入する。

$$\dot{\theta}_e = \mathbf{H}_{bmu}^+ h_b G_v e_d \quad (20)$$

$e_d$  はベース部変位を表し、今回の実験ではフィードバックゲイン  $G_v = 0.002$  とした。

## 7 実験結果

### 7.1 双腕による無反動制御

上腕をジョイスティックにより任意に動作させ、下腕で無反動制御を行った。Fig.4 に示す座標系において  $y$  軸方向にマニピュレータをのばした状態を初期姿勢とし、特異点の影響を避けるため  $\theta_{u1}$  を  $1.0 \text{ rad}$ ,  $\theta_{l1}$  を  $-1.0 \text{ rad}$  回転させ、 $\theta_{u2}$  及び  $\theta_{l2}$  を  $\pi \text{ rad}$  回転させたのち固定し  $\theta_{u1}$  と  $\theta_{l1}$  を変化させて実験を行った。

入力した加速度に制限がない場合の結果を Fig.5a, Fig.5b, Fig.5c にそれぞれ示す。

Fig.5a, Fig.5b を比較する。上腕の動作に対して遅延なく反動補償制御が下腕で行われている。Fig.5a では急激な速度変化はないが下腕には大きな速度変化が起こっており、結果的に Fig.5c には大きな振動が観測されている。ジョイスティックのようなデバイスを使用した場合、ユーザによる急激な操作を避けるため、加速度を検出し制限をかけることが望ましいことがわかった。

### 7.2 片腕による振動抑制制御

上腕にジョイスティックにより任意に動作させた後、振動抑制制御を行った。Fig.5 に示す座標系において  $y$  軸方向にマニピュレータをのばした状態を初期姿勢とし、特異点の影響を避けるため  $\theta_{u1}$  を  $-1.0 \text{ rad}$ ,  $\theta_{u2}$  を  $1.0 \text{ rad}$  回転させ、 $\theta_{l1}$  は初期姿勢で固定し、 $\theta_{l2}$  を  $\pi \text{ rad}$  回転させた上で固定し  $\theta_{u1}$  と  $\theta_{u2}$  を変化させて実験を行った。

振動抑制制御を行わない場合の結果を Fig.6a, Fig.6b に、振動抑制制御を行った場合の結果を Fig.7a, Fig.7b にそれぞれ示す。

Fig.7a と Fig.7b を比較する。Fig.7b は  $3.8 \text{ s}$  から振動抑制制御を行わせた。これは Fig.7a より  $3.8 \text{ s}$  以降でベース部の振動とは逆方向にモータ 1, 2 が回転していることから明白である。次に、Fig.6b と Fig.7b を比較する。この結果、Fig.6b に示す振動抑制制御のない場合に比較し、Fig.7b に示す振動抑制制御のある場合では 10% 整定時間が約  $5.1 \text{ s}$  から約  $2.1 \text{ s}$  に短縮されている。

## 8 結論

以上より双腕マニピュレータによる無反動制御を行った結果、ベース部に振動が起らないことが確認されたとともに、振動抑制制御の有効性も確認された。また、ジョイスティックのようなランダム性の高いデータを用いた場合においても、有効な結果が得られることもわかった。

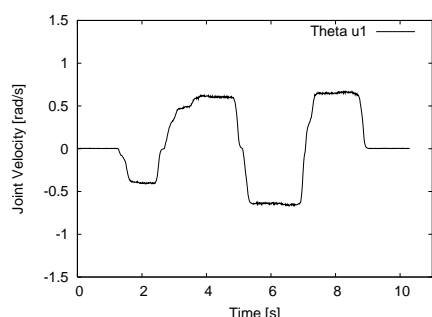


Fig.5a: Upper arm command velocity  
(Dual arm operation)

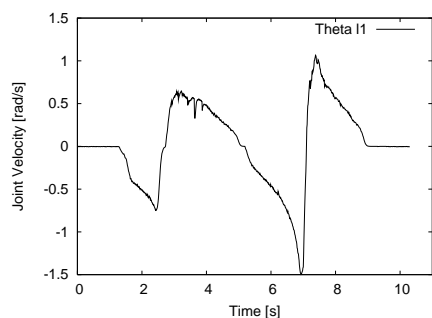


Fig.5b: Lower arm calculated velocity  
(Dual arm operation)

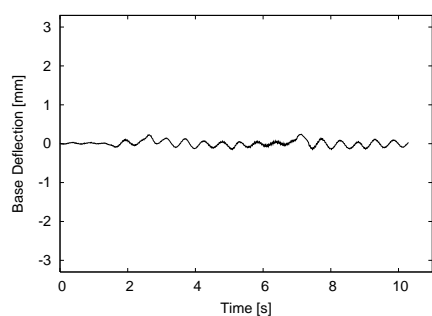


Fig.5c: Base deflection  
(Dual arm operation)

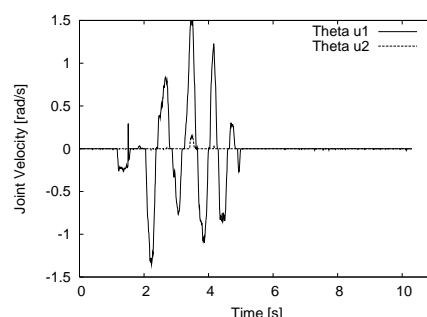


Fig.6a: Upper arm command velocity  
(without vibration suppression)

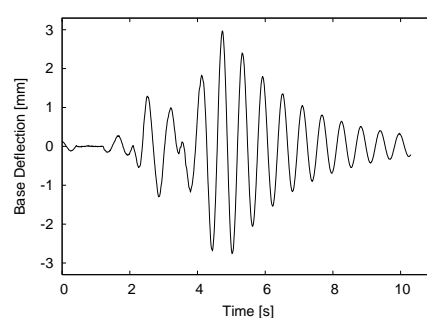


Fig.6b: Base deflection  
(without vibration suppression)

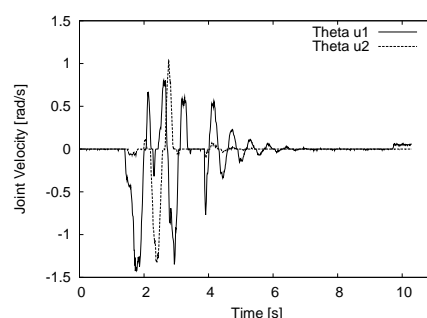


Fig.7a: Upper arm command velocity  
(with vibration suppression)

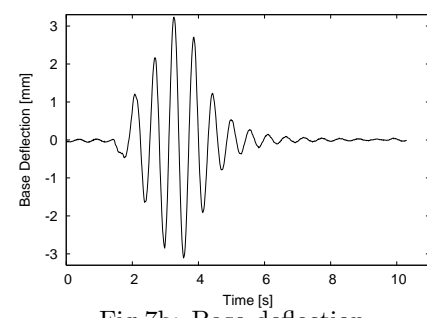


Fig.7b: Base deflection  
(with vibration suppression)

## 参考文献

- [1] Kazuya Yoshida et. al. :“Experiments on the point-to-point operations of a flexible structure mounted manipulator system,” Advanced Robotics, Vol.11, No.4, pp.397 - 411, 1997
- [2] 鷲野誠一郎ら他 2 名:“Application of Reactionless Motion to Teleoperation of a Flexible Base Dual-Arm Manipulator,” 計測自動学会東北支部 第 202 回 研究集会資料, 弘前大学 2003
- [3] Akio Gouo et. al. :“Motion control of dual-arm long-reach manipulators.,” Advanced Robotics, Vol.13, No.6, pp.617 - 632, 2000.
- [4] D.N.Nenchev et. al. :“Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.15, No.6, pp.1011-1023, 1999.

- [5] 阿部幸勇ら他 3 名:“指向性のある力覚センサ用はり形状の FEM による解析,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会資料,2003
- [6] 森友一郎他 3 名:“RTLlinux リアルタイム処理プログラミングハンドブック,” 秀和システム,2000