

## 2 リンク柔軟マニピュレータの省エネルギー駆動のさらなる発展

旭川工業高等専門学校 専攻科 ○加藤 圭吾, 阿部 晶

### 要旨

本研究では、2リンク柔軟マニピュレータの Point-to-Point (PTP) 制御問題を扱い、省エネルギーフィードフォワード振動制御を目的とした軌道計画法を提案する。ここで扱う2リンク柔軟マニピュレータは、一端が固定された柔軟リンクの先端に回転関節を有する1リンク柔軟マニピュレータを設置したものであり、1つの回転関節の運動から2つのリンクの振動を消費エネルギーで抑制することが本研究の特徴である。数値シミュレーションを実施し、提案手法の省エネルギー効果について検討する。

### 1. はじめに

本研究では、一端が固定された柔軟ベース上に設置された柔軟マニピュレータの省エネルギー軌道計画法に関する研究を試みる。具体的には、柔軟マニピュレータの PTP 制御問題を扱い、柔軟ベースと柔軟マニピュレータの振動を抑制させ、かつ、駆動エネルギーを最小化するマニピュレータの旋回角軌道に粒子群最適化を適用して生成する。なお、本手法で得られた軌道に沿ってマニピュレータを旋回させると、駆動エネルギーを最小化しつつ残留振動が抑制される仕組みとなっている。すなわち、本手法はフィードフォワード制御に属する。数値シミュレーションならびにモデル実験から有効性を確認した先行研究<sup>(1)</sup>のさらなる進展として、軌道生成関数の入力関数を変更し、さらなる省エネルギー化の効果を検証する。

### 2. 2リンク柔軟マニピュレータ

図1は本研究で扱う柔軟ベースに搭載された柔軟マニピュレータを示している。図1のように柔軟ベースの固定端を原点として $(x_1, y_1)$ を基準座標、柔軟マニピュレータの固定部を原点として $(x_2, y_2)$ を回転座標としている。 $w_1$ と $w_2$ はそれぞれ柔軟ベースと柔軟マニピュレータのたわみである。 $x_1$ 軸と $x_2$ 軸のなす角から柔軟ベースのたわみ角 $\partial w_1(l_1, t)/\partial x_1$ を引いたものを関節角 $\theta(t)$ と定義する<sup>(2)</sup>。本研究では、柔軟マニピュレータは、塑性変形を起こさず、大きな弾性変形が可能であると仮定し、非線形方程式<sup>(2)</sup>を簡便化した以下の運動方程式<sup>(1)</sup>を用いることとする。

$$\ddot{W}_2 + 2\zeta\omega\dot{W}_2 + \omega^2 W_2 + \beta_1\ddot{\theta} + \beta_2\dot{\theta}^2 W_2 + \gamma_1\dot{W}_1 = 0 \quad (1)$$

$$\ddot{W}_1 + \gamma_2\dot{W}_2 + \gamma_3\dot{W}_1 + \gamma_4 W_1 + \gamma_5\ddot{\theta} = 0 \quad (2)$$

一方、柔軟マニピュレータを駆動するモータのトルクは次式で表される。

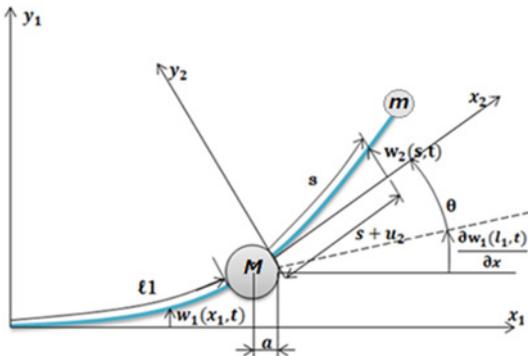


Fig 1 Schematic diagram of flexible Manipulator mounted on flexible base.

Table 1 Parameters of equations

Parameter	Value	Parameter	Value
$\alpha_1$	$1.980 \cdot 10^2 [\text{kgm}^2]$	$\gamma_1$	$2.349 \cdot 10^{-1} [-]$
$\alpha_2$	$6.525 \cdot 10^2 [\text{kgm}]$	$\gamma_2$	$2.678 \cdot 10^2 [-]$
$c$	$7.471 \cdot 10^2 [\text{Nms}]$	$\gamma_3$	$1.752 \cdot 10^{-1} [\text{s}^{-1}]$
$\zeta$	$5.816 \cdot 10^{-3} [-]$	$\gamma_4$	$66.342 [\text{s}^{-2}]$
$\beta_1$	$3.146 \cdot 10^{-1} [\text{m}]$	$\gamma_5$	$5.234 \cdot 10^2 [\text{m}]$
$\beta_2$	$2.75 \cdot 10^{-3} [-]$	$\gamma_6$	$2.959 \cdot 10^{-3} [\text{kgm}]$
$\omega$	$7.832 [\text{rad/s}]$		

$$\tau = \alpha_1\ddot{\theta} + \alpha_2\ddot{W}_2 + c\dot{\theta} + \gamma_6\dot{W}_1 \quad (3)$$

なお、式(1)–(3)中の係数は表1で与えられる。

### 3. 軌道計画法

本研究では、駆動時間 $T_E$ で初期角度 $\theta_S$ から目標角度 $\theta_E$ まで旋回させる PTP 問題を考え、旋回後の柔軟ベースと柔軟マニピュレータの振動を抑制する軌道を粒子群最適化によって求める。関節角軌道 $\theta_{opt}(t)$ は次式のサイクロイド関数の入力 $u(t)$ をガウス関数で与えることで表現する。

$$\theta_{opt}(t) = (\theta_E - \theta_S) \left\{ u(t) - \frac{\sin(2\pi u(t))}{2\pi} \right\} + \theta_S \quad (4)$$

$$u(t) = \frac{t}{T_E} + (1 - T^2) \sum_{n=1}^N W_n \exp \left[ -\frac{(T - c_n)^2}{\sigma_n^2} \right] \quad (5)$$

ここで、 $T = -1 + 2t/T_E$ であり、 $t$ は時間である。本研究では式(5)の項数 $N=2$ と設定した。式(4)により生成される軌道 $\theta_{opt}(t)$ は、ガウス関数内の $W_n$ 、 $c_n$ 、 $\sigma_n$ の計6個のパラメータに依存することとなる。そこで、式(4)によって得られる軌道を用い、マニピュレータの運動方程式を数値積分し、位置決めから2秒後までに生じたトルクの総和を求める。ここで、トルクの総和とは0.002秒間ごとのモータにかかるトルクの絶対値の総和である。そのトルクの総和が最小化されるよう粒子群最適化<sup>(4)</sup>を適用し、 $W_n$ 、 $c_n$ 、 $\sigma_n$ の計6個のパラメータチューニングをして最適軌道 $\theta_{opt}(t)$ を求めた。なお、モータトルクの総和の最小化から残留振動抑制と駆動エネルギー最小化の両立が達成できる<sup>(3)</sup>。一方、先行研究<sup>(1)</sup>におけるサイクロイド関数への入力 $u(t)$ はべき級数となっており、次式で表される。

$$u(t) = \frac{t}{T_E} + (1 - T^2) \sum_{n=1}^N a_n T^{n-1} \quad (6)$$

このべき級数の項数は $N=6$ を採用しており<sup>(1)</sup>、チューニングするパラメータ $a_n$ も6個となっており、本研究ものとその個数は一致する。

#### 4. シミュレーション結果および考察

本研究で提案した軌道計画法の残留振動抑制効果および省エネルギー化の有効性を確認するために、サイクロイド曲線軌道、先行研究<sup>(1)</sup>によるべき級数を用いた軌道、およびガウス関数を用いた本手法の数値シミュレーション結果を比較する。初期角度  $\theta_s=0$ 、目標角度  $\theta_E=-\pi/4[\text{rad}]$ 、駆動時間  $T_E=0.8[\text{s}]$  の条件のもとで動作させた際のマニピュレータの角速度  $\omega$ 、マニピュレータのたわみ  $w_2$ 、ベースのたわみ  $w_1$ 、およびモータトルク  $\tau$  をそれぞれ図 2 の(a)~(d)に示す。図 2 の(a), (c)および(d)より、先行研究および本手法によるシミュレーション結果には大きな差は見られず、本手法および先行研究のシミュレーション結果は位置決め後、すなわち、 $t=0.8[\text{s}]$ 以降で残留振動およびモータにかかるトルクが十分に抑制できていることがわかる。また、図 2 の(c)から、本手法は先行研究に比べ、残留振動の抑制効果が向上したことが確認できる。

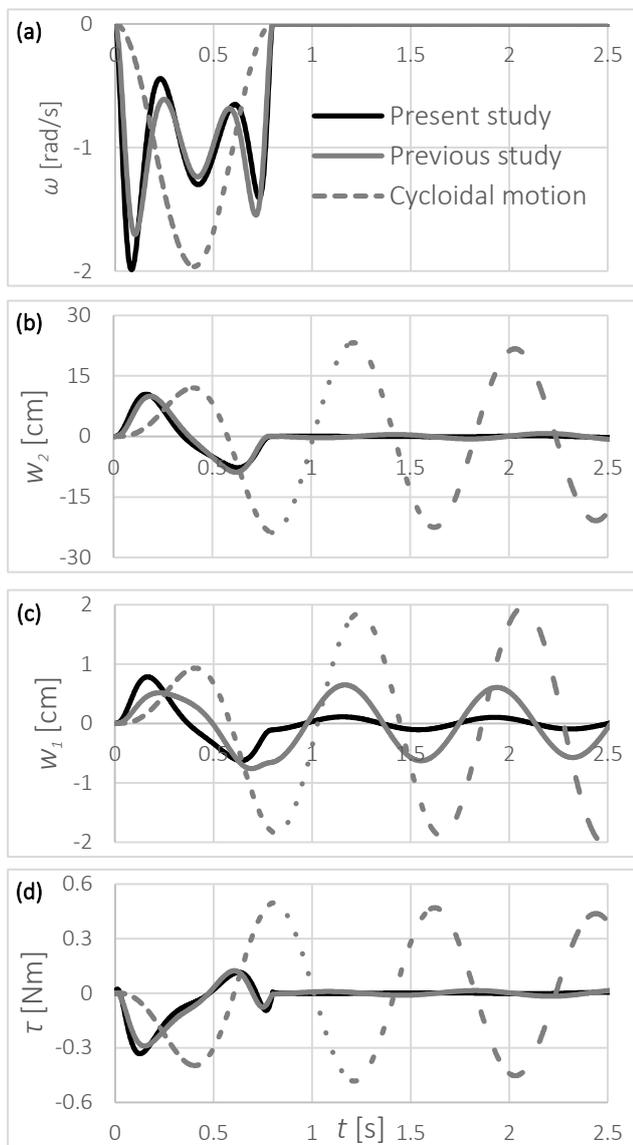


Fig 2 Comparison of the simulation results obtained from the present method, previous method and cycloidal motion ( $T_E=0.8$  [s],  $\theta_s=0$ ,  $\theta_E=-\pi/4$  [rad]) (a) angular velocity, (b) tip displacement of the flexible manipulator, (c) tip displacement of the flexible base, and (d) motor torque.

次に、マニピュレータの旋回中にモータが消費するエネルギーについての比較結果を図 3 に示す。横軸がマニピュレータの駆動時間  $T_E$  [s]、縦軸が駆動中の消費エネルギーとなっている。本手法および先行研究ではサイクロイド曲線軌道と比較し、どの駆動条件においても十分な省エネルギー化の効果を確認できる。本手法は様々な駆動条件下において、先行研究よりも高い残留振動の抑制効果および省エネルギー効果を確認している。また、 $T_E=0.8$  [s]の消費エネルギーは本手法および先行研究の結果がほぼ等しくなっている。しかし、図 2 で示した通り、本研究はより高い残留振動抑制効果を有しており、先行研究に対しての優位性が見て取れる。

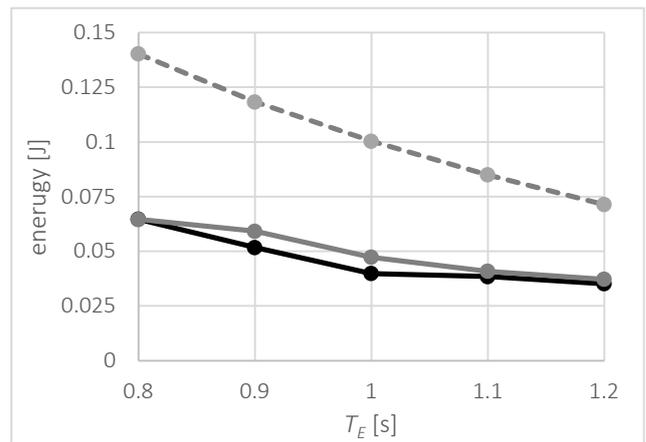


Fig 3 Comparison of simulation results for the consumption energy until the positioning obtained from the present method, previous method, and cycloidal motion.

#### 5. おわりに

本研究では、粒子群最適化を活用し、柔軟ベース上に搭載された柔軟マニピュレータの PTP 制御における振動の抑制およびさらなる省エネルギー化を試みた。実現性が認められた先行実験<sup>(1)</sup>に用いられていた関節角軌道生成式に修正を加えることで、残留振動および消費エネルギーにおいて、先行研究よりも良好な結果が得られており、本手法の有効性が認められた。以上の結果から、本研究が提案するガウス関数を用いた最適軌道計画は柔軟ベースおよび柔軟マニピュレータの残留振動抑制およびさらなる省エネルギー化に有効である。

#### 参考文献

- (1) 加藤圭吾, 阿部晶, “2 リンク柔軟マニピュレータの省エネルギー軌道計画法”, 計測自動制御学会第 4 回制御部門マルチシンポジウム, (2017).
- (2) Abe A. and Kohari Y., “A study of optimal trajectory generation for flexible manipulator mounted on flexible link”, Proceeding of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, (2015), 8 Pages.
- (3) 阿部晶, “駆動トルクに着目したフレキシブルマニピュレータの軌道計画”, 日本機械学会論文集 C, Vol. 74, No 745 (2008), pp. 2246–2253.
- (4) Clerc, M. and Kennedy, J., “The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.1 (2002), pp. 58–73.