

特異点適合に基づいた 柔軟ベース上冗長マニピュレータの振動抑制制御

武蔵工業大学 菱沼 利光 D.N. ネンチェフ

SC Vibration Suppression Control With a Redundant Manipulator Mounted on a Flexible Base

Toshimitsu HISHINUMA, D. N. NENCHEV, Musashi Institute of Technology

Abstract—This paper describes an experimental system for teleoperation of a redundant manipulator mounted on a flexible base. Kinematic redundancy is resolved with the help of an additional constraint, obtained from vibration dynamics. The problem of kinematic and algorithmic singularities is addressed via the Singularity-Consistent method developed in our previous research. The stability of the system under teleoperation and while moving around algorithmic and kinematic singularities is also demonstrated.

1. 序論

我々は運動学的な冗長性を用いて柔軟ベース上単腕マニピュレータの制御する場合、すべての動作に対して制約を課すことで冗長性を解決している。過去に制約として無反動な動作を適用 [1] したが、振動抑制のための制約を用いることで効率的に無反動な動作を可能となることが確認できた [2]。またこの場合、制約を課すことでアルゴリズム的特異点が存在する。アルゴリズム的特異点を含む特異点問題に対して、特異点適合法 [3] (SC法: Singularity-Consistent method) に基づく統合された制御法を適用する。

2. 冗長自由度を用いた振動抑制制御

運動学的な冗長性を解決する有名な方法は、新たに制約を加えることである [4]。我々は関節角速度に対して振動抑制に関する新たな制約を加えた。

マニピュレータ先端の並進回転の合力を $\nu \in \mathbb{R}^m$ とし、関節角速度をヤコビ行列 $J(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ を用いた場合以下の関係が得られる。

$$\nu = J\dot{q} \quad (1)$$

ここで、 $\nu = \dot{q}_* t$ とする。 t は normalized end-effector twist, \dot{q}_* は大きさである。また、ベース部の変位空間の次元 k は、マニピュレータの冗長自由度と同等 ($k = n - m$) であると仮定する。ベース部の振動に対してマニピュレータの重心を制御する振動抑制制御の関節角速度に関する式を以下のように示す [5]。

$$H_{bm}\dot{q} = G_b x_b \quad (2)$$

式中の G_b は位置フィードバックゲイン, $H_{bm} \in \mathbb{R}^{k \times n}$ は慣性干渉行列, x_b はベース部変位である。先端を速度制御する式 (1) と式 (2) を結合すると以下の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \nu \\ G_b x_b \end{bmatrix} = J_{vs} \dot{q} \quad (3)$$

ここで、 $J_{vs} = \begin{bmatrix} J^T & H_{bm}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ であり、 $\det J_{vs} = 0$ となる場合、キネマティック特異点を含

む新たな制約が影響を与えるアルゴリズム的特異点が存在する。この特異点問題に対して、我々は式 (3) に特異点適合法を適用し、以下のように列拡張ヤコビ行列を求めた。

$$\bar{J}_{vs} \dot{q} = \begin{bmatrix} J & -t & 0 \\ H_{bm} & 0 & -G_b x_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{q}_* \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

\bar{J}_{vs} の零空間の射影行列は次のように求められる。

$$\bar{n}_{vs} = [\bar{n}_m \quad \bar{n}_b] \quad (5)$$

$$\bar{n}_m = [n_m^T \quad \det J_{vs} \quad 0]^T \in \mathbb{R}^{n+2} \quad (6)$$

$$\bar{n}_b = [n_b^T \quad 0 \quad \det J_{vs}]^T \in \mathbb{R}^{n+2} \quad (7)$$

式 (4) の解は以下ようになる。

$$\dot{q} = b_m \bar{n}_m + b_b \bar{n}_b \quad (8)$$

ただし、 b_m, b_b は任意のスカラー量とする。また、式 (8) を展開すると以下ようになる。

$$\dot{q} = b_m n_m + b_b n_b \quad (9)$$

$$\dot{q}_* = b_m \det J_{vs} \quad (10)$$

$$1 = b_b \det J_{vs} \quad (11)$$

式 (9) において、特異点から離れている場合は式 (10)、式 (11) より b_m, b_b を求める。特異点近傍では、 b_m, b_b を適当な一定値に切り替えることにより安定した動作が可能となる。また、特異点を通過するため、 $b_m = \sigma_m |b_m|$, $b_b = \sigma_b |b_b|$ とし正負の単位量を示す σ_m, σ_b を調整する必要がある [6]。

3. 実験結果

3.1 冗長マニピュレータによる振動抑制制御

使用する実験装置 TREP-R は、3 自由度の 3 リンクマニピュレータを 2 自由度の平面上を動作させるため、1 つの冗長自由度を持つ構造となっている。TREP-R に式 (9) を適用すると以下の式が得られる。

$$\dot{q} = -\text{adj} J_{vs} \begin{bmatrix} \sigma_m |b_m| t \\ \sigma_b |b_b| g_b x_b \end{bmatrix} \quad (12)$$

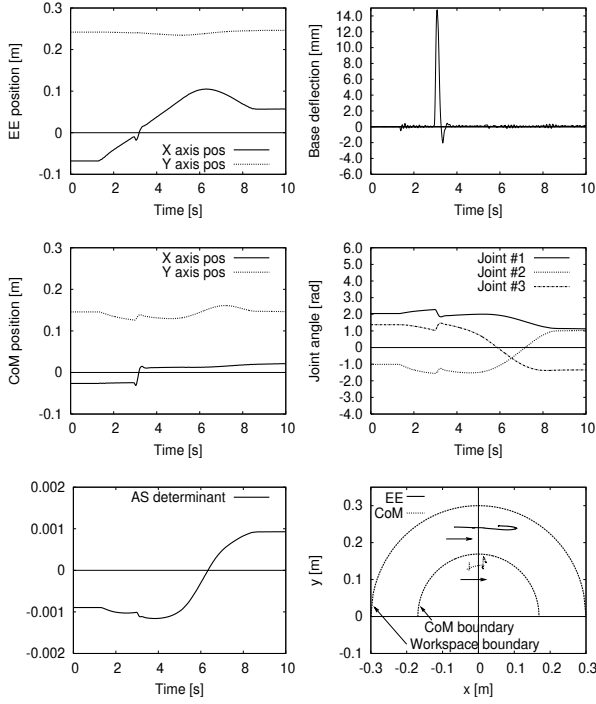


Fig.1 Data from Experiment 1.

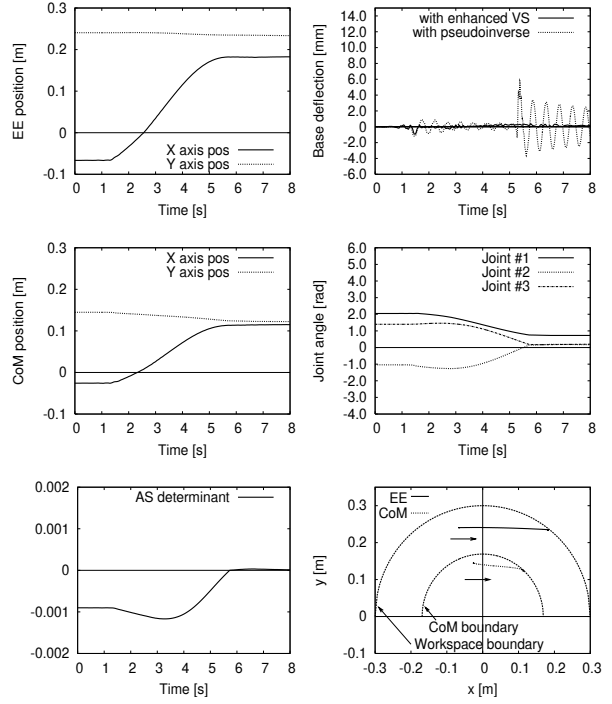


Fig.2 Data from Experiment 2.

マニピュレータ先端の動作時にベース部に力を加えた場合とアルゴリズム的特異姿勢を通過させた場合を実験1としてFig. 1に示す。ただし、 b_m , b_b は一定の値として使用する。Fig. 1上段左右の3s付近より、マニピュレータ先端の制御時にベース部に力を加えた場合でも、セルフモーションによって先端に大きな影響を与えずに振動抑制が可能であることが確認できる。また、4s以降に関してはベース部に振動を生じさせずに先端を動作可能であり、無反動制御と同等の能力を持つことがわかる。Fig. 1下段左のアルゴリズム的特異点通過時に σ_b の正負を切り替えることにより通過後も安定した動作が可能となる。しかし、アルゴリズム的特異点を通過後にマニピュレータ先端が逆方向に動作する(上段左)。また、Fig. 1下段右より作業範囲限界線に到達する前に先端方向が変化している。

3.2 拡張された振動抑制制御

上記の先端の作業範囲が制限される原因として、重心を柔軟方向(x方向)に動作しないように制御をしているためである。そこで、マニピュレータ動作時に重心をx方向に動作させることができる以下の式を提案する。

$$\dot{\mathbf{q}} = -\text{adj} \mathbf{J}_{vs} \begin{bmatrix} \sigma_m |b_m| \mathbf{t} \\ \sigma_b |b_b| (g_b \mathbf{x}_b + k_e \dot{\mathbf{p}}_d^x) \end{bmatrix} \quad (13)$$

k_e はゲイン定数、 $\dot{\mathbf{p}}_d^x$ は指令手先速度のx方向の成分である。初期姿勢を実験1と同じとし、式(13)を用いた場合を実験2としてFig. 2に示す。

Fig. 2上段左、中段左より、マニピュレータ先端と重心を同時に制御していることが確認できる。同時に制御することで、Fig. 2下段右より作業範囲限界まで到達することが可能となった。また、Fig. 2下段左より、式(13)を用いて重心の振動抑制制御と重心の移動制御を行うことにより、アルゴリズム的特異姿勢から遠ざかり

ながらマニピュレータ先端の制御を行っていることが確認できる。つまり、アルゴリズム的特異姿勢にならないため、常に振動抑制が行える可能性がある。柔軟ベース部に与える影響は、Fig. 2上段右よりFig. 1上段右と同等の結果が得られている。

4. 今後の課題

本論文では、マニピュレータ先端の操作時にアルゴリズム的特異姿勢を回避することが可能なことを示した。今後、マニピュレータ先端と重心の制御を効率的に行えるようにする。

参考文献

- [1] 菱沼利光, 阿部崇志, D. N. Nenchev: “柔軟ベース上冗長マニピュレータの遠隔操作,” 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, 1A1-S-053, 2005.
- [2] 菱沼利光, D. N. Nenchev: “特異点適合法に基づいた柔軟ベース上冗長マニピュレータの振動抑制制御,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集, 1A1B07, 2006.
- [3] D. N. Nenchev, Y. Tsumaki and M. Uchiyama: “Singularity-Consistent Parameterization of Robot Motion and Control,” The Int. J. of Robotics Research, Vol. 19, No. 2, pp. 159–182, February, 2000.
- [4] D. N. Nenchev: “Redundancy Resolution through Local Optimization: a Review,” J. Rob. Syst., Vol. 6, No. 6, pp. 769–798, 1989.
- [5] D. N. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat and M. Uchiyama: “Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems,” IEEE Tr. on Rob. and Automation, Vol. 15, No. 6, pp. 1011–1023, December 1999.
- [6] 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応遠隔操作,” 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 195–204, 1998.