

<本文>

# 1 研究の概要

## 1.1 研究目的・意義

本研究では、軌道上におけるロボットアームの操作性能を向上させ「複雑な作業を簡単な操作で」「高速に動かしても反動は小さく」「質量の大きい物も小さいものも同じ操作性で」作業が行えることを大きな目標とし、特に微小重力環境における振動および反動のダイナミクスに着目し、またシステムの冗長性をうまく利用した高機能マニピュレーションの方式を具体的に明らかにすることを目的とする。ここで考察する制御方式は運動方程式や運動量関係式をベースにした力学的に高度な概念を使用するが、操縦という観点からは、既存の2×3型(THC3自由度/RHC3自由度)のオペレータインターフェースを前提とすることにより宇宙ステーションクルー等の操縦者にとって、直感的に使いやすく作業効率の高いシステムを構築することを目的とする。

申請者は、平成11年9月にETS-VIIの追加公募ロボット共同実験の機会を得て、非常に貴重なデータを得ることができたが、これは、これまでに学界にて議論されてきた学術的なコンセプトが、実際の宇宙ロボットシステムの挙動において真であり、またその作業性の向上に実際に有効であることが示されたという点において特に意義深い。申請者が提案し実験を実施した無反動マニピュレーションやその他の制御方式は、それまでの「運用」や「実験」において用いられていた制御方式よりも、ある特定の目的に対しては高いパフォーマンスを発揮することが、実際に示された。

国際宇宙ステーションにおける各国のロボットアームをはじめとして、今後様々な軌道上作業用ロボットシステムが開発されてゆくことになるであろうが、安全確実の名のもとに既存の制御手法に依存した運用を行うのではなく、その性能を最大限に発揮する新しい制御手法を開発しチャレンジしてゆくことにより、ロボットシステムのパフォーマンスは大きく改善しうることを、この事実は物語っている。

このような観点からわが国のJEMRMSを見つめ直してみるならば、それは親子あわせて12自由度をもつ非常に先進的な多自由度冗長システムであり、ロボット工学の研究間では「マクロ-マイクロ・マニピュレータシステム」というキーワードで特徴づけられる、たいへん優れた機構構成を有している。

一般にマクロ-マイクロシステムは、(1)位置決め精度や応答速度は高くないが、広い作業領域を確保できるというマクロ部の特性と、(2)精細かつ応答の早い位置決めおよび力制御が可能なマイクロ部の特性を足しあわせて、システム全体として高い操作性を発揮することができる点が特徴である。マクロ-マイクロシステムは、それにふさわしい制御を行うことにより高い能力を発揮し、ユーザからの高度な要求にも答えることができ、オペレータの操作性についても様々な可能性を含んでいる。また、無反動性、特異点解析や障害物回避を総合的に含めた冗長マニピュレータの操縦性の解析は、マンマシンインターフェースの観点からも学術的に重要な研究分野であり、その成果がロボット技術全般に与える意義も大きい。

本研究では、JEMRMSを具体的な研究ターゲットとして、JEMRMSの力学特性を模擬するグラフィクスシミュレータを構築し、軌道上で予想される挙動を明らかにした上で、マクロ-マイクロシステムとしての性能を十分に発揮するために必要な制御法を明らかにする。長さが10mにもおよぶ親アームは、関節剛性により振動が生じやすいことをまず明らかにする。振動を抑える制御を行うにあたって、親アーム6自由度、子アームを6自由度を切り分け独立に制御するのでは、マクロ-マイクロシステムとしての性能を十分に発揮することはできない。そこで、子アームと親アームの一部を協調的に制御することを提案する。次いで、協調制御によってハンドの位置決めとベース(親アーム)の振動抑制を両立させる制御法を提案し、その有効性を実機のダイナミクス特性を模擬したシミュレーションにより検証する。

## 1.2 研究計画

本研究では、JEMRMS を具体的な研究ターゲットとし、まず JEMRMS の力学特性を模擬するグラフィックスシミュレータを構築する。

シミュレーションのための数値モデルの構築にあたっては、JEMRMS 開発チームよりフライトモデルの地上試験結果の提供を受け、特に動作中の振動源について詳しくモデル化を行う。また、リアルタイムのグラフィックス表示、および準リアルタイムの動力学計算を実現し、THC3 自由度 / RHC3 自由度のオペレータインターフェースを模擬し、クルーによる JEMRMS の操作の様子をかなりの程度模擬できる環境を構築する。

以上のシミュレーション解析により、親子の協調を考えないノミナルな制御モードでは、動作時のダイナミックな反動が親アームの振動を励起する様子を明らかにし、その振幅を典型的なケースについて具体的に評価する。

次に、親子協調による振動低減および振動抑制の方策を明らかにし、その有効性をシミュレーションにより定量的に評価する。また、これらの制御を行う際に、特に特異点との遭遇などの点において、操縦者にわかりやすく提示する方法についても検討を加える。

最後に、ロボットアームがハンドリングする対象物の慣性特性が未知であるか、あるいは慣性特性のモデルに誤差がある場合の挙動についても評価し、誤差に対するロバスト性の評価、誤差情報を用いて慣性特性を推定する方法についても見通しを明らかにする。

## 1.3 微小重力実験の概要

該当せず。

## 1.4 研究計画の変更

該当せず

## 1.5 研究体制

東北大学 大学院工学研究科教授 吉田 和哉 (ヨシダ カズヤ) (研究代表者)  
研究の全てを担当

## 2 本研究で得られた成果

### 2.1 研究計画の達成度

研究計画の 90%以上を達成できたと考える。

### 2.2 研究の成果

#### 2.2.1 JEMRMS の概要

JEMRMS は全長約 10 m, 6 自由度の親アーム (Main Arm) と, 全長約 2 m, 6 自由度の子アーム (Small Fine Arm) の大小 2 つのロボットアームが直列に連結されたマニピュレータシステムである。図 1 に JEMRMS の外観図を示す。また, JEMRMS の主要諸元を表 1 に示す。

これら親アームと子アームは, それぞれ独立に与圧室内にいるクルー (宇宙ステーション搭乗員) によって, ジョイスティックを用いてマニュアル操縦される。図 2 に操縦に使用されるジョイスティックを示す。ロボットを操縦する際, クルーは左手で THC (Translational Hand Controller) を握り, 手先の並進方向の速度を指令する。同時に右手では RHC (Rotational Hand Controller) を握り, 手先の回転方向の速度を指令する。

現在計画されている制御方式は, 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 つのモードに大別される。各々のモードにおいては, 親子いずれか一方のみが制御され, 他方はサーボロックされる。このとき, 粗位置決め制御では, 長尺な親アームが位置決め後も振動し, 静定までの待ち時間を必要とすることが予想される。また, 精位置決め制御では, 子アームの動作反動によって, 親アームが振動してしまうことが懸念される。これらの振動は作業効率の低下をもたらす。

表 1: JEMRMS の主要諸元

	Main Arm	Small Fine Arm
DOF	6	6
total length	10 m	2.2 m
total mass	780 kg	190 kg
P/L handling capability		
mass	7,000 kg	300 kg
inertia	20,000 kg m <sup>2</sup>	30 kg m <sup>2</sup>
dimension	4.5 m $\phi$ × 6 m	0.8 m $\phi$ × 0.6 m
position	± 50 mm	± 10 mm
accuracy	± 1.0 deg	± 1.0 deg
tip velocity	60 mm/s	50 mm/s
force capability		
force	≥ 30 N	≥ 30 N
bending torque	≥ 60 Nm	≥ 4.5 Nm
torsion	≥ 90 Nm	≥ 6 Nm

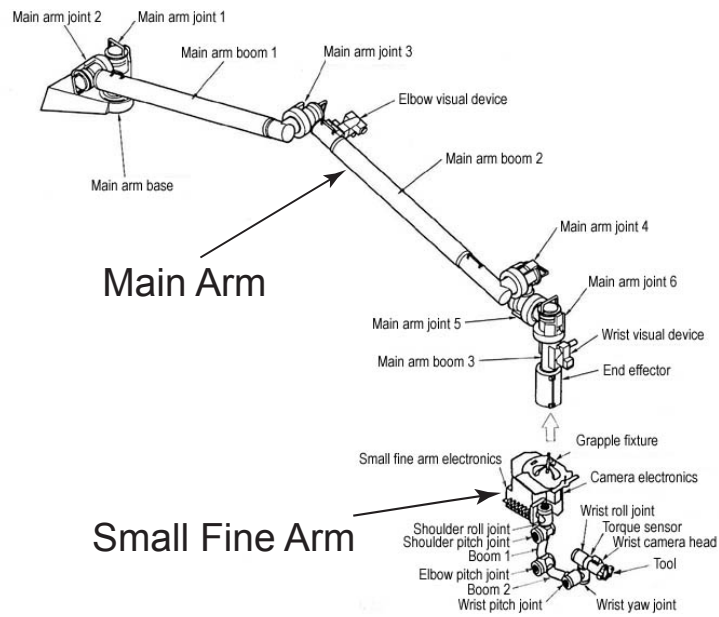


図 1: JEMRMS の構成

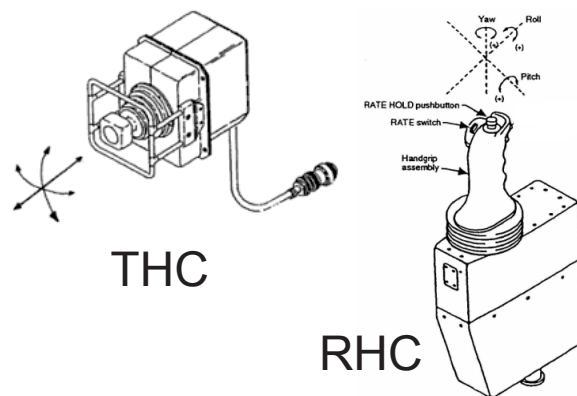


図 2: 並進用ハンドコントローラ (THC, 左) と回転用ハンドコントローラ (RHC, 右)

本研究では、サーボロックされた親アームを柔軟なベースとみなし、その振動を励起しない、あるいはその振動を速やかに収束させる制御法を検討する。ロボット工学の分野では、マニピュレータの振動抑制制御の研究がいくつか報告されている [1]~[3]。ここでは、これらの研究を発展させ、宇宙ステーション搭載マニピュレータの制御という現実的な制約のもとで、効果を発揮する制御方式を考える。JEMRMS は、6 自由度の親アームの先端に、6 自由度の子アームが連結されるきわめてユニークな機構となっている。この機構的特徴を生かすならば、振動を抑制しつつ対象物のハンドリングなどのタスクを達成することが可能であると考えられる。

### 2.2.2 JEMRMS のダイナミクスモデルおよび制御法

ここでは、まず一般論として、柔軟なベースの先端に能動関節をもつロボットアームが取り付けられているシステムについて基礎方程式を導出し、次いでそれを JEMRMS に適用して制御法を導出する。一般に、フレキシブルなベースを持つマニピュレータシステムは、以下の基礎方程式で示される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_b & \mathbf{H}_{bm} \\ \mathbf{H}_{bm}^T & \mathbf{H}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_b \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b \Delta \mathbf{x}_b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b \\ \mathbf{c}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}_b \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_b^T \\ \mathbf{J}_m^T \end{bmatrix} \mathcal{F}_h \quad (1)$$

ここで、受動ベース部先端の並進速度、姿勢角速度  $\dot{\mathbf{x}}_b = (\mathbf{v}_b^T, \boldsymbol{\omega}_b^T)^T$ 、およびロボット部の関節動作速度  $\dot{\phi}$  を、システムの状態を記述する一般化座標とする。

なお、式中の記号の定義は以下の通りである。

$\mathbf{H}_b \in R^{6 \times 6}$  : 受動ベース部の慣性行列

$\mathbf{H}_m \in R^{n \times n}$  : ロボット部の慣性行列

$\mathbf{H}_{bm} \in R^{6 \times n}$  : ベースとロボット部関節の干渉慣性行列

$\mathbf{c}_b \in R^6$  : ベース部に関する速度非線形項

$\mathbf{c}_m \in R^6$  : ロボット部に関する速度非線形項

$\mathcal{F}_b \in R^6$  : ベース先端に作用する外力・モーメント

$\mathcal{F}_h \in R^6$  : ロボット先端に作用する外力・モーメント

$\boldsymbol{\tau} \in R^n$  : ロボットの関節駆動力・トルク

$\mathbf{K}_b \in R^{6 \times 6}$  : ベース部の剛性

$\Delta \mathbf{x}_b \in R^6$  : ベース先端の弾性変位

また、系全体の運動量関係式は、並進および角運動量をそれぞれ記号  $(\mathcal{P}^T, \mathcal{L}^T)^T$  を用いて書くと、

$$\begin{bmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{L} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_b \dot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{H}_{bm} \dot{\phi} \quad (2)$$

となる [5].

### 2.2.3 制御モデル

上に導出した基礎方程式を JEMRMS の制御に応用することを考える。

JEMRMS の振動は主に親アームの第 3 リンクより根元側で発生する。また、能動的に制御できる関節数が多いほど制御の可能性が広がるので、本項では図 3 のように、親アーム (MA) の手首 3 関節と子アーム (SFA) の 6 関節を合わせた 9 自由度分の関節を能動的な協調制御部とみなして制御に使用し、親アームの肩部・肘部の 3 関節がかかわる部分を受動的なフレキシブルベースとみなす。また、ベース部の振動を評価する点を、同図に示すように Wrist Point と呼ぶことにする。

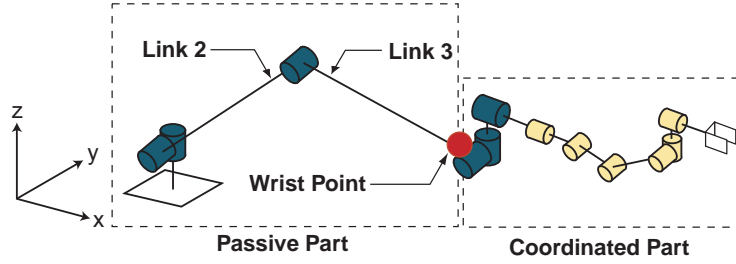


図 3: 提案する親子協調制御部と受動部

#### 2.2.4 振動抑制制御

式 (1) の上段の式は、柔軟なベース部と能動的な制御部との動的な干渉を示している。干渉には、行列  $H_{bm}$  が大きく関与している。この干渉項をうまく利用することによって、ベース部の振動を速やかに抑制することが可能となる。

いま、ベース部の速度を検出し、これを用いて下記のようなフィードバック制御を行うことを考える。

$$\tau = -H_m H_{bm}^+ H_b G \dot{x}_b \quad (3)$$

ここで、 $(\cdot)^+$  は擬似逆行列を表す。また、 $G$  はフィードバックゲインである。上式に従い、協調制御部を動作させることによって、その動作反動が、ベース部に対してダンピングとして働く。その結果、ベース部の振動減衰が実現される。

また、JEMRMS における実際の作業を考えた場合、ベースの振動を速やかに抑制すると同時に、子アームの先端位置を目標位置に収束させることが要求される。そこで、協調制御部の冗長自由度を考慮して式 (3) を拡張し、以下のような制御則を考える。

$$\tau = -H_m H_{bm}^+ H_b G \dot{x}_b + H_m (I - H_{bm}^+ H_{bm}) \zeta \quad (4)$$

ここで、 $\zeta$  は、 $n$  次元の任意ベクトルであり、手先のフィードバック則より決定される。親アームの粗位置決め後に、式 (4) を協調制御部に用いることにより、ベース部の振動を抑制する制御と同時に、子アームの先端を位置に収束させることが可能となる。

#### 2.2.5 無反動制御

次に、ベース部に反動を生じないような協調制御部の制御法について考える。

計画されている JEMRMS の精位置決め制御を考えた場合、子アームの動作反動によって、その根元部の親アームが振動すると、精位置決め制御の精度が低下してしまう。したがって、子アームが動作しても、親アームが振動を生じないような制御法が望まれる。ここでは、子アームよりも自由度数の大きい協調制御部を利用し、「反動ゼロ空間」という概念に基づき、ベース部の振動を励起しないような手先動作を実現する制御法を示す。

いま、運動量関係式 (2) において、ベース部が反動を生じなければ、式 (2) は以下の式で示される。

$$H_{bm} \dot{\phi} = \begin{bmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

これを関節速度について解くと、

表 2: 親アーム (Main Arm) の慣性パラメータ

Joint	m	$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$
	[kg]	[kg m <sup>2</sup> ]		
1	120	7.08	7.08	1.35
2	180	2.03	184.8	184.8
3	180	2.03	184.8	184.8
4	80	4.72	4.72	0.90
5	80	1.52	1.52	0.90
6	120	4.80	4.80	2.40

表 3: 子アーム (Small Fine Arm) の慣性パラメータ

Joint	m	$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$
	[kg]	[kg m <sup>2</sup> ]		
1	80	0.72	0.72	0.90
2	20	0.26	0.47	0.47
3	20	0.26	0.47	0.47
4	15	0.13	0.13	0.17
5	15	0.13	0.13	0.17
6	30	0.26	0.26	0.34

$$\dot{\phi} = \mathbf{H}_{bm}^+ \begin{bmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{L} \end{bmatrix} + (\mathbf{I} - \mathbf{H}_{bm}^+ \mathbf{H}_{bm}) \xi \quad (6)$$

となる．ここで， $\xi$  は， $n$  次元の任意ベクトルである．また， $(\mathbf{I} - \mathbf{H}_{bm}^+ \mathbf{H}_{bm})$  は反動ゼロ空間と呼ばれる [3]．上式に従って，協調制御部を動作させることによって，受動部に対して反動を与えない制御が可能となる．このような制御法を無反動制御という [3]．

### 2.3 数値シミュレーションモデル

以上に示した制御則の有効性を確認するため，シミュレーションを行った．

シミュレーションモデルを図 4 に示す．図中にアーム基部に固定された座標系を示している．以後，座標軸の方向はこの座標系の定義に従う．シミュレーションモデルにおいて仮定した親アームおよび子アームの慣性パラメータを表 2 および 3 に示す．

なお，操縦者が臨場感をもって JEMRMS の操縦シミュレーションができるように，図 5 に示すように，入力デバイス THC/RHC, およびディスプレイによるグラフィクス表示を含めた模擬操作卓を製作した．

ところで，一般に宇宙用マニピュレータの振動の大きな要因は，これまで“ブーム”と呼ばれるリンク部の剛性の低さであると言われてきた．しかし，実際には，円筒形の“ブーム”は十分な剛性を有しており，むしろ，振動の大きな要因は，関節の剛性およびバックラッシュの影響であることが，JEMRMS フライトモデルの地上試験において確認されている [4]．図 6 に，親アームの関節特性を示す．以下，この特性に基づき，親アームの振動の様子を評価する．

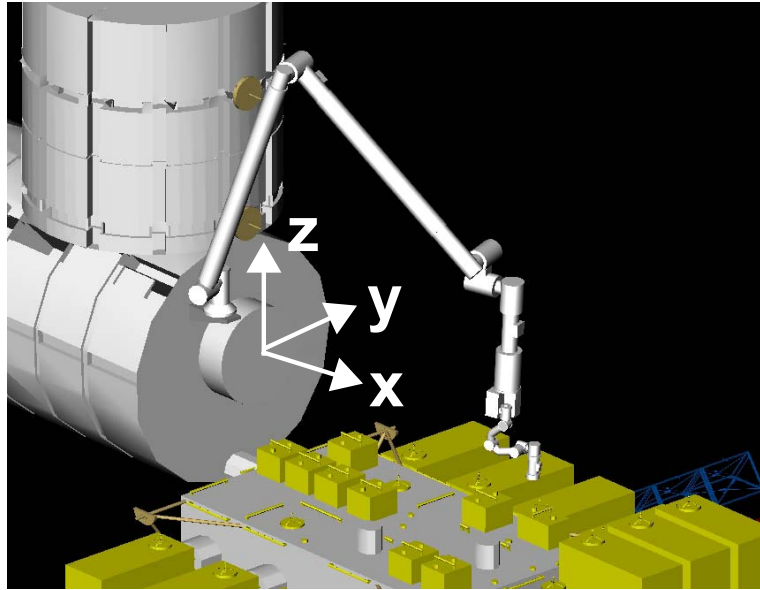


図 4: JEMRMS のグラフィックスシミュレーションモデル



図 5: 本研究にて構築したシミュレーション環境

### 2.3.1 振動抑制制御

まず、振動抑制制御についてのシミュレーション結果について述べる。

ここでは、子アームの先端に 80 [kg] のペイロードを把持し、0.05 [m/s] の速度で、x 軸方向に並進移動を行う場合を想定する。図 7, 8 に、親アームを停止させた後の残留振動の様子を示す。図 7 は、ベース部先端 Wrist Point の振動の様子を表す。一方、図 8 は、子アーム先端の振動の様子を表す。図中における “w/o MCVS” は振動抑制制御を適用しない場合、“with MCVS” は、親アーム停止 2[s] 後に振動抑制制御を開始した場合を示す。

図 7, 8 より、振動抑制制御を適用しない場合、長時間に渡り、ベース部の振動が持続し、その結果、子アーム先端の位置決めにも悪影響を生じている。一方、振動抑制制御を適用することによって、ベース部の振動が短時間で静定していることが確認される。また、このとき、子アーム先端がベース部の振



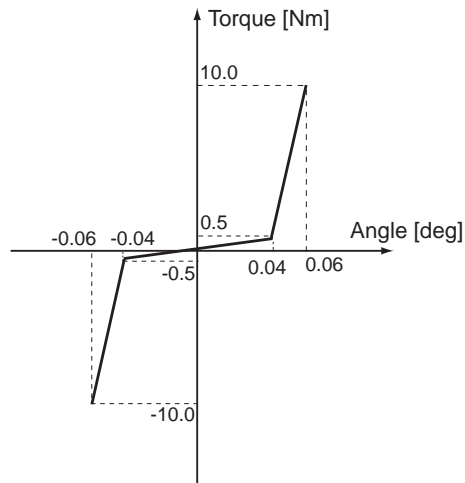


図 6: JEMRMS の関節特性モデル [4]

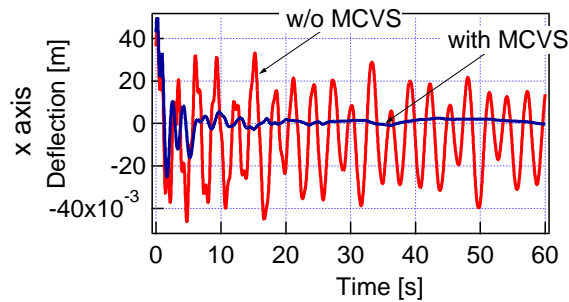


図 7: ベース部の振動特性 (w/o MCVS: 制振制御無しの場合, with MCVS: 制振制御有りの場合)

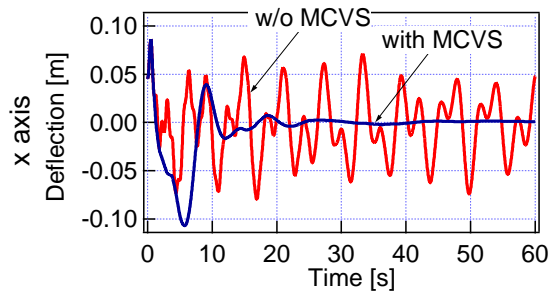


図 8: ハンド先端の振動特性 (w/o MCVS: 制振制御無しの場合, with MCVS: 制振制御有りの場合)

動を抑制しながら，目標位置（この場合 0）に速やかに収束していることがわかる．

### 2.3.2 無反動マニピュレーション

次に，無反動制御に関するシミュレーション結果を示す．

ここでは，子アームの先端を 0.04 [m/s] の速度で，x 軸方向に約 5 [s] 間並進移動を行う場合を想定する．図 9 に子アーム先端の動作プロファイルを示す．無反動制御の有無にかかわらず，子アームの動

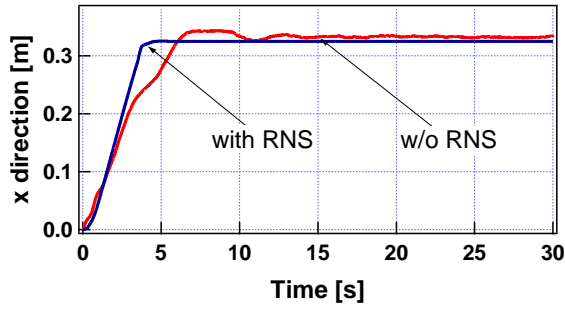


図 9: ハンド先端の動作軌跡 (w/o RNS: 無反動制御無しの場合, with RNS: 無反動制御有りの場合)

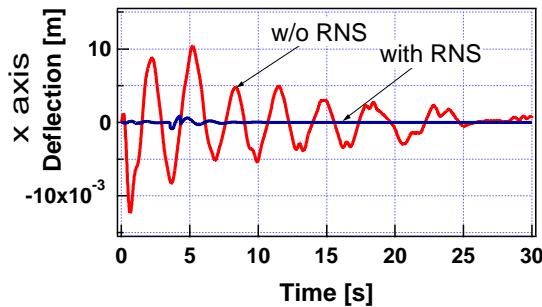


図 10: ベース部の振動特性 (w/o RNS: 無反動制御無しの場合, with RNS: 無反動制御有りの場合)

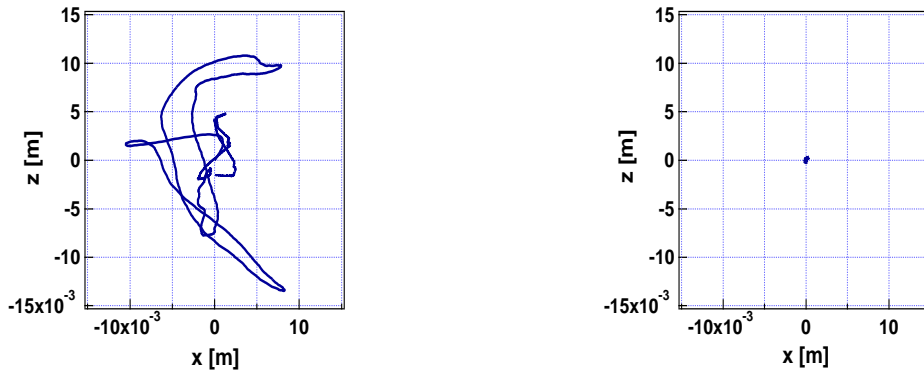


図 11: ベース部の運動の比較 (左: 無反動制御無し, 右: 無反動制御有り)

作はほぼ同じである。しかしながら、図 10 にベース部の振動の様子を表すように、無反動制御を適用した場合 (“ with RNS ”) にはベースがほとんど振動していないのに対し、無反動制御を適用しない場合 (“ w/o RNS ”) には、子アームの動作反動によってベースが大きく振動してしまっている。

図 11 は、子アーム手先において観測した  $xz$  平面におけるベース部の振動の様子を示している。左図が無反動制御を適用しない場合、右図が無反動制御を適用した場合である。その違いは一目瞭然である。特に、無反動制御を適用しない場合には、手先の振幅が 10 [mm] を超えており、子アームの精位置決め精度のスペックを満たさなくなってしまう。このようなケースでは、これまで、子アームの動作速度を遅くして(加速度を小さくして)反動の大きさを極力小さくするしか方法がないとされていた。しかしながら無反動制御を適用することにより、子アームの動作速度を落とすことなく、ベースにほとんど反動を生じない制御が可能であることが明らかとなった。

表 4: 自由度の分配方法

Case	$n$	$m$	$n - m$	操作モード
(1)	8	<b>6</b>	<b>2</b>	完全無反動 準無反動
(2)		<b>5</b>	<b>3</b>	
		4	4	
		3	5	
(3)		<b>2</b>	<b>6</b>	
(4)	6	<b>0</b>	<b>6</b>	無反動性の考慮なし

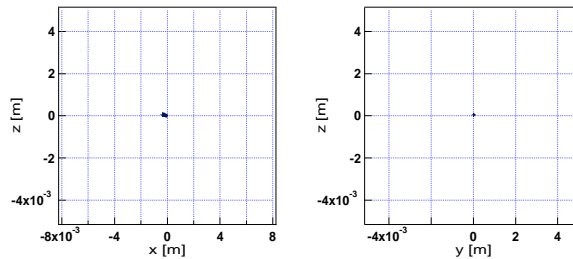


図 12: 完全無反動制御におけるベースの振動

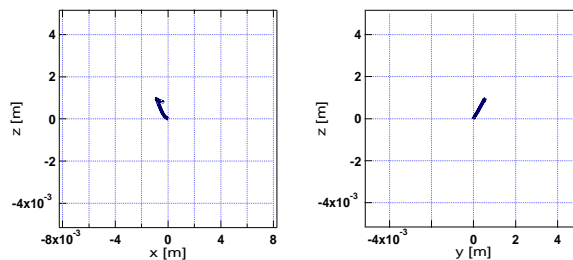


図 13: 準無反動制御におけるベースの振動 (無反動拘束 5 自由度の場合)

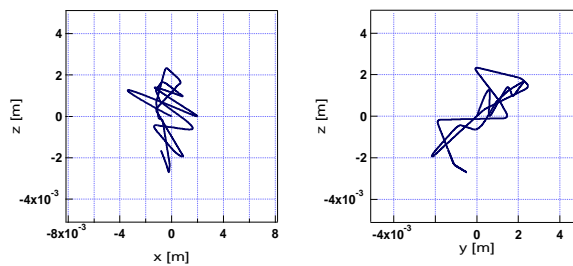


図 14: 準無反動制御におけるベースの振動 (無反動拘束 2 自由度の場合)

### 2.3.3 関節自由度と無反動性の関係

ここで、協調制御に用いることのできるアームの自由度数と、実現される無反動制御との関係を明らかにしておきたい。いま、協調制御部の有効自由度数を  $n$  とし、無反動制御において考慮する自由度数を  $m$  とする。 $n - m$  は、無反動制御を実施するとき、ハンドの位置決めを使用することのできる自由度である。

$m = 6$  とするとき完全無反動が実現されるが、JEMRMS では十分な数の有効自由度を得ることができないので、ベースの完全無反動とハンドの完全任意な位置決めを同時に行うことはできない。そこで、

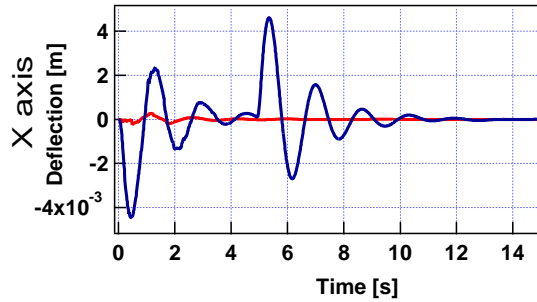


図 15: 慣性パラメータに誤差があるペイロードをハンドリングする場合

無反動制御自由度を 6 未満にする場合を準無反動制御と呼び、ベースの振動の様子を具体的に検討してみよう。

現在開発がすすめられている JEMRMS では、親アームの第 6 関節と子アームの第 1 関節の回転軸がほぼ一致してしまっているため、協調制御部の有効自由度数は  $n = 8$  である。このときの、自由度分配の組み合わせを表 4 に示す。図 13~15 に完全無反動および準無反動の制御時のベースの振動の様子を示す。 $m = 2$  のときハンドには、6 自由度の任意性が実現できる。この場合ベースにはある程度の振動を生じるが、図 11 左に示した無反動性を考慮しない場合に比べて、振動の振幅は小さく抑えられていることがわかる。

#### 2.3.4 モデル化誤差がある場合

以上の制御シミュレーションは、アームの各部分および手先に把持されているペイロードの慣性パラメータがすべて正確にわかっていることを前提にしたものであった。しかしながら、現実的なミッションでは、手先に把持されるペイロードにモデル化誤差が含まれている可能性が考えられる（アーム自身のパラメータは、運用データを解析することによってほぼ正確に同定できる可能性が高い。）

ここでは、実際に手先に 80 [kg] のペイロードを持っているにもかかわらず、その質量を 50 [kg] と誤ってモデル化してしまった場合について検討する。図 15 に無反動制御時の比較を示す。振幅がほぼゼロの実線はモデルに誤差が無い場合であり、振幅が大きい曲線は、80 [kg] のペイロードに対してその質量を 50 [kg] と誤ってモデル化してしまった場合である。質量誤差により、明らかに制御性能は劣化してしまっている。ただし、劣化の度合いは、無反動制御を適用しない場合の振動の半分以下である。

このように、無反動制御は、ペイロードのパラメータ誤差に対してある程度のロバスト性があることがわかる。なお、この振動の様子を計測することによりパラメータ誤差を推定し、最終的に振幅をゼロに収束させる制御、すなわち適応制御を考えることも可能である。

### 3 宇宙環境利用 / 軌道上実験への発展性

#### 3.1 宇宙実験へ発展させる際の課題

本研究で明らかにした制振制御、無反動制御を実現し、有効に活用するためには、JEMRMS の親子アームを協調制御させることがひとつのキーポイントである。しかしながら、現在の設計における JEMRMS は、親アーム、子アームを切り分け、排他的にそれぞれ片方づつしか操作できない設計になっている。これでは、せっかくの親子連結 12 自由度とこのアームが持つ特徴を生かすことができない。

JEM の初期運用段階では止むを得ないとしても、定常的なあるいは発展的な運用段階では、本研究

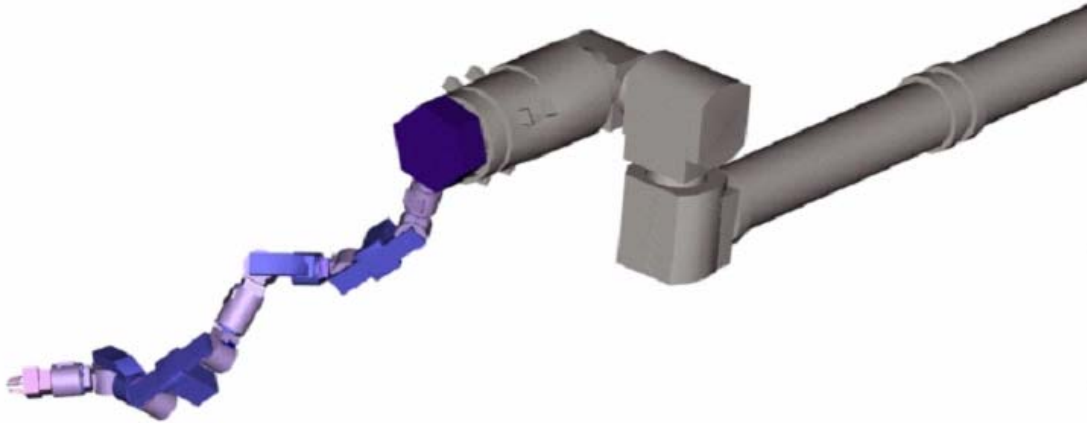


図 16: 精細作業用 12 自由度子アーム (RBR) を取りつけた JEM-RMS の構成図

で有効性を明らかにした親子協調制御が実現できるよう、JEMRMS の制御系を更新すべきであると考えられる。

また、現在の子アームの設計が 6 自由度であることも、JEMRMS の可能性を狭めてしまっていると考えられる。この点に関しては、平成 9 年度選定フェーズ II 研究にて検討された超多自由度再構成型ロボットアーム (RBR) を、現在の子アームと置き換えることを考慮することも有効であろう (図 16 参照)。

### 3.2 宇宙環境利用への貢献

本研究では、JEMRMS の粗位置決め制御後のアームの振動を、干渉を最大限に利用することによって、速やかに静定することが可能であることを示した。また、冗長自由度を利用することによって、振動抑制制御を実施すると同時に、子アーム先端の位置を目標点に速やかに収束させることが可能であることを示した。次いで、無反動制御により子アームによる精位置決め制御中に、ベースの励振を最小に抑えることができることを示した。また、パラメータ誤差が制御性能に与える影響についても、簡単な評価を行った。本研究にて検討を行った制御法を実現することによって、JEMRMS において効率的な作業が実施できるものと期待される。

JEMRMS を中心とした軌道上マニピュレーション技術は、国際宇宙ステーション ISS 自身を建設することが目的の全てではない。ISS 上で遂行される各種実験・観測の支援、および ISS のメンテナンスなども主要な任務である。それに加えて、今後、太陽発電衛星などの軌道上大規模構造物を構築する技術を確立し、ノウハウを獲得していくテストベッドとして JEM (特に暴露部) の利用価値は高いと考えられる。大型の資材をハンドリングする際には、本研究で指摘したアームやベースの振動が大きな問題となり、それに対処する無反動制御や振動抑制制御の重要性も増してくるはずである。また、慣性パラメータが未知のペイロードに対するロバストで適応的な制御性能も重要なものとなってくる。本研究は、このような JEMRMS を活用した将来の発展に対して、キーテクノロジーを提供することになるであろう。

なお、2003 年 2 月 1 日 (日本時間) スペースシャトル・コロンビア号が大気圏再突入の際に空中分解するという悲惨な事故が発生した。現在、この事故の原因が解明されるまでスペースシャトルの運行が停止されており、これにともなって ISS の建設も中断を余儀なくされている。ISS の建設は、宇宙飛行士による軌道上の船外活動に大きく依存している。しかし、船外活動は大きな危険性を伴い、必ずしも高い作業効率を実現できているとは言えない。宇宙ロボティクスの技術を高め、ステーションの組み立

て・運用に際して船外活動を必要としないようなロボット技術を開発し、実践していくことが、宇宙ステーション計画における日本の大きな貢献の一つになると考える。

## 4 今後の課題と対応策

上に述べた論点も含めて、JEMRMS の運用中には、以下のような課題の克服のための開発および実証がなされるべきであると考えられる。

1. JEMRMS の軌道上における振動特性の同定実験（初期運用段階）
2. 親子独立制御という制限のもとでの振動抑制，無反動制御の確認実験（初期運用段階）
3. ハンドリング対象物の慣性パラメータの同定実験（初期運用段階）
4. 親子協調制御の実現による振動抑制，無反動制御の実施（発展運用段階）
5. ハンドの位置決め制御，および振動抑制・無反動制御に割り振る自由度を任意に設定し，インタラクティブに軌道計画を行う操縦インターフェースの開発（発展運用段階）
6. 多自由度子アームの開発と実装（発展運用段階）
7. 太陽発電衛星等の大型構造物の組み立て実験（発展運用段階）

## 5 文献等

### 参考文献

- [1] 吉川 恒夫, 細川 耕, “マクロ - マイクロシステムによるフレキシブルマニピュレータの制御,” 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 2, pp. 207-212, 1994.
- [2] 近野 敦, 内山 勝, 貴答 豊, 村上 真人, “加速度指令による三次元フレキシブルマニピュレータの振動抑制制御,” 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 8, pp. 1166-1174, 1994.
- [3] D. N. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat and M. Uchiyama, “Reaction Null-Space Control of Flexible Structure Mounted Manipulator Systems,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 15, no. 6, pp. 1011-1023, 1999.
- [4] H. Motiomoto, N. Satoh, Y. Wakabayashi, M. Hayashi, and Y. Aiko, “Performance of Japanese Robotic Arms of the International Space Station,” 15th IFAC World Congress, 2002.
- [5] *Space Robotics : Dynamics and Control*, edited by Xu and Kanade, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [6] 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. 7-14, 2002.

## 6 論文・特許

### 6.1 論文・著書等

- (1) 吉田 和哉, 黒須 明英, “軌道上作業用超多自由度ロボット (RBR) の冗長性分解制御,” 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol. 1, pp. 9-10, 1A15, 2000 年 9 月.

- (2) Kazuya Yoshida and Satoko Abiko, “ A Proposal for Performance Improvement of JEM-RMS with Reactionless Manipulation ,” Proc. of the 23rd International Symposium on Space Technology and Science, vol. 1, pp. 697-702, 2002-d-08, Matsue, Shimane, Japan, May 2002.
- (3) Satoko Abiko, “ Advanced Manipulation of a Space Robot based on Reaction Dynamics ,” Proc. of the 23rd International Symposium on Space Technology and Science, vol. 2, pp. 2442-2447, 2002-s-13, Matsue, Shimane, Japan, May 2002.
- (4) 吉田 和哉, 安孫子 聡子, “ 親子協調による JEMRMS 無反動制御の提案 ,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 1P1-A07, 松江, 島根, 2002 年 6 月.
- (5) 吉田 和哉, 安孫子 聡子, “ 宇宙ステーション用マニピュレータ JEMRMS による精細ハンドリング時の制御方式に関する考察 ,” 第 45 回自動制御連合講演会, 1A1-B4, 仙台, 宮城, 2002 年 11 月.
- (6) 安孫子 聡子, 吉田 和哉, “ JEMRMS の動特性シミュレーションと振動抑制制御 ,” 日本機械学会東北支部第 38 期総会・講演会講演論文集, no. 031-1, pp. 152-153, 仙台, 宮城, 2003 年 3 月.
- (7) Satoko Abiko and Kazuya Yoshida, “ An Effective Control Strategy of Japanese Experimental Module Remote Manipulator System (JEMRMS) Using Coupled and Un-Coupled Dynamics ,” Proc. of the 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, AS18, Nara, Japan, May 2003.

## 6.2 特許出願・取得

なし