

柔軟ベース上冗長マニピュレータの遠隔操作

Teleoperation of a Redundant Manipulator Mounted on a Flexible Base

学 菱沼 利光 (武蔵工大) 学 阿部 崇志 (武蔵工大)
正 Dragomir N. Nenchev (武蔵工大)

Toshimitsu HISHINUMA, Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo
Takashi ABE, Musashi Institute of Technology
Dragomir N. NENCHEV, Musashi Institute of Technology

Abstract: We describe an experimental system for teleoperation of a redundant manipulator mounted on a flexible base. A reactionless motion generator based on the Reaction Null Space method is proposed and applied to the redundant manipulator. Also, we implemented the Singularity Consistent method to cope with kinematic singularities. Performance results confirm the feasibility of both methods for teleoperation.

Key Words: Flexible Structure Mounted Manipulator System, Teleoperation, Redundant Manipulator, Singularity-Consistent Method, Reactionless Motion, Space Manipulator

1 序論

現在、宇宙空間で使用するロボットマニピュレータとして、マクロ・マイクロマニピュレータシステムの研究が盛んに行われている。マクロマニピュレータを静止させた状態でマイクロマニピュレータを動作させた場合、マクロマニピュレータの剛性の低さより振動が生じる。この問題は、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 [1]。

このシステム代表的な例として、JEMRMS/SFA (JAXA)、CANADARM2/Dextre (カナダ) がある。我々はこのシステムには3つの問題があると考えている。1つ目は柔軟ベース部を持つことによる振動の問題、2つ目は機構的な特異点の問題、3つ目は CANADARM2/Dextre の場合において、冗長自由度を持つマニピュレータの制御である。

これらの問題に対し、多くの研究がされている。柔軟ベース部の振動問題を解決するため、反動零空間 (Reaction Null Space) [1] を利用した無反動制御や反動補償制御が提案され効果が確認されている [1-5]。また、柔軟ベース部において冗長自由度を利用した研究として、作業空間フィードバック制御を利用した4自由度マニピュレータの制御が行われている [6]。機構的な特異点の問題と冗長自由度を利用した制御として、7自由度マニピュレータに特異点適合法を適用し、特異点上においても冗長運動の制御が可能なが確認されている [7, 8]。

我々は、柔軟ベース上において2自由度マニピュレータを遠隔操作し、無反動制御や振動抑制制御を用いて柔軟ベース部の振動問題、特異点適合法を用いて機構的な特異点問題について有効なが確認した [4]。

本論文では、冗長自由度を利用し特異点適合法 [7, 8] を用いて、マニピュレータ先端の制御と無反動制御を同時に行う手法を紹介する。

2 研究背景

2.1 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、以下のよう表すことができる。

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

ここで、ベース部先端の並進速度を v_b 、姿勢角速度を ω_b とし、 $\dot{x}_b = (v_b^T, \omega_b^T)^T$ とする。ただし、行列の表記に使用されている n は関節角度の自由度数、 m は作業座標の自由度数である。

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

$H_m \in R^{n \times m}$: 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干渉慣性行列

$c_m \in R^n$: 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

$\Delta x_b \in R^m$: ベース部変位

2.2 無反動制御

無反動制御は、反動零空間という概念に基づきマニピュレータを動作させ、ベース部に反力を生じさせない制御法である。マニピュレータの動作により生じる反力 F は

$$H_{bm} \ddot{\theta} + \dot{H}_{bm} \dot{\theta} = F \quad (2)$$

となる．さらに，式 (2) を時間積分すると

$$H_{bm}\dot{\theta} = L \quad (3)$$

が求まる． L は干渉運動量と呼ばれるものである．式 (3) を関節角速度について解くと

$$\dot{\theta} = H_{bm}^+ L + (I - H_{bm}^+ H_{bm})\xi \quad (4)$$

となる． $(I - H_{bm}^+ H_{bm})$ は反動零空間 [1] と呼ばれるものであり， I は単位行列， ξ は任意のベクトルである．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 実験装置

3.1 実験装置概要

FSMS の簡単化モデルとして，柔軟ベース上に 3 リンクマニピュレータが取り付けられた，柔軟ベース上冗長マニピュレータシステム TREP-R の写真を Fig.1 に示す．

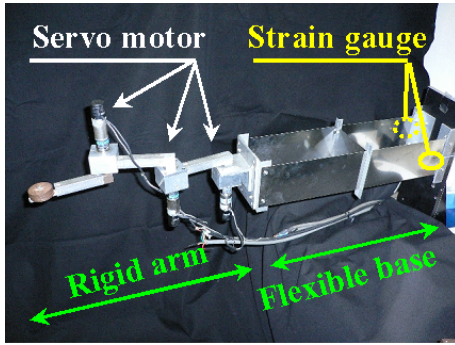


Fig.1: TREP-R experimental system.

TREP-R は，ジョイスティックの速度制御信号により遠隔操作する．

3.2 TREP-R の動力学モデル

Fig.2 に 3 リンクマニピュレータの動力学モデルを示す．

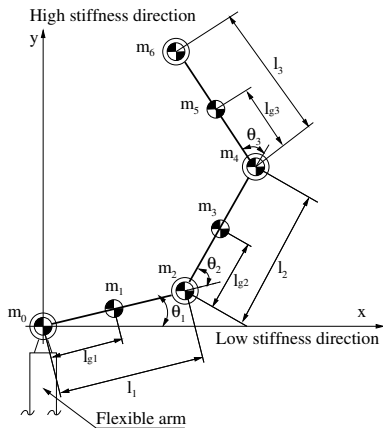


Fig.2: Redundant manipulator FSMS.

θ は各関節角度， l は各リンクの長さ， l_g は各リンクの根本から重心位置までの長さ， m は各重心の質量を表す．

地上では重力の影響を無視することは難しいため，TREP-R の動力学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．座標系は，低剛性方向を x ，高剛性方向を y とする．TREP-R 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，回転方向は反時計回りが正である．

3.3 冗長マニピュレータの運動学

2 自由度の平面上において，3 リンクマニピュレータを動作させる場合，作業座標は 2 自由度，関節角度は 3 自由度となる．このように，作業座標より関節角度のほうが大きくなる場合，マニピュレータは冗長マニピュレータと呼ばれる．マニピュレータの手先速度 \dot{x} と関節角速度 $\dot{\theta}$ の関係をヤコビ行列 J を用いて表すと次のようになる．

$$\dot{x} = J\dot{\theta} \quad (5)$$

TREP-R では，3 リンクマニピュレータを平面上で動作させる．そのため，ヤコビ行列 J は 2×3 行列となる．

3.4 先端の位置制御と無反動制御の組み合わせ

マニピュレータ先端の位置制御と無反動制御を同時に制御する軌道生成の式を考える．

干渉運動量 $L(0) = 0$ とした式 (3) と式 (5) を組み合わせると次のような式が得られる．

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ H_{bm} \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (6)$$

マニピュレータとベース部の慣性干渉行列 H_{bm} は 1×3 行列であるため，組み合わせた行列は 3×3 行列となり逆行列が求められる．しかし，式 (6) をもとに関節角速度を求めると $\det JJ^T = 0$ の場合に機構的な特異点， $\det[J^T \ H_{bm}^T]^T = 0$ の場合に機構的な特異点やアルゴリズム的特異点が存在する．

以下に特異点問題を解決するため，式 (6) をもとに特異点適合法を適用する．

$$A_{rm} = \begin{bmatrix} J & -u \\ H_{bm} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\dot{x} = \nu u \quad (8)$$

式 (7) は，式 (6) の右辺に列拡張ヤコビ行列 [7] を適用したものであり， 3×4 行列となる．また，手先速度 \dot{x} を大きさ ν ，単位方向ベクトル u とする．

$$A_{rm} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \nu \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

式 (7)，式 (8) において，式 (9) を満たす時， A_{rm} を Mathematica の NullSpace を用いて解析すると零空間ベクトル $f_{rm} \in \mathcal{N}(A_{rm})$ が求まる．

$$f_{rm} = \{f_{rm1}/c \ f_{rm2}/c \ f_{rm3}/c \ f_{rm4}\} \quad (10)$$

式 (10) を [7, 8] で示す手法で関節角速度を求めると次のようになる．

$$\dot{\theta} = \sigma b_{rm} \bar{f}_{rm} \quad (11)$$

$$\bar{f}_{rm} = \{f_{rm1} \ f_{rm2} \ f_{rm3}\} \quad (12)$$

σ を正負を表す単位量 ($\sigma = \pm 1$)， b を大きさを表す正のスカラ値とする．ここで，手先速度 \dot{x} の大きさ ν を含めた値として， b_{rm} を任意な正の値とする．式 (11) を各関節角速度に適用することで，マニピュレータ先端の制御と無反動制御が同時に制御することが可能となる．

4 実験結果

4.1 冗長マニピュレータによる無反動制御

TREP-R の関節角度の初期位置は $\left[\pi/2, 0, 0 \right]$, b_{rm} は 50, 実行時間を 15 s とする. また, ジョイスティックを用いてマニピュレータ先端に任意の軌道を描かせる. Fig.3 に, 冗長マニピュレータにおいて無反動制御を適用した場合の関節角度, 関節角速度, ベース部変位, マニピュレータの重心の位置を示す.

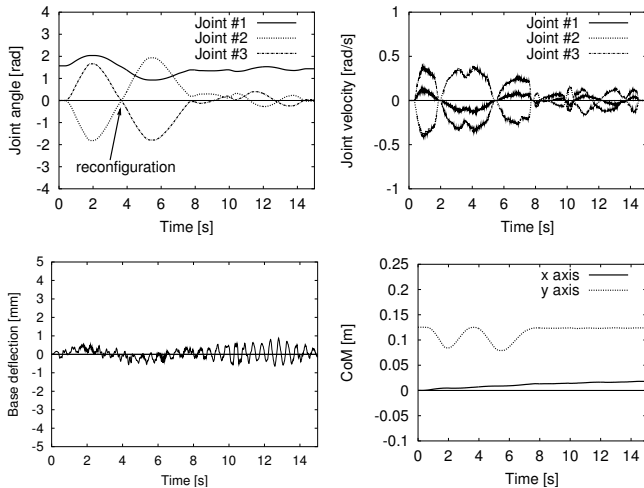


Fig.3: Reactionless teleoperation.

無反動制御は, 反動零空間の概念をもとに制御するため特異姿勢においても動作することができる. これは, Fig.3 左上より, Joint #2 と Joint #3 が 3.7 s 付近で特異点である関節角度 0 rad を通過しているが, そのときの関節角速度は 0 rad/s となっていない. つまり, 特異点でも動作が可能なが確認できる.

Fig.3 左下において, ベース部に大きな振動を発生させずにマニピュレータを動作できていることがわかる. ただし, 0 s から 8 s の間に振動とは異なる波は, 剛体マニピュレータの重さにより柔軟ベース部がねじれているためだと考えられる.

Fig.3 右下において, マニピュレータの重心の位置をほぼ変位させずにマニピュレータが動作していることがわかる. しかし, 重心の位置は完全に静止しておらず x 軸方向に微小に変位していることが確認できるため, フィードバック制御を行いマニピュレータの位置を目標位置に追従させる必要がある.

現段階で柔軟ベース部に大きな振動を生じさせずに, マニピュレータ先端の位置制御ができていることが確認でき, この手法は有効であるといえる. しかし, 柔軟ベース部のねじれ, マニピュレータに対するフィードバック制御などの問題を解決しなければ, 精度の高い実験結果は得られないと考えられる.

5 結論

冗長マニピュレータにおいて, マニピュレータ先端の制御と無反動制御が同時に制御可能なことが確認できた. ま

た, 無反動制御を適用した場合, 特異点及び特異点近傍で安定した動作が確認できた.

6 今後の課題

振動問題のもう 1 つの解決策として振動抑制制御がある. 今後, 冗長自由度を利用して特異点適合法と振動抑制制御を用いて, 生じた振動を抑制しながらマニピュレータ先端を制御する.

文 献

- [1] 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.
- [2] Akio Gouo, Dragomir N. Nenchev, Kazuya Yoshida and Masaru Uchiyama: "Motion control of dual-arm long-reach manipulators," Advanced Robotics, vol. 13, no. 6, pp. 617–631 2000.
- [3] 鷲野誠一郎, Michael Shoemaker, 内山勝: "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.
- [4] 菱沼利光, 阿部崇志, D. N. Nenchev: "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," 第 10 回ロボティクスシンポジウム, 2005. (to be presented)
- [5] 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 Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Nara, Japan, May 19–23, 2003.
- [6] Jun Ueda, Reishi Oya, Tsukasa Ogasawara, and Tsuneo Yoshikawa: "Solution of Human-link Redundant Manipulator Mounted on Flexible Body for Task-space Feedback Control," Proc. of the 2003 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1429–1434, 2003.
- [7] Dragomir N. Nenchev, Yuichi Ysumaki: "Motion Analysis of a Kinematically Redundant Seven-DOF Manipulator Under the Singularity-Consistent Method," Proc. of the 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, September 14–19, 2003, pp. 2760–2765.
- [8] 阿部崇志, D. N. Nenchev, 妻木勇一: "S-R-S マニピュレータの特異点適合法を用いた冗長運動制御," 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, IH23, 2004.