

フレキシブルマニピュレータの2段階軌道生成法の提案 (省エネルギー化への検討)

旭川工業高等専門学校 ○森脇 大, 阿部 晶

要旨

本研究では, 1リンクフレキシブルマニピュレータの 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2段階軌道計画法を提案する. 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

著者らはフレキシブルリンクから構成されるマニピュレータの Point-to-Point (PTP) 制御問題を扱い, 駆動エネルギーと残留振動を同時に最小化する多目的最適化に基づく軌道計画法, すなわち, フィードフォワード振動制御法を提案してきた[1, 2]. ここで得られた最適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. 先行研究[3]においては, 柔軟性の物理的な現象に着目して, フレキシブルマニピュレータの2段階軌道計画法を提案した. そして, 数値シミュレーションから, 従来手法よりもさらなる省エネルギー化が図られることを明らかにした. 本研究では, 先行研究の2段階軌道計画法を発展させた省エネルギーフィードフォワード振動制御法を提案する. 数値シミュレーションを実施し, 提案手法の有効性を検証する.

2. 1リンクフレキシブルマニピュレータ

本研究で扱うフレキシブルマニピュレータ[1]のモデル図を図1に示す. 図中の θ はマニピュレータの関節角, w は変位を示している. なお, 実験装置では, 長さ×幅×厚さ=475 mm×50 mm×1 mm の真鍮製のりをフレキシブルマニピュレータとしてみなし, その先端には質量 35.9 g の集中質量が取り付けられている. この系の運動方程式は次のとおりである.

$$\alpha_1 \ddot{\theta} + \alpha_2 \ddot{W} + c \dot{\theta} = \tau \quad (1)$$

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

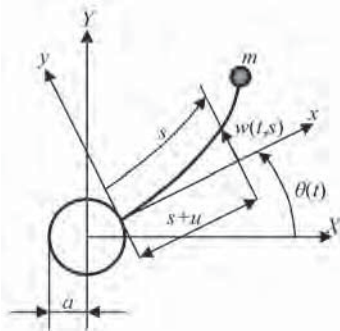


Fig. 1: Schematic of a single-link flexible manipulator.

Table 1 Parameters of equations

Parameter	Value
α_1	2.383×10^{-2} [kgm ²]
α_2	9.261×10^{-2} [kgm]
c	3.091×10^{-2} [Nms]
ζ	9.636×10^{-3} [-]
β_1	2.555×10^{-1} [m]
β_2	2.614×10^{-1} [-]
ω	10.43 [rad/s]

ここで, 式(1), (2)はそれぞれマニピュレータの回転運動およびフレキシブルリンクの振動を表しており, W は1次振動モードの振幅, τ はモータの駆動トルクである. この2つの方程式中の係数は表1で与えられる.

3. 2段階軌道計画法

マニピュレータを時間 T_E で目標角度 θ_E まで回転させる PTP 制御問題に対し, 下記の2段階軌道計画法を適用する[3]. マニピュレータ関節角の最適化軌道 $\theta_{opt}(t)$ は次式のサイクロイド関数から生成される.

$$\theta_{opt}(t) = \bar{\theta}_E \left\{ u(t) - \frac{\sin[2\pi u(t)]}{2\pi} \right\} + \bar{\theta}_S \quad (3)$$

ここで, 2段階軌道計画法として $\bar{\theta}_E, \bar{\theta}_S$ および入力 $u(t)$ を次式のように与える.

$$0 \leq t \leq T_0 : \bar{\theta}_E = \theta_0, \bar{\theta}_S = 0, u(t) = \frac{t}{T_0} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} T_0 \leq t \leq T_E : \bar{\theta}_E = \theta_E - \theta_0, \bar{\theta}_S = \theta_0 \\ u(t) = \frac{t - T_0}{T_E - T_0} + (1 - T^2) \sum_{n=1}^N a_n T^{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで,

$$0 \leq \theta_0 < \theta_E, 0 \leq T_0 < T_E, T = -1 + \frac{2(t - T_0)}{T_E - T_0} \quad (6)$$

と定義されている. 式(4)は時間 T_0 , 角度 θ_0 までサイクロイド曲線で旋回することを意味している. これにより, フレ

キシブルマニピュレータを負の方向にたわませ、駆動エネルギー抑制を試みている[3]。一方、式(5)に示されるように時間 T_0 から T_E まで入力 $u(t)$ をべき級数で与えて目標角度 θ_E までの軌道を生成させる。この区間で残留振動を抑制させる軌道生成を試みている。この場合、関節角軌道 $\theta_{opt}(t)$ は式(4)の T_0, θ_0 ならびに式(5)のべき級数の係数 a_n に依存することとなる。以下に省エネルギー残留振動抑制軌道の生成法の概要を示す。

最適化される探索パラメータを式(4)の T_0, θ_0 と式(5)の係数 $a_n (n=1, 2, \dots, N)$ と設定し、式(3)–(6)から関節角軌道 $\theta_{opt}(t)$ を生成する。この軌道に基づいて式(2)を数値積分し、フレキシブルリンクのダイナミクスを求める。次いで、式(2)の数値積分結果を用いて式(1)の逆動力学解析から駆動トルク τ を求める。駆動エネルギー最小化と残留振動抑制の両立を図るために、評価関数 F を

$$F = \sum_{m=1}^M |\tau_m| \quad (7)$$

と設定する。ここで、 τ_m は数値積分の時間刻み幅 $\Delta t = 2 \text{ ms}$ ごとの駆動トルクを示しており、 M は $M = (T_E+1)/\Delta t$ と定義されている。したがって、 F はマニピュレータ駆動開始から位置決め時間 $T_E+1 \text{ s}$ までの駆動トルクの総和を意味している。このように、マニピュレータ旋回終了後から 1 s までの駆動トルクを考慮することによって、省エネルギーのみならず残留振動抑制が達成できる[4]。そして、式(7)の評価関数が最小化されるよう粒子群最適化(PSO)を適用し、探索パラメータをチューニングする。この評価関数の最小化の結果から、省エネルギー残留振動抑制軌道が生成される。

4. シミュレーション結果および考察

以下に示すシミュレーションでは、粒子群最適化の個体数を 50、反復回数を 100 とし、最適化されるパラメータの範囲を

$$T_0 \in [0.10, 0.25], \theta_0 \in [0, \pi/18], a_n \in [-0.3, 0.3] \quad (8)$$

と設定し、べき級数の項数は $N=4$ とした。駆動条件は $T_E = 0.8 \text{ s}$ 、 $\theta_E = \pi/6 \text{ rad}$ を採用した。

図 2 は本手法で得られた最適化軌道とサイクロイド曲線軌道($T_0=\theta_0=a_n=0$)との比較である。図 2(c)に示されるように、サイクロイド曲線では位置決め後 0.8 s 以降に大きな残留振動が発生するが、本手法では残留振動が完全に抑制されている。また図 2(d)より、サイクロイド曲線では位置決め後に残留振動に対してマニピュレータを目標角 $\theta_E = \pi/6 \text{ rad}$ に保持するためのトルクが発生している。式(7)の評価関数では位置決め後の駆動トルクも考慮しており、この保持トルクの最小化から残留振動抑制が達成されている。駆動エネルギーの比較を表 2 に示す。なお、駆動エネルギーは

$$E = \int_0^{\theta_E} |\tau| d\theta \quad (9)$$

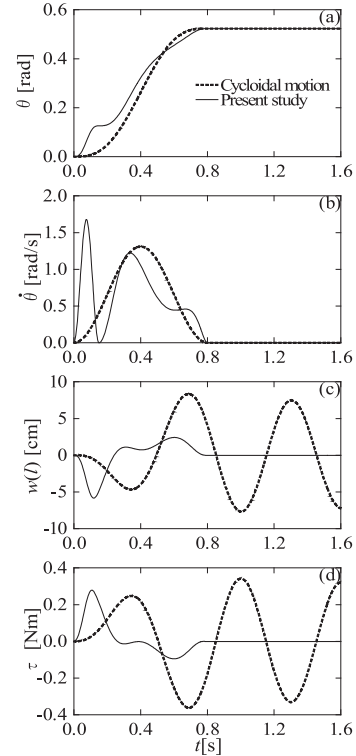


Fig. 2: Comparison of the simulation results obtained by the present method and those obtained by Cycloidal motion ($\theta_E = \pi/6 \text{ rad}$, $T_E = 0.8 \text{ s}$): (a) joint angle, (b) angular velocity, (c) tip displacement, and (d) motor torque.

Table 2 Comparison of driving energy E [J]

Cycloid	Ref. [3]	Present method
9.13×10^{-2}	4.12×10^{-2}	3.61×10^{-2}

と定義されている。先行研究[3]では、 $T_0 = 0.15 \text{ s}$ 、 $\theta_0 = \pi/36 \text{ rad}$ と固定し、残留振動抑制および駆動エネルギー最小化の多目的最適化からべき級数の係数 a_n をチューニングさせて軌道を得た。表 2 に示されるように、本手法のものは先行研究よりもその値は小さく、エネルギー削減効果が表れている。ゆえに、式(4)の T_0, θ_0 のパラメータチューニングならびに式(7)の評価関数の最小化は、フレキシブルマニピュレータの省エネルギー残留振動抑制のための軌道生成法に有効といえる。

参考文献

- [1] Abe A. and Kimuro K., Minimum energy trajectory planning for vibration control of a flexible manipulator using a multi-objective optimization approach, International Journal of Mechatronics and Automation, Vol.2, No.4, 286/294, (2012)
- [2] 阿部 晶, 柔軟構造物の省エネルギーフィードフォワード制御, 第 57 回自動制御連合講演会論文集, 623/627, (2014)
- [3] 阿部 晶, フレキシブルマニピュレータの 2 段階軌道生成法の提案, 第 48 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, 21/22, (2016)
- [4] 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 編, Vol.74, No.745, 2246/2253, (2008)