

1 リンク柔軟マニピュレータの省エネルギー駆動に関する一考察

(多目的最適化からのアプローチ)

○阿部 晶 (旭川高専)

A Study on Saving Energy Driving for One-Link Flexible Manipulator

(An Approach from Multi-objective Optimization)

○Akira ABE (NIT, Asahikawa College)

Abstract: This paper presents a proposal for a feedforward control technique for a flexible manipulator to suppress the residual under the minimum driving energy. In the proposed method, the trajectory profile of the PTP motion is generated through a cycloidal function whose input is the output of Gaussian functions. The maximum residual vibration amplitude and the driving energy are adopted as the objective functions, and then the parameters of the Gaussian functions are tuned by a multi-objective genetic algorithm, and then the optimal trajectory can be obtained. Numerical results demonstrate that further energy saving is achieved by utilizing the large amplitude vibration during the PTP motion.

1. 概要

本研究で扱う 1 リンク柔軟マニピュレータのモデル図を図 1 に示す. この系の運動方程式は

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

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

と与えられる^[1]. ここで, θ はマニピュレータの関節角, W は 1 次振動モードの振幅, τ は駆動トルクを示している.

本研究では, 柔軟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 制御問題を扱い, そのときに発生する残留振動を抑制させ, かつ, 消費エネルギーを最小化する関節角軌道の生成を目的とする. 以下, この軌道を最適軌道 $\theta_{opt}(t)$ と称する. 最適軌道 $\theta_{opt}(t)$ は次式のサイクロイド関数とガウス関数の結合から生成される^[2]. すなわち,

$$\theta_{opt}(t) = \theta_E \left\{ u(t) - \frac{\sin[2\pi u(t)]}{2\pi} \right\} \quad (3)$$

$$u(t) = \frac{t}{T_E} + (1 - T^2) \sum_{n=1}^N W_n \exp \left[-\frac{(T - c_n)^2}{\sigma_n} \right] \quad (4)$$

ここで, $T = -1 + 2t/T_E$ と定義されている. 式(3)から生成される関節角軌道 $\theta_{opt}(t)$ は式(4)の W_n , c_n ならびに σ_n に依存することとなる.

先行研究[1]では, 式(3), (4)の軌道生成法を採用し, 駆動と保持トルクの総和の最小化を目的として係数 W_n , c_n および σ_n をチューニングした. その結果, 1 つの目的関数の最小化より, 残留振動を抑制しつつ, 駆動中のマニピュレータの振幅を積極的に活用することで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.

本研究では式(3), (4)の軌道生成法の妥当性を再確認するために, 残留振動抑制と駆動エネルギー最小化の観点から, 2 つの目的関数 F_1 と F_2 を次式のように定義する.

$$F_1 = |W_{\max}|, \quad F_2 = \int_0^{\theta_E} |\tau| d\theta \quad (5)$$

ここで, $|W_{\max}|$ は位置決め後のマニピュレータの最大振幅, F_2 は旋回開始から時間 T_E までの駆動エネルギーを表している. 式(5)の 2 つの目的関数を同時に最小化するよう多目的遺伝的アルゴリズム(NSGA-II)^[3]を適用し, パラメータ W_n , c_n , σ_n をチューニングして最適軌道を求める. そして, 駆動中のマニピュレータの振幅の積極的な活用から, 省エネルギー化が図られることを確認する.

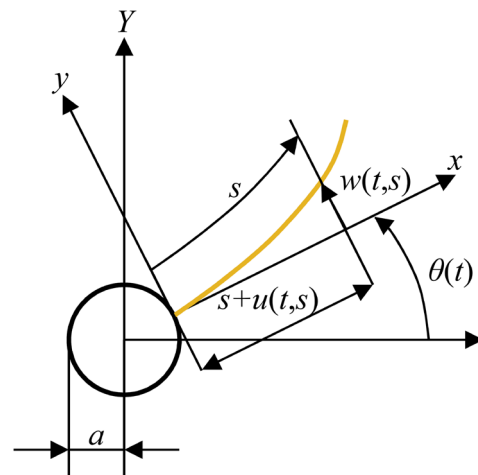


Fig. 1: Schematic diagram of a flexible manipulator.

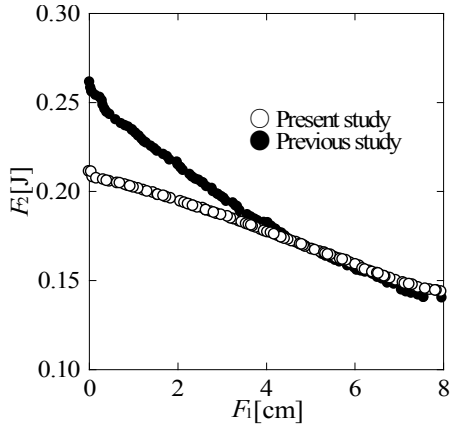


Fig. 2: Comparison of Pareto optimal solutions ($T_E = 0.8$ [s] and $\theta_E = \pi/2$ [rad]).

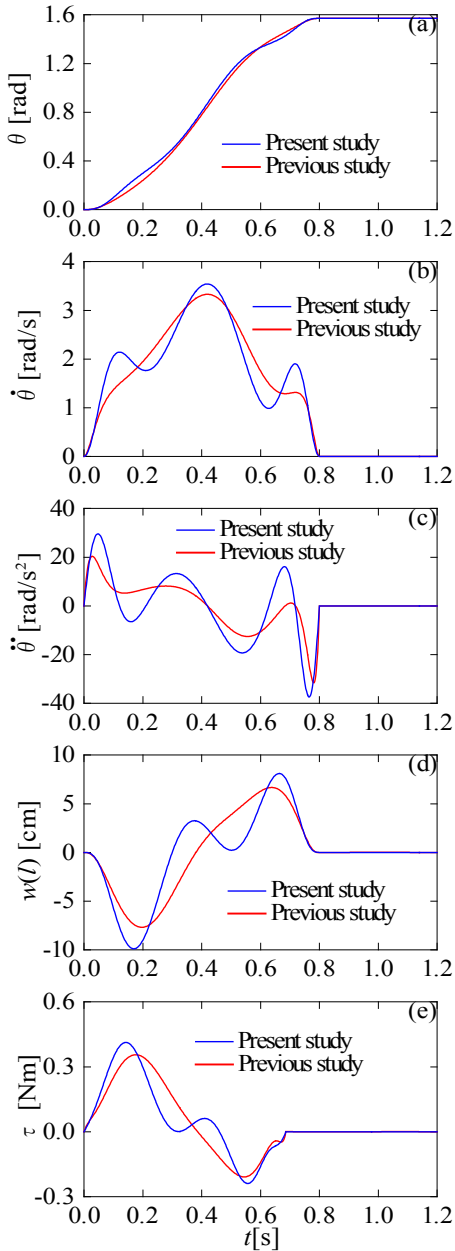


Fig. 3: Comparison of time history data ($T_E = 0.8$ [s], $\theta_E = \pi/2$ [rad]): (a) joint angle, (b) angular velocity, (c) angular acceleration, (d) tip displacement, and (e) motor torque.

駆動条件を $T_E = 0.8$ [s], $\theta_E = \pi/2$ [rad]と設定し、NSGA-II から得られたパレート解の分布を図 2 に示す。横軸 F_1 と縦軸 F_2 は式(5)で定義されている目的関数である。○印は本研究，●印は先行研究[2]の手法による結果を示している。なお，先行研究[2]では式(3)のサイクロイド関数の入力として次式のべき級数

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

を用いている。図より，残留振動の振幅 F_1 が減少するにつれて駆動エネルギー F_2 が増加していることが見受けられる。ゆえに，残留振動抑制と駆動エネルギー最小化の間にはトレードオフの関係が成立していると考えられる。また，本手法の方が残留振動の振幅約 3.5 [cm]以下の範囲で駆動エネルギーが先行研究のものよりも小さく省エネルギー化が図られていることもわかる。

図 3 はパレート解における残留振動が最小となる解の時系列データの比較である。図 3(d)に示されるように，両手法とも残留振動が抑制されていることがわかる。図 3(b)から，先行研究の手法では角速度軌道は滑らかである。一方，本手法では角速度線図に 3 つのピークを持っており，一般的に滑らかな軌道とは言い難く，これは式(4)によるものである。図 3(d)から本手法の方が先行研究のものよりも駆動後 $t = 0.18$ s 付近でマニピュレータが負の方向に大きくたわんでいる。これに伴い，時間 $t = 0.2$ から 0.5 s の区間で駆動トルクが先行研究[2]のものより小さくなっており，これが省エネルギー化の一因となっている。ゆえに，マニピュレータ駆動中の変位を積極的に活用した方が，さらなる省エネルギー化が図られるといえる^[1]。一般的に省エネルギー化を図るには，振動が励起されないようマニピュレータを滑らかな軌道で旋回する必要があると考えられる。しかしながら，本研究からこの考えとは異なる結果が得られ，このことは非常に興味深いといえよう。

参考文献

- [1] 阿部 晶・浅野鈴果, 柔軟マニピュレータの省エネルギー駆動におけるブレイクスルー, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2018 講演会論文集, 7 頁, (2018)
- [2] A. Abe, An effective trajectory planning method for simultaneously suppressing residual vibration and energy consumption of flexible structures, Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 4, pp. 19/27, (2016)
- [3] K. Deb et al., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, 182/197, (2002)