

宇宙用冗長マクロ・マイクロマニピュレータシステムの高機能マニピュレーション

An Advanced Manipulation for Space Redundant Macro-Micro Manipulator System

吉田和哉* , 渡邊紘充*

Kazuya Yoshida* , Hiromitsu Watanabe*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード : マクロ・マイクロマニピュレータシステム (Macro-micro manipulator system) ,
柔軟ベース (Flexible base), 振動抑制 (Vibration suppression)

反動零空間 (Reaction null-space), 特異点適合法 (Singularity-consistent method)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01 東北大学大学院 工学研究科
航空宇宙工学専攻 吉田・永谷研究室

渡邊紘充 , Tel.: (022)795-6993 , Fax.: (022)795-6993 , E-mail: hiro@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. 緒言

現在, 軌道上で運用されている国際宇宙ステーション (ISS) には, SSRMS (Space Station Remote Manipulator System) と呼ばれるマニピュレータが搭載され, ISS の組立作業の支援を行っている。一方, 2006 年に打ち上げ予定の日本実験モジュール (JEM : Japanese Experimental Module) には, 親子型のマニピュレータシステム JEMRMS (JEM Remote Manipulator System) が搭載される (Fig.1)。これらのマニピュレータシステムは, ISS の組立, 保全作業や各種実験の支援を行い, クルーの船外作業の負担軽減に役立つと期待されている。

現在想定されている JEMRMS の制御方式は, 大別すると, 親アームによる粗位置決め制御, 子アームによる精位置決め制御の2つのモードから

構成される。各モードにおいては一方のロボットアームのみが制御され, 他方はロックされている。特に, 子アームのみによる精位置決め制御では, 親アーム関節部が低剛性であることから, 根元部の親アームは柔軟ベースとして作用する。したがって, 子アームの動作反力によって, 親アームが振動してしまい, 作業効率が低下することが懸念される。そこで, マニピュレータの振動を考慮した制御が求められる。

これらの問題に対して, 筆者らは, 仮に子アームに冗長性がある場合, その子アームの動作反力によって生じた振動を抑制しつつ, 任意の作業を行うことを提案してきた¹⁾。

本研究では, マクロ・マイクロマニピュレータのハイブリッドシミュレータを構築し, 同シミュレータを用いて, 柔軟ベースマニピュレータ制御

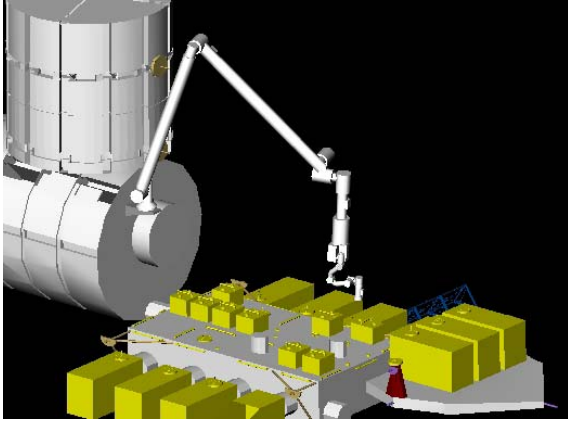


Fig. 1 Japanese experimental module (JEM)

時に発生する振動問題や特異点問題に対して、振動抑制制御や特異点適合法を用い、その有用性を検証する。

2. マクロ・マイクロシステムのモデリングおよび制御法

マクロ・マイクロマニピュレータシステムのモデリングについて述べる。マクロアーム先端を柔軟ベースとみなし、Fig.2のようにモデル化する。

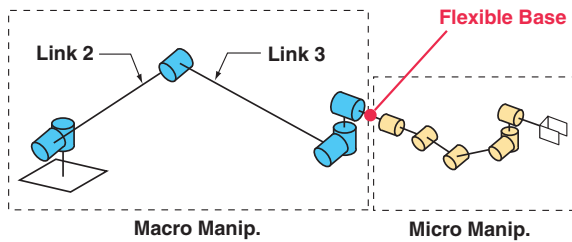


Fig. 2 Model of the macro-micro manipulator system

柔軟ベース部の速度 \dot{x}_b 、マイクロアームの関節速度 $\dot{\phi}$ を一般化座標とすると、一般に、マクロ・マイクロマニピュレータシステムの運動方程式は以下のように表すことができる。¹⁾

$H_b \in R^{6 \times 6}$: 柔軟ベース部の慣性行列

$H_m \in R^{n \times n}$: マイクロ部の慣性行列

$H_{bm} \in R^{6 \times n}$: 柔軟ベース部とマイクロ部の干渉慣性行列

$$\begin{bmatrix} H_b & H_{bm} \\ H_{bm}^T & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b \Delta x_b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_b^T \\ J_m^T \end{bmatrix} F_h \quad (1)$$

$c_b \in R^6$: 柔軟ベース部に関する速度非線形項

$c_m \in R^6$: マイクロ部に関する速度非線形項

$F_b \in R^6$: 柔軟ベース部に作用する外力・モーメント

$F_h \in R^6$: マイクロ部先端に作用する外力・モーメント

$\tau \in R^n$: マイクロ部の関節に作用する内力・モーメント

Eq.(1)の上部はマクロアームの運動、下部はマイクロアームの運動をそれぞれ表している。

本研究では、柔軟ベース(マクロ部)をFig.3に示すようにインピーダンスモデルを用いてモデル化する。

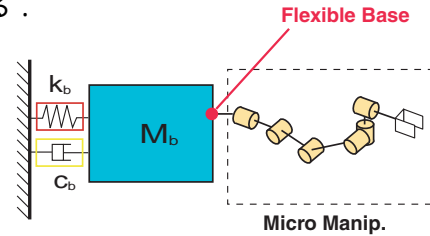


Fig. 3 Mechanical model of the macro-micro manipulator system

2.1 マクロ部のモデリングおよび制御法

Fig.4に構築するマクロ・マイクロシステムハイブリッドシミュレータの構成図を示す。

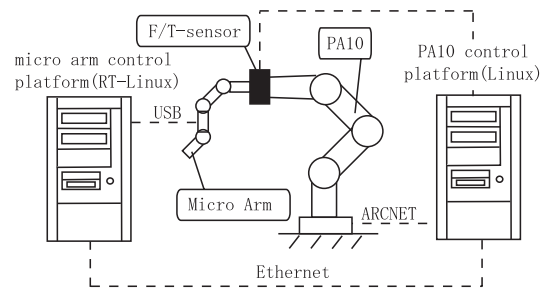


Fig. 4 System configuration

ハイブリッドシミュレーションにおいては、インピーダンス制御を用いることにより、柔軟ベ

スの振動を模擬する．柔軟ベースの運動方程式を Eq.(2)に示す．

$$M_b \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b + k_b \Delta x_b = f_b \quad (2)$$

M_b : 柔軟ベース部の仮想質量

k_b : 柔軟ベース部のバネ定数

c_b : 柔軟ベース部の粘性減衰係数

$\ddot{x}_b, \dot{x}_b, \Delta x_b$: 柔軟ベース部の加速度, 速度, 位置

f_b : 柔軟ベース部にかかる動作反力

2.2 柔軟ベースのインピーダンス制御

柔軟ベースのインピーダンス制御のブロック線図を Fig.5 に示す．

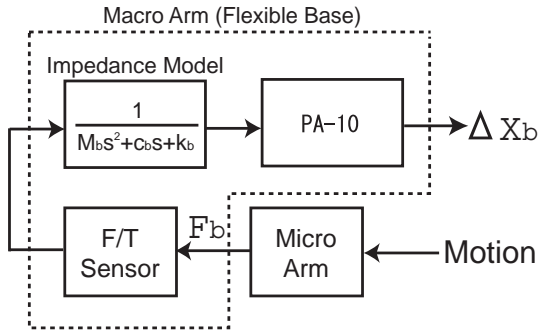


Fig. 5 Block diagram of the impedance control

マイクロアームの動作反力による柔軟ベースの振動を模擬するハイブリッドシミュレーションを行うためには, F/T センサによって計測された力データ f_b より振動モデルの運動方程式 Eq.(2)を用いて加速度 \ddot{x}_b を求め, この運動を加速度制御もしくは計算トルク法などにより実現しなければならない. これに対し, 本研究では簡便で安定性の高い方法として, 2次フィルタを用いた位置制御によって柔軟ベースのインピーダンス特性を模擬する.

入力を f_b , 出力を Δx_b として Eq.(3) を伝達関数として書き直すと次式を得る.

$$G(s) = \frac{\Delta X_b}{F_b} = \frac{1}{M_b s^2 + c_b s + k_b} \quad (3)$$

この伝達関数は2次のローパスフィルタを表しており, 入力 f_b に対して Eq.(3) で記述されるローパ

スフィルタを通して得られる Δx_b について位置制御を行うことにより, 与えられたインピーダンス特性を模擬することができる.

2.3 振動抑制制御

Eq.(1)のマイクロ部の運動方程式をマイクロアームの関節速度 $\dot{\phi}$ について解くと, 振動抑制制御の基礎式は以下のようなになる¹⁾.

$$\dot{\phi} = G H_{bm}^+ \Delta x_b + (E - H_{bm}^+ H_{bm}) \zeta \quad (4)$$

ここで, G は制御ゲイン行列, $(\cdot)^+$ は擬似逆行列, ζ は任意の n 次元ベクトルである. $(E - H_{bm}^+ H_{bm})$ は慣性行列 H_{bm} の零空間射影であり, この空間を反動零空間 (reaction null-space) と呼ぶ. Eq.(4)において, 右辺の第1項は, マイクロアームのマクロアームへの干渉が最大になる動作を与える解である. 一方, 第2項は, マクロアームとマイクロアームの非干渉な動作を与える解である. したがって, 第1項をうまく利用することによって, マクロアームの振動を抑制する制御を行うことが可能である. これを「振動抑制制御」と呼ぶ. 一方, 第2項を用いると, マクロアームの振動を励起させないように, マイクロアームを動作させることができる. これを「無反動制御」という.

さらに, アームの冗長自由度に着目して ζ の任意性を利用することによって, 振動抑制制御を優先的に遂行しながら, それと同時に, 任意の作業を実施することが可能となる. ここで, 振動抑制制御と無反動制御による手先の位置制御を同時に行う任意ベクトル ζ は Eq.(5) のように決定される. ここで, J はヤコビ行列, \dot{x}_e^d は指令手先速度を表している. Fig.6 に振動抑制制御のブロック線図を示す.

$$\zeta = \{J(E - H_{bm}^+ H_{bm})\}^+ (\dot{x}_e^d - JGH_{bm}^+ \Delta x_b) \quad (5)$$

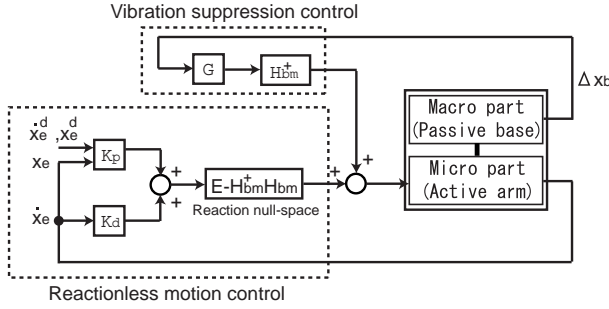


Fig. 6 Block diagram of vibration suppression control

2.4 重み付振動抑制制御

Eq.(4)を用いた振動抑制制御では，アームの冗長性を用いることで，振動抑制制御を第一サブタスクとし，無反動制御を第二サブタスクとして，これらを同時に実行するものである．しかし，過大な振動が生じた場合，第二サブタスクの無反動制御の制御量が，振動抑制制御の制御量より大きくなり，制御不可能な状態に陥るという問題がある．そこで，Eq.(5)の ζ にEq.(6)のような重み関数を設ける．これにより振動が過大な場合は，第一サブタスクのみをこなし，振動が小さくなるにつれて，徐々に第一サブタスクと第二サブタスクを同時にこなすようにする．

$$\zeta = \{J(E - H_{bm}^+ H_{bm})\}^+ \cdot \left(1 - \frac{A_b}{K_a}\right) (\dot{x}_e^d - JGH_{bm}^+ \Delta x_b) \quad (6)$$

ここで， A_b は柔軟ベースの振動の振幅， K_a は閾値で正のスカラー値とする．

2.5 特異点適合法

無反動制御を用いて柔軟ベースマニピュレータを操作する際，無反動空間内で作業を行うことが重要である．しかし，一般に無反動空間は非常に狭い．しかも，無反動空間内にマニピュレータの特異点が存在する場合は，特異点によって作業可能な無反動空間はより一層限定される．そこで，

特異点およびその近傍において妻木，ネンチェフらによって提案された特異点適合法²⁾³⁾を用いることにより，特異点およびその近傍での動作を安定に行い，無反動空間の作業領域を特異点によって狭めることなく作業を行うことができることをシミュレーションによって検証する．

特異点適合法には，拡張ヤコビ行列の零空間ベクトルを用いる方法²⁾とヤコビ行列の余因子行列を用いる方法³⁾がある．この両者の方法は等価であるため，ここでは，計算量が少なくすむ後者の方法を採用する．

特異点適合法をマクロ・マイクロマニピュレータに適用すると基礎式はEq.(8)のようになる．ここで，各パラメータは以下の通りである．特異点およびその近傍においては，制御則をEq.(7)からEq.(8)へ切り替える．

$$\dot{\phi} = GH_{bm}^+ \Delta x_b + (E - H_{bm}^+ H_{bm}) \zeta \quad (\det(J) > 0.1) \quad (7)$$

$$\dot{\phi} = \sigma b \operatorname{adj}(H_{bm}^T H_{bm}) u_r \quad (\det(J) < 0.1) \quad (8)$$

σ : 正負を表す単位量

b : 大きさを表す正のスカラー値

u_r : 手先指令速度単位方向ベクトル

特異点においては， $\det J$ が0になるため関節角速度を求めることはできない．しかし，Eq.(8)において $\operatorname{adj}(H_{bm}^T H_{bm}) u_r$ は，手先速度方向を表している．これは， $(\det J)^{-1}$ 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， b の大きさを適当に設定することにより，特異点やその近傍においても過大な関節角速度を生じることなく，手先速度方向を正確に追従することが可能となる．

2.6 無反動空間における特異姿勢と可操作度

無反動空間における特異姿勢と可操作度について述べる．無反動空間における特異姿勢の一例と

して2リンク目と3リンク目が一直線上にならぶ Fig.7のような姿勢が挙げられる．このとき，無反動空間における可操作度 w はEq.(9)のように定義される．後述する，実験の初期姿勢(Fig.9)と比較すると，可操作度が特異姿勢では，著しく縮退している．

$$w = \sqrt{\det(\mathbf{JP}_{rns})(\mathbf{JP}_{rns})^T} \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{rns} = \mathbf{E} - \mathbf{H}_{bm}^+ \mathbf{H}_{bm}$$

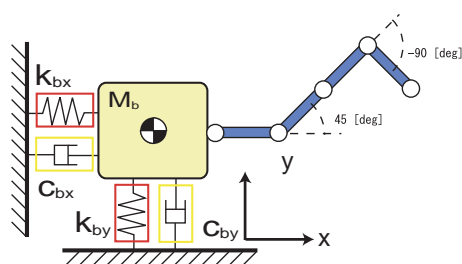


Fig. 7 A example of the singular configuration in the reaction null-space

Table 1 Experimental condition of the macro part

	Manipulability
Initial configuration (Fig.9)	0.49
Singular configuration (Fig.7)	0.6×10^{-6}

3. マクロ・マイクロシステムハイブリッドシミュレータ

構築したマクロ・マイクロシステムハイブリッドシミュレータについて述べる．Fig.8とFig.4に実験システムの外観図および，全体の構成図を示す．

Fig.8 に示すように，マクロアームには 三菱重工製7自由度汎用マニピュレータ PA10，マイクロアームには本研究室で開発したモジュラー型アームを用いている⁴⁾．PA10 とマイクロアームの間には F/T センサを取り付けており，マイクロアーム

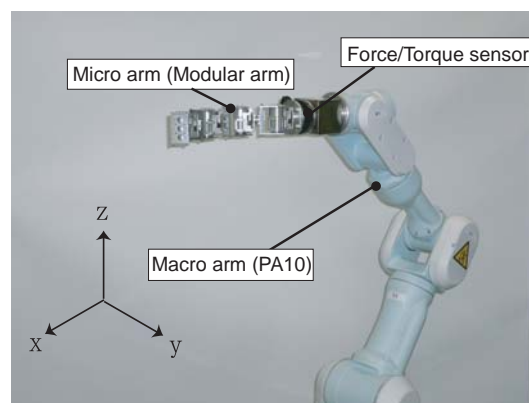


Fig. 8 Overview of the macro-micro manipulator system

によって生じた反力を計測する．マクロアームの制御，マイクロアームの制御には，それぞれLinux, RT-Linuxをプラットフォームとして用いている．PA10 によって模擬された振動，つまり，マクロアーム先端の変位はソケット通信を介して，マイクロアーム制御用プラットフォームへ送られる．そして，マクロアームの振動情報より，それを抑制する関節角度情報を計算し，マイクロアームを動作させる．

4. 実験およびシミュレーション

構築したマクロ・マイクロシステムハイブリッドシミュレータを用いた実験およびシミュレーションについて述べる．

4.1 実験条件

Fig.9 に実験モデルを示す．マイクロアームは，並進 x - y それぞれの方向に1自由度ずつ冗長性を有するように，平面4自由度マニピュレータとする．本実験は重力の影響を受けないようにするために， x - y の2平面のみに運動を制限している．実験に用いたマクロ部のインピーダンス特性と，マイクロアームの1関節あたりの諸言をTable2, Table3に示す．

実験は、実験開始から約10, 30 [s]後にy方向より外乱を与えて行った(Fig.9の赤矢印参照)。マイクロアーム手先の目標位置は初期位置とする。

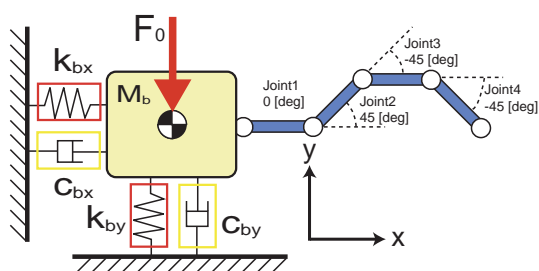


Fig. 9 Experimental model of the macro-micro manipulator system (Joint angles are initial state)

Table 2 Experimental condition of the macro part

Mass M_b	0.1 [kg]
Stiffness k_b	0.9 [N/m]
Damping c_b	0.001 [Ns/m]

Table 3 Specification of the micro arm (1 link)

Mass	0.25 [kg]
Length	0.078 [m]

また、実験は、非制御時、振動抑制制御のみを行った場合、振動抑制制御+無反動制御による手先の位置制御を行った場合、振動抑制制御+無反動制御による手先の位置制御+特異点適合法を行った場合の4ケースについて行った。

4.2 実験結果

各ケースの実験結果について述べる。

4.2.1 非制御時

Fig.10に非制御時の柔軟ベースの振動を示す。網掛けされた部分は要求精度の ± 1 [cm]を表している。外乱により柔軟ベースが振動しそのために、手先の位置決めにも悪影響を与えている。

4.2.2 振動抑制制御

Fig.11, Fig.13に振動抑制制御のみを行った場合の柔軟ベースの振動と、手先の軌道を示す。振動抑制制御により、柔軟ベースの振動は速やかに抑制されているが、振動抑制制御を行ったことにより、手先の軌道が目標位置からずれてしまった。

4.2.3 振動抑制制御+無反動制御による位置制御

Fig.12, Fig.13に振動抑制制御と無反動制御による位置制御を行った場合の柔軟ベースの振動と、手先の軌道を示す。柔軟ベースの振動を抑制しつつ、同時に手先の位置も終始、要求精度内にとどめることができた。

4.2.4 振動抑制制御+無反動制御による位置制御+特異点適合法

Fig.14 ~ Fig.17に振動抑制制御と無反動制御および特異点適合法を用いた場合の柔軟ベースの振動、手先の軌道、関節角度のプロファイル、関節角速度のプロファイルを示す。Fig.14とFig.15より、柔軟ベースの振動を抑制しつつ、手先の位置決めが行えていることがわかる。しかし、Fig.16を見ると、10 [s]付近で、第3関節が0 [deg]となり、Fig.7のような特異姿勢になっているが、柔軟ベースに対して過大な振動や、過大な関節角速度を発生することなく、安定して制御がおこなえている。

4.3 重み付振動抑制制御のシミュレーション

重み付振動抑制制御のシミュレーションについて述べる。シミュレーションに用いた各パラメータは、Table2, Table3に示す値と同様のものを用いた。初めに、初期外乱として、実験と同様の方向より、10 [Ns]のインパルス入力を加え、その後10 [s]後より制御を開始した。

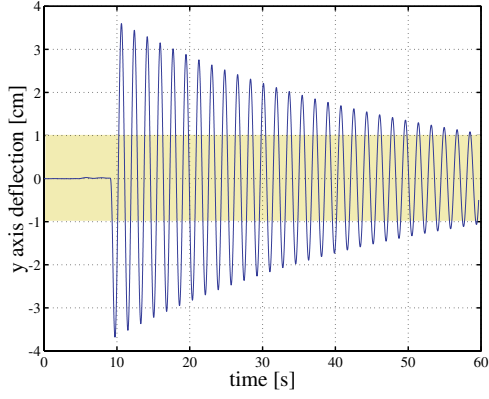


Fig. 10 Motion profile of the flexible base

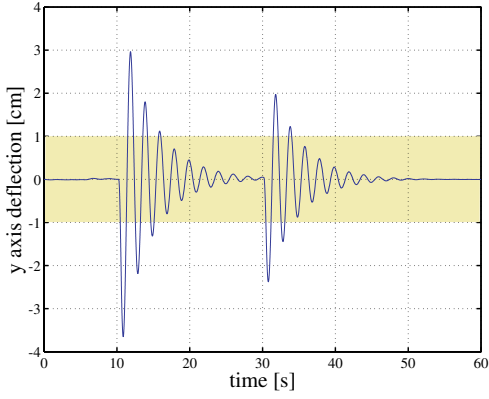


Fig. 11 Motion profile of the flexible base with vibration suppression

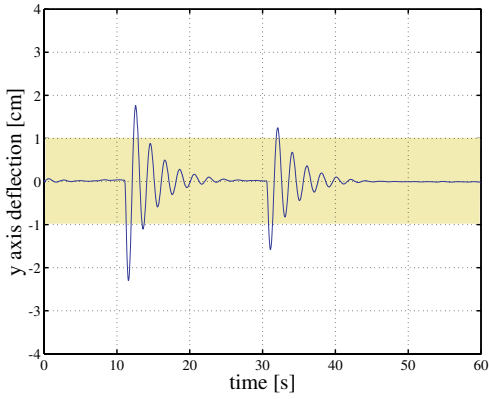


Fig. 12 Motion profile of the flexible base with vibration suppression and reactionless endtip position control

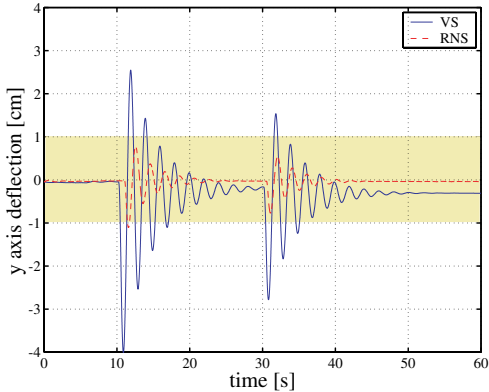


Fig. 13 Motion profile of the endtip with vibration suppression and reactionless endtip position control

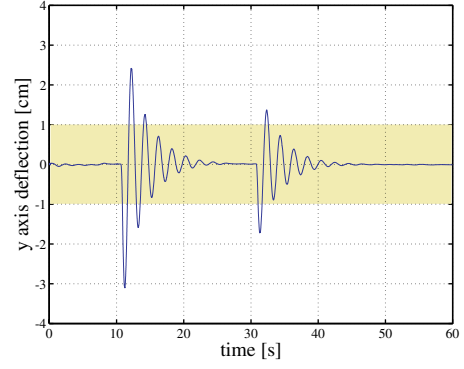


Fig. 14 Motion profile of the flexible base with vibration suppression, reactionless endtip position control and singularity-consistent method

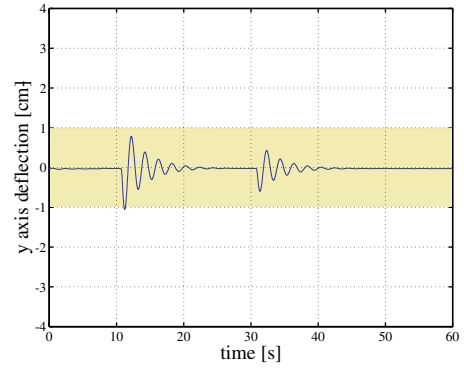


Fig. 15 Motion profile of the endtip with vibration suppression, reactionless endtip position control and singularity-consistent method

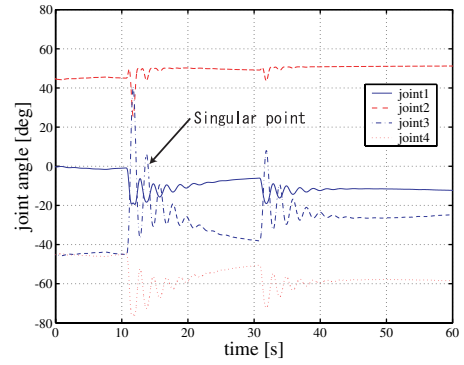


Fig. 16 Motion profile of joint angles with vibration suppression, reactionless endtip position control and singularity-consistent method

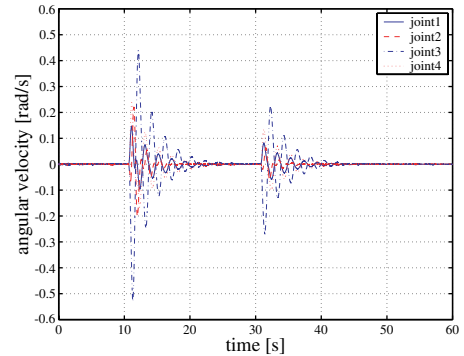


Fig. 17 Motion profile of angular velocities with vibration suppression, reactionless endtip position control and singularity-consistent method

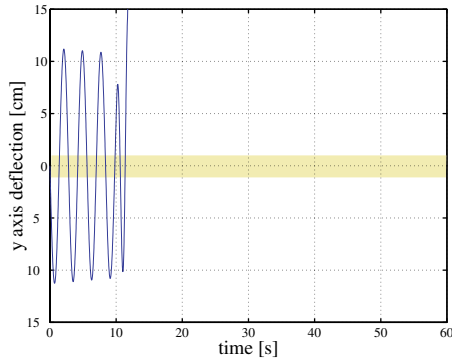


Fig. 18 Motion profile of the endtip with vibration suppression and reactionless endtip position control

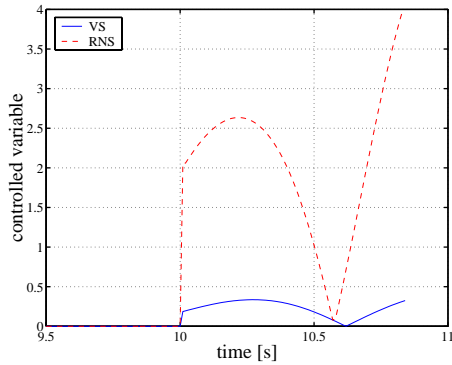


Fig. 19 Profile of controlled variables of the micro arm with vibration suppression and reactionless endtip position control

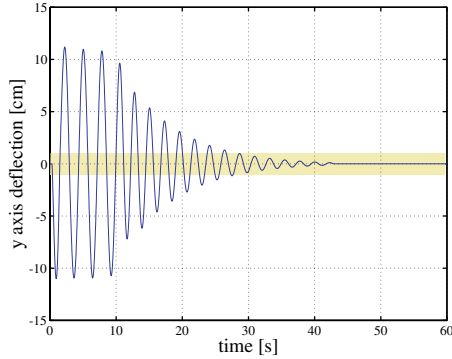


Fig. 20 Motion profile of the flexible base with weighted vibration suppression and reactionless endtip position control

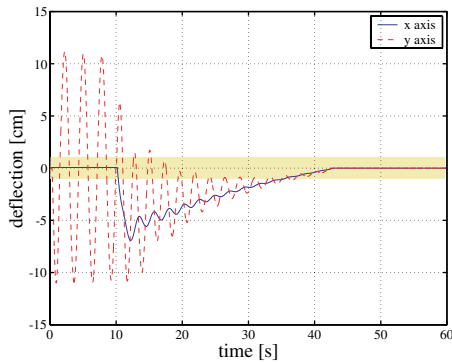


Fig. 21 Motion profile of the endtip with weighted vibration suppression and reactionless endtip position control

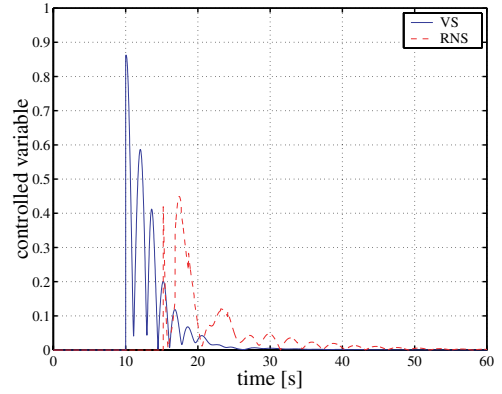


Fig. 22 Profile of controlled variables of the micro arm with weighted vibration suppression and reactionless endtip position control

4.3.1 シミュレーション結果

シミュレーション結果をFig.18～Fig.22に示す．Fig.18, Fig.19は, Eq.(5)に基づく振動抑制制御を行った場合の柔軟ベースの振動と, 制御量のプロファイルを表している．振動が要求精度の10倍の10 [cm]と過大なため, 制御開始時から振動抑制制御の制御量に比べて, 無反動制御の制御量が増大し, 制御不能に陥っている．

一方, Fig.20～Fig.22は, 重み付振動抑制制御を行った場合の柔軟ベースの振動と, 手先の軌道, 制御量のプロファイルを表している．任意ベクトル ζ に重み関数を加えたことにより, 制御開始時の振動が過大な場合は, 無反動制御の制御量は強制的に0となり, 振動抑制制御が安定しておこなわれている．そして, 振動が収まるにつれて, 振動抑制制御と無反動制御による手先の位置決めが同時に行われ, 柔軟ベースの振動が収束し, 手先の軌道も目標位置へ収束している．

5. 結言

本稿では, 宇宙用柔軟ベースマニピュレータの振動問題に対して, ハイブリッドシミュレータを用いた実験的検討について述べた．三菱重工製7自由度汎用マニピュレータPA10とモジュラーアー

ムを用いて，宇宙用柔軟ベースマニピュレータのハイブリッドシミュレータを構築した．同シミュレータを用いて，振動抑制制御，無反動制御の有用性を実験的に検証した．

また，無反動制御時の特異点問題に対して，特異点適合法を用いて特異点を回避することについて述べた．特異点によって無反動空間を限定されることなく最大限に活用することが可能となった．

さらに，シミュレーションにより重み付振動抑制制御の有用性を検証した．これにより，振動が過大な場合においても安定して振動抑制制御がおこなえるようになった．

参考文献

- 1) D.N.Nenchev, K.Yoshida, P.Vichitkulsawat, M.Uchiyama, “Reaction Null-Space Control of Flexible Structure Mounted Manipulator Systems”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.15, no.6, December 1999.
- 2) D.N.Nenchev, Y.Tsumaki, “Motion Analysis of a Kinematically Redundant Seven-DOF Manipulator Under the Singularity-Consistent Method”, Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2760-2765, September, 14-19, 2003.
- 3) 妻木勇一, 小寺真司, D.N.ネンチェフ, 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.
- 4) 吉田和哉, 渡邊紘充, 安孫子聡子, 佐藤洋一郎, “宇宙ステーション搭載型マニピュレータのハイブリッドシミュレーションと冗長性を用いた振動抑制制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05講演論文集, 1P1-S-054, 2005.