

# 1M12 浮遊ベース宇宙ロボットにおける 無反動制御を用いた実用例の提案

曽根大樹, 佐藤大祐, 金宮好和 (東京都市大学)

On Some Practical Reactionless Motion Tasks for a Free-Floating Space Robot

Hiroki Sone, Daisuke Sato, Yoshikazu Kanamiya (Tokyo City University)

Key Words: Space robot, Reactionless motion control, Application tasks

## Abstract

This paper describes how to use reactionless motion control with a free-floating space robot, considering model properties in the realistic situations. Because reactionless motion is directly affected by the kinematic structure of the manipulator, we investigate a better way to impose the reactionless constraint to specified joints. From these results, we propose reactionless motion tasks such as inspection using a hand camera, unfolding motion from the stored configuration, and point-to-point motion tasks. We verify the capability of the proposed tasks via numerical simulation.

## 1 序論

宇宙開発の発展に伴い, 船外活動を行うための宇宙ロボットの開発が期待されている。宇宙ロボットは地上ロボットと異なり, 固定部が存在しないため, マニピュレータと衛星本体などのベースの間に動的干渉が生じることが指摘されている [1]。浮遊ベースロボットにおいては, この動的干渉により生じる衛星本体の姿勢変化が, 通信障害などを引き起こすため問題視される。一般的な三軸衛星においては, 外乱により生じる姿勢変化に対して, リアクションホイールが広く利用されている。しかし, リアクションホイールは原理上, 低出力トルクとなるため, マニピュレータの動作反動を補償するには性能不足であり, マニピュレータを低速で駆動させる必要がある。そのため, 作業効率の悪化が問題となる。

このような背景から, 宇宙ロボットにおいてマニピュレータの反動制御は重要な技術課題とされ, 多数の研究がなされてきた。この反動制御の一つの手法として, 無反動制御を実現する反動零空間法が提案されており [2][3], 技術試験衛星 VII (ETS-VII) において実施された軌道上実験でその有用性が実証されている [4]。また, 反動零空間法を基にした無反動制御の理論的応用として, 最適化手法を用いた Point-To-Point (PTP) 制御 [5], 角運動量の分配制御 [6] やパラメータ誤差を考慮した適応無反動制御 [7] などが提案されている。

これらの研究が一般的なモデルを対象としているのに対し, 無反動制御は対象となるマニピュレータの機構構成に大きく依存する。そのため, 無反動制御の実

用化においてモデルの特性を考慮して利用方法を検討することは重要である。吉田らは ETS-VII に搭載された 6 自由度マニピュレータに対して, マニピュレータの機構構成を基に無反動制御の利用を提案している [8]。また, 6 自由度マニピュレータにおける無反動制御は可動範囲が局所的となることから, 7 自由度冗長マニピュレータへ拡張した場合について比較・検討されている [9][10]。また, FRENDArm [11] においても 7 自由度マニピュレータが採用されている。しかし, モデルの反動の特性を考慮した無反動制御の検討は不十分であり, 実作業における無反動制御の利用方法については不明確である。

そこで, 本稿では 7 自由度冗長マニピュレータに対して, モデルの機構および反動の特性に着目し, 無反動制御の利用方法を提案する。また, 実作業において頻繁に実行することが想定される, 手先カメラ [12] を用いた衛星搭載機器の目視点検, マニピュレータの収納姿勢からの展開動作および, PTP 動作における無反動制御の利用方法について述べ, その有用性について数値シミュレーションにより検証する。

## 2 システムのモデリングと力学式

### 2.1 対象モデルの機構構成

対象モデルとして, 図 1 に示す機構構成のマニピュレータを用いる。ETS-VII やカナダアーム 2 に見られるように, 軌道上マニピュレータは広い可動域を得るために, 関節間にオフセットが設定されている。本モデルにおいても同様にオフセットを設定した。衛星に

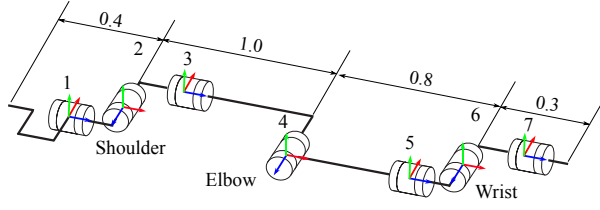


図1 7自由度冗長マニピュレータの機構図

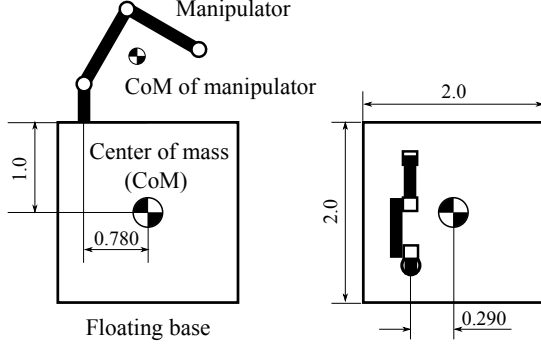


図2 マニピュレータ搭載位置

対するマニピュレータの搭載位置は ETS-VII を参考として、図2に示す通りとする．また、慣性パラメータは表1に示すように、手首関節の質量比を小さめに設定した．

## 2.2 運動量保存則

一般的にマニピュレータの運動は運動方程式により記述されるが、宇宙環境では作業実行時間のスパンにおいて運動量が厳密に保存するため、その保存則もまたシステムの運動を記述する支配則となる．運動量保存則はベースの質量中心位置を基準として、以下のよう表すことができる [13] ．

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_v & M_{v\omega} \\ M_{v\omega}^T & M_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{\omega}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{vm} \\ M_{\omega m} \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (1)$$

式中、 $v_b, \omega_b \in \mathbb{R}^3$ 、 $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^7$  はそれぞれベース並進速度、角速度、関節速度を表す． $M_v, M_\omega, M_{v\omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $M_{vm}, M_{\omega m} \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$  はそれぞれ慣性行列の部分行列を表し、特に  $M_{vm}, M_{\omega m}$  はベースとマニピュレータ間の動的干渉を表す行列であり、干渉慣性行列と定義される．また、 $p, l \in \mathbb{R}^3$  は初期並進運動量とベースの質量中心を基準とした初期角運動量を表す．

浮遊ベースロボットにおいては、ベースの姿勢変化は通信障害などの問題に直結するため、回転運動に関する拘束式である角運動量保存則が重要となる [14] ．(1) より角運動量保存則は、

$$l = \tilde{M}_\omega \omega_b + \tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta} \quad (2)$$

となる．式中、右辺第1項はベースの回転運動により生じる角運動量、第2項はマニピュレータの動作により生じる角運動量を表し、後者は干渉角運動量と定義

表1 対象モデルの慣性パラメータ

	質量 [kg]	慣性モーメント [kgm <sup>2</sup> ]		
$i$	$m_i$	$I_{xi}$	$I_{yi}$	$I_{zi}$
1	30.0	0.0671	0.0671	0.0851
2	30.0	0.0843	0.267	0.267
3	45.0	3.81	3.81	0.127
4	40.0	0.113	2.19	2.19
5	20.0	0.213	0.213	0.0250
6	20.0	0.0250	0.0292	0.0292
7	25.0	0.0990	0.0990	0.0313

される [14] ．また、 $(\tilde{\circ})$  はベース並進運動の影響を陰に含んだ表現であることに注意されたい．以下、反動と干渉角運動量を同義として扱う．

## 3 無反動制御と干渉角運動量

### 3.1 無反動制御

(2) より、マニピュレータの動作反動によりベースに生じる角速度は以下となる．ただし、外力が作用しないことを仮定し、 $l = 0$  とした．この仮定により、一般性を失うことはない．

$$\omega_b = -\tilde{M}_\omega^{-1} \tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta} \quad (3)$$

上記より、 $\tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta} = 0$  の拘束を満たす関節速度を生成することにより、ベースに対して無反動な動作を実現できる．この動作を生成する関節速度の集合は干渉慣性行列の零空間射影行列を利用することにより、

$$\dot{\theta} = P_{RNS} \dot{\theta}_a \quad (4)$$

となる．式中、 $\dot{\theta}_a \in \mathbb{R}^7$  は関節速度次元の任意ベクトル、 $P_{RNS} = E - \tilde{M}_{\omega m}^+ \tilde{M}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  は干渉慣性行列の零空間への直交射影行列を表す．また、 $E \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  は単位行列、 $\{\circ\}^+$  は行列の擬似逆行列を表す．特定の関節を用いてマニピュレータの反動補償を行う場合、反動補償の関節速度は以下となる．ただし、反動補償を行うために最低三つの関節を必要とする．

$$\dot{\theta}_D = -\tilde{M}_{\omega m D}^+ \tilde{M}_{\omega m I} \dot{\theta}_I \quad (5)$$

式中、 $(\circ)_I, (\circ)_D$  はそれぞれ、独立関節と反動補償に用いる従属関節に関する変数を表す．独立関節と従属関節を適切に設定することにより、ベースに反動を与えることなく独立関節を目標の関節角度へ制御することが可能である．本稿ではモデルの特性を基に無反動制御を利用するため、(5) を用いて制御を行う．

### 3.2 各関節の運動により生じる干渉角運動量の比較

独立関節と従属関節を適切に設定するために、各関節の運動により生じる干渉角運動量について考察を行う．本モデルは複雑な非線形性を持つシステムで

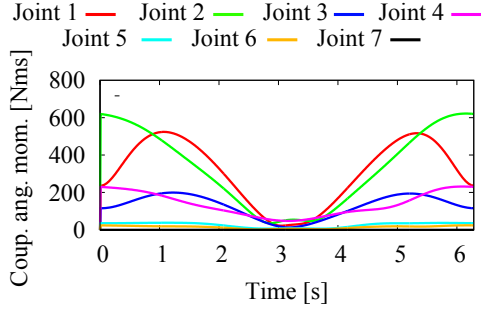


図3 各関節の運動により生じる干渉角運動量

あり，解析的な結果を得ることが困難であるため，簡易的なシミュレーションにより数値的に検証する．初期姿勢として全関節の角度を 0 deg とし，全関節に 1 rad/s の関節速度を与えた場合における干渉角運動量のユークリッドノルム  $\|\tilde{M}_{\omega m}\dot{\theta}\|$  を図 3 に示す．

図 3 より，第 1, 2 関節の運動により生じる干渉角運動量が最も大きく，第 3, 4 関節の反動は同程度であることが確認できる．また，手首に相当する第 5, 6, 7 関節の運動により生じる干渉角運動量は微小であることが確認できる．反動補償に関しては，動作反動の大きい関節を用いる必要があるため，少なくとも第 1, 2 関節と第 3, 4 関節のいずれかを組み合わせた三つの関節を用いることが適切である．また，独立関節として適切であるのは，手首関節および第 3 もしくは第 4 関節のうち反動補償に利用しない関節である．

### 3.3 干渉角運動量の考察

本章では干渉角運動量について考察する．マニピュレータの動作により生じる干渉角運動量は以下となる．

$$\tilde{M}_{\omega m}\dot{\theta} = \left\{ \sum_{i=1}^7 I_i J_{\omega i} \right\} \dot{\theta} + \left\{ \sum_{i=1}^7 m_i [r_i^{\times}] J_{vi} - \frac{m_{Cm}^2}{m_{Cs}} [r_{Cm}^{\times}] J_{Cm} \right\} \dot{\theta} \quad (6)$$

式中， $J_{vi}$ ， $J_{\omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$  はそれぞれ各リンクにおける質量中心の並進速度に関するヤコビ行列，各リンクにおける角速度に関するヤコビ行列を表す． $m_i$ ， $m_{Cm}$ ， $m_{Cs}$  は各リンクの質量，マニピュレータの質量，システム全体の質量を表す．また， $I_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は各リンクの質量中心回りの慣性テンソルを表し， $r_i$ ， $r_{Cm} \in \mathbb{R}^3$  はそれぞれベースの質量中心から各リンクの質量中心への位置ベクトルおよび，ベースの質量中心からマニピュレータの質量中心への位置ベクトルを表す． $[\circ^{\times}]$  はベクトル  $\circ$  の歪対称行列を表す．

(6) において，右辺第 1 項は各リンクの回転運動により生じる干渉角運動量，第 2, 3 項は並進運動量のモーメントとして生じる干渉角運動量を表す．したがって，干渉角運動量は二つの角運動量の線形結合と

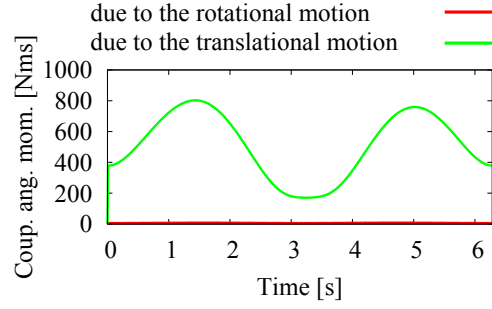


図4 干渉角運動量の成分比較

して表される．ここで，これら二つの角運動量の大小関係について考察する．前述と同様に，一般性を持った解析的な結果を得ることは困難であるため，簡易的なシミュレーションにより数値的に考察する．ただしこの場合，各関節の運動間で反動を打ち消し合うことがないように，第 1, 2 関節のみに 1 rad/s の関節速度を与え，他の関節については固定関節とする．また，初期姿勢は図 3 の場合と同様とする．図 4 に干渉角運動量のユークリッドノルムを示す．

結果より特筆すべき点として，並進運動量のモーメントとして生じる干渉角運動量が相対的に過大であるのに対して，回転運動により生じる干渉角運動量は微小であることが挙げられる．したがって，干渉角運動量はベースの質量中心から，マニピュレータの質量中心までの位置ベクトルの大きさおよび，質量中心の並進速度に大きく依存する．

## 4 無反動制御の実用例

本章では前述の干渉角運動量に関する考察より得られた結果から，無反動制御の利用方法について検討する．ここでは，手首関節を独立関節とした場合と第 4 関節を独立関節とした場合について述べる．前者については，手先カメラを用いた衛星搭載機器の目視点検，後者は収納姿勢からの展開動作および，無反動制御を部分的に利用した従来の PTP 制御の低反動化に利用する．ただし，本稿では特異点や自己干渉などの問題については言及しない．

### 4.1 無反動制御を用いた手先カメラによる点検作業

ETS-VII においては手先にカメラが搭載されており [12]，このカメラを用いて衛星搭載機器の目視点検などが行われている．同様の作業は軌道上ロボットにおいて頻繁に行われることが想定されるため，無反動制御を用いることによる作業効率の改善は有用である．

無反動制御を用いた手先の姿勢制御については拡張ヤコビ行列を用いた以下の制御式が知られている [9]．

$$\dot{\theta}^{ref} = \begin{bmatrix} J_{\omega} \\ \tilde{M}_{\omega m} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \omega_e^{ref} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中， $J_{\omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$  は手先の角速度に関するヤコビ行

列,  $\omega_e \in \mathbb{R}^3$  は手先の角速度を表す．ここで, [9] において, 筆者らは上記の制御式を手先位置の PTP 制御に用いており, 手先の姿勢制御としては用いていないことに注意されたい．また, (7) を用いた場合, マニピュレータ全体の運動として指令した手先の角速度を実現するため, 手首位置が大きく変化し, 前述のようなカメラを用いた作業への利用は困難である．

しかし図 3 に示した結果より, 手首関節の運動により生じる動作反動は微小であるため, これらの関節を独立関節として制御することにより, マニピュレータの手首位置を大きく動作させることなく, 手先の姿勢のみを制御することが期待できる．このとき, 独立関節を第 5 から第 7 関節, 従属関節を第 1 から第 4 関節に設定する．独立関節の関節指令値は姿勢に関する順運動学  $\omega_e = J_\omega \dot{\theta}$  および, (5) より,

$$\dot{\theta}_I^{ref} = (J_{\omega I} - J_{\omega D} \tilde{M}_{\omega m D}^+ \tilde{M}_{\omega m I})^{-1} \omega_e^{ref} \quad (8)$$

として与えられる．

上記の制御手法の性能を数値シミュレーションにより検証する．目標動作はマニピュレータ搭載面上の機器の点検作業を想定し, 図 5 に示すような固定軸周りに 10 s 間で  $\pi$  rad 回転するものとした．マニピュレータの初期姿勢は  $[90, -20, 180, 110, 0, 20, 0]^T$  deg に設定した．また, 制御性能を比較するために同様の動作を無反動制御を利用せずに実行した．

図 6 より, 無反動で手先の姿勢制御の実現が確認できる．これに対して, 無反動制御を用いない場合, 0.15 deg 程の姿勢変化がベースに生じていることが確認できる (図 7)\*1．ここで特筆すべき点は, 反動補償に用いる従属関節の関節速度が比較的小さいことであり, その結果生じる手首関節の位置変化が微小 (およそ 10 cm 程度) であるということである．この動作の利用方法としては, 遠隔操作による機器の確認作業など常に衛星を定常姿勢に保つ必要がある場合や, 無反動制御の利点である高速な動作を利用した視点の切り替えなどが考えられる．

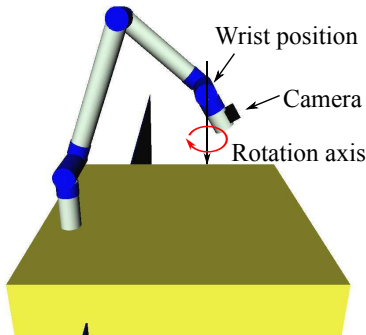


図 5 手先の目標動作

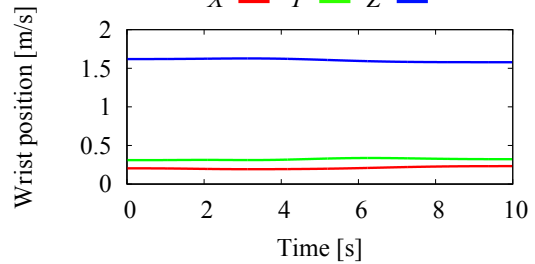
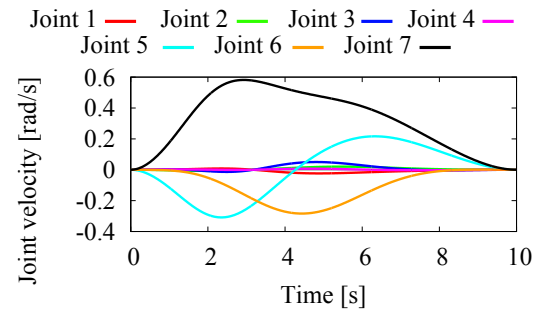
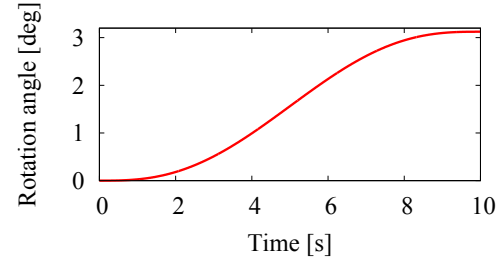
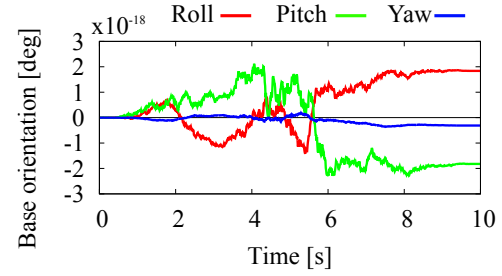


図 6 無反動制御を利用した手先の姿勢制御

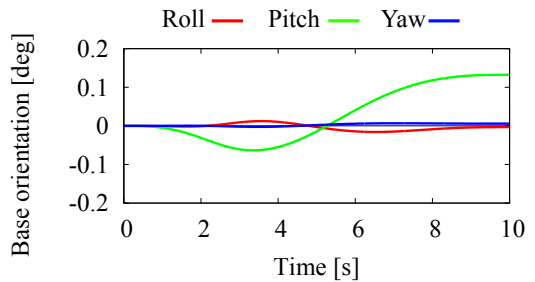


図 7 無反動制御を利用しない場合のベース姿勢変化

#### 4.2 無反動制御を用いた収納姿勢からの展開動作

ETS-VII においては, 図 8 左上に示すような収納姿勢と呼ばれる姿勢が存在し, この姿勢からの展開動作が必要となる．軌道上実験においては, この動作を 40 分程のスパンで実行しており [15], 時間を要する作業であった．そのため, この動作を無反動で実行可能であれば, 作業効率の改善が期待できる．

本モデルにおける無反動制御を用いた展開動作に

\*1 ETS-VII においては姿勢許容誤差が 0.05 deg 程度．



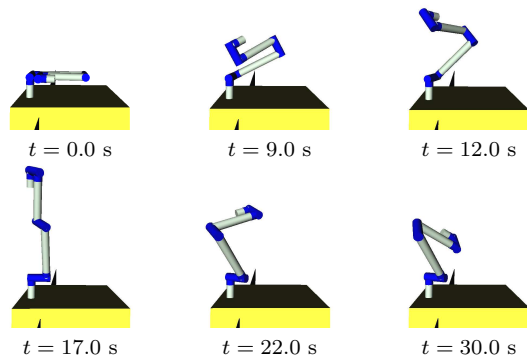


図 8 無反動制御を用いた展開動作

ついて、数値シミュレーションにより確認を行う。手首関節の動作は手先位置に対して影響が少ないため、第 1 から第 4 関節を駆動関節とし、手首関節は固定関節とした。このとき、 $\dim \mathcal{N}(\tilde{M}_{\omega m D}) = 1$  であるため<sup>\*2</sup>、無反動制御を実現する関節速度は一意である。したがって、無反動制御は制御入力に依存せず、初期姿勢のみによって決定される。

図 8 に展開動作のスナップショットを示す。本モデルにおいては、最終的に手先が衛星面付近を経由することが確認できる。そのため、この動作と (8) を用いることにより、収納状態からの展開動作の終了直後に、手先カメラを用いた衛星面上搭載機器の確認作業に移行することが可能である。また、この動作を逆入力することにより、展開動作において経路する姿勢からの収納動作が可能である。ただし、無反動制御は対象モデルのパラメータに大きく依存するため、設計時に適切な初期姿勢（収納姿勢）および、慣性パラメータの分布の調整を行うことが重要である。

#### 4.3 無反動制御を部分的に利用した PTP 動作

マニピュレータに求められる基本的な動作は、特定の手先位置への PTP 動作であり、様々な作業において必要とされる。この PTP 動作において、最も理想的な状態は初期姿勢から終端姿勢へ無反動制御を用いて制御可能な場合である。しかし、無反動制御を用いた場合、手先の可動範囲は比較的狭い領域に制限されることが問題となる。そこで、本章では無反動制御を部分的に用いて、従来の関節空間上での PTP 制御の反動軽減について検討する。

基本的な概念としては、初期姿勢から終端姿勢までの PTP 制御を二つの無反動制御（フェーズ 1, 3）と、これらの終端姿勢をつなぐための PTP 動作（フェーズ 2）の三つの動作に分割するものである（図 9）。これは、簡易的な柔軟ベースモデルにおいて検証され、その有用性が示されている [16]。本稿ではこの手法を

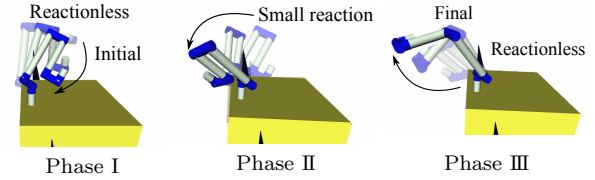


図 9 無反動制御を部分的に利用した PTP 制御

浮遊ベースモデルに用いる。

このとき重要な要素となるのが無反動制御間の状態の遷移方法であり、制御性能に大きく影響する。図 4 に示した結果より、干渉角運動量において並進運動量のモーメントとしての角運動量が高い割合を占めている。前述の考察より、この角運動量はマニピュレータの質量中心の速度および、ベースの質量中心からマニピュレータの質量中心までの位置ベクトルの大きさに依存している。この特性を利用して接続時に用いる動作の反動軽減を行う。具体的には、図 9 に示すようなマニピュレータが折りたたまれた姿勢で無反動制御間を遷移することで、反動軽減が期待できる。

上記の手法を数値シミュレーションにより検証する。このとき用いる無反動制御は、マニピュレータの折りたたみ動作を実現するために、第 4 関節を独立関節として、第 1 から第 3 関節を用いて反動補償を行った。初期姿勢は  $[140, -10, 0, -100, 180, 180, 0]^T \text{deg}$ 、終端姿勢は  $[300, -40, 0, -60, 180, 180, 0]^T \text{deg}$  とした（図 9）。それぞれの姿勢から無反動制御を用いて折りたたみ動作を実行し、その終端姿勢間を関節空間上の直線補間を用いて制御した。ただし、手首関節については簡略化のため折りたたみ動作に適した姿勢に設定し固定関節とした。しかし、4.1 章で示したように、手首関節の無反動制御は第 1 から第 4 関節に大きな影響を与えないため、任意の手首関節の初期姿勢においても実行可能である。シミュレーション時間は 30 s とし、各動作の実行時間はそれぞれ 10 s とした。また、参考のため従来の PTP 制御（関節空間上での直線補間）を用いた場合のシミュレーションを行った。図 10, 11 より、従来の PTP 制御に対して、各軸回りの姿勢変化の軽減が確認でき、最大でピッチ軸（図 9 において紙面垂直方向）回りに対して 50% 程軽減していることが確認できる。今回の動作では、三つの動作を等しい時間で実行したが、無反動制御を関節速度の限界で実行することにより、フェーズ 2 に要する実行時間を長めに配分できるため、フェーズ 2 に生じる角運動量をより軽減することが可能である。

#### 5 結言

本稿では、対象マニピュレータの機構構成を基に無反動制御の利用方法について検討した。マニピュレータの動作反動について数値的に考察することで、動作

<sup>\*2</sup>  $\dim$  は次元、 $\mathcal{N}(\circ)$  は  $\circ$  の零空間を表す。

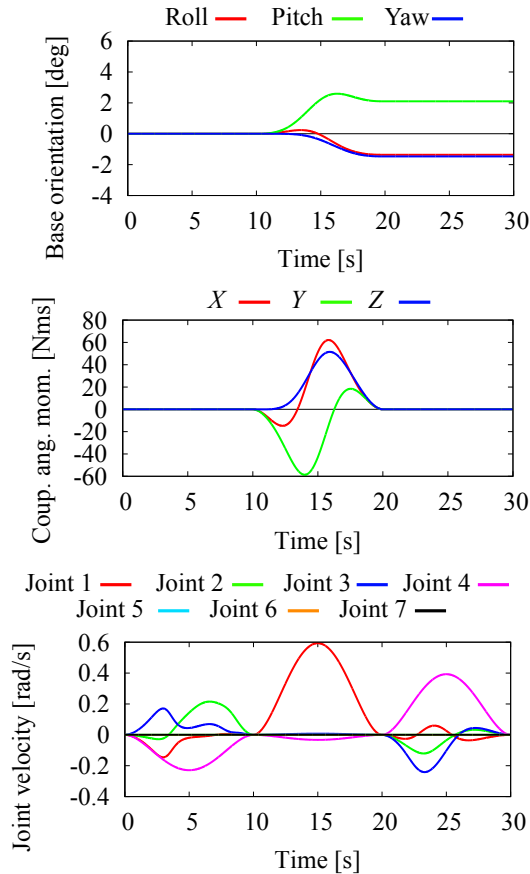


図 10 提案した PTP 制御のシミュレーション結果

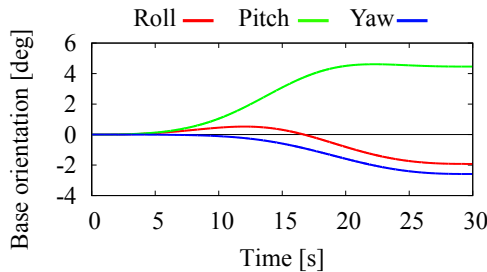


図 11 従来の PTP 制御におけるベース姿勢変化

反動を補償する関節と独立駆動の関節の設定について検討した。その結果を基に手首関節および肘関節に相当する第 4 関節を独立駆動とした場合の無反動制御の利用方法について検討した。前者については手先カメラを用いた衛星搭載機器の目視点検作業，後者についてはマニピュレータの収納姿勢からの展開動作，無反動制御を部分的に利用した PTP 制御について提案した。

今後の課題は，マニピュレータの機構配置により無反動制御を用いた場合の可動範囲が大きく変化するため，無反動制御を用いるという観点において最適な機構配置を検討することである。また，本稿では言及をしなかった干渉慣性行列の特異点について明確にする必要がある。

## 参考文献

- [1] Z. Vafa and S. Dubowsky, "On the dynamics of manipulators in space using the virtual manipulator approach," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 1987, pp. 579–585.
- [2] D. Nenchev, K. Yoshida, and Y. Umetani, "Introduction of redundant arms for manipulation in space," in *IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots*, 1988, pp. 679–684.
- [3] Chung, C. L., Desa, S., and DeSilva, C., "Base Reaction Optimization of Redundant Manipulators for Space Applications," The Robotics Inst., Carnegie Mellon Univ., Pgh, PA 15213, Tech. Rep., Sep. 1998.
- [4] 吉田和哉, ドウラゴミル N. ネンチェフ, 橋詰健一, 安孫子聡子, 小田光茂: "ETS-VII を用いた宇宙ロボット制御実験", 日本航空宇宙学会論文集, vol. 50, no. 584, pp. 351–359, 2002.
- [5] D. Dimitrov and K. Yoshida, "Utilization of Holonomic Distribution Control for Reactionless Path Planning," in *Proc. 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2006.
- [6] —, "Utilization of the bias momentum approach for capturing a tumbling satellite," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2004, pp. 3333–3338.
- [7] T.-C. Nguyen-Huynh and I. Sharf, "Adaptive reactionless motion for space manipulator when capturing an unknown tumbling target," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 2011, pp. 4202–4207.
- [8] K. Yoshida and D. N. Nenchev, "Reactionless Manipulations and Proposal to ETS-VII On-Board Experiments," in *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, 1999, pp. 1–3.
- [9] K. Yoshida, K. Hashizume, and S. Abiko, "Zero reaction maneuver: flight validation with ETS-VII space robot and extension to kinematically redundant arm," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 2001, pp. 441–446.
- [10] D. N. Nenchev and K. Yoshida, "Singularity-Consistent Teleoperation Techniques for Redundant Free-Flying Robots," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 1999, pp. 1895–1902.
- [11] T. J. Debus and S. P. Dougherty, "Overview and Performance of the Front-End Robotics Enabling Near-Term Demonstration (FREND) Robotic Arm," in *AIAA Unmanned Unlimited Conference*, 2009, pp. 1–12.
- [12] M. Oda, K. Kibe, and F. Yamagata, "ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 1997, pp. 739–744.
- [13] Y. Masutani, F. Miyazaki, and S. Arimoto, "Sensory feedback control for space manipulators," in *Proc. Int. Conf. Robot. Automat.*, 1989, pp. 1346–1351.
- [14] D. Nenchev and K. Yoshida, "Impact analysis and post-impact motion control issues of a free-floating Space robot subject to a force impulse," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 3, pp. 548–557, Jun. 1999.
- [15] [http://robotics.jaxa.jp/project/ets7-HP/ets7-j/robot/robot\\_index.html](http://robotics.jaxa.jp/project/ets7-HP/ets7-j/robot/robot_index.html).
- [16] K. Yoshida, D. Nenchev, P. Vichitkulsawat, H. Kobayashi, and M. Uchiyama, "Experiments on the PTP operations of a flexible structure mounted manipulator system," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1996, pp. 246–251.