

## Abstract

This paper presents the optimal trajectory planning for a flexible manipulator in a point-to-point motion. In order to get the optimal trajectory, two objective functions are considered: the first is the driving energy and another one is the residual vibration. In the trajectory planning, we express the desired joint angle by a cubic spline function, and then use a multi-objective genetic algorithm to minimize the criteria.

## 1. はじめに

近年のロボットマニピュレータは、高速化、軽量化およびエネルギーコスト削減などの観点から、構造として薄肉のものが求められる傾向にある。一方、これらの傾向はマニピュレータの剛性の低下をもたらし、振動が生じやすい状況になっている。このような背景のもと、フレキシブルマニピュレータの振動制御に関する研究が盛んに行われている<sup>(1)</sup>。これらにおいて Point-To-Point(PTP)制御における残留振動抑制を目的とした軌道計画に関する研究が報告されているが、駆動エネルギーに着目したフレキシブルマニピュレータの軌道計画に関する研究は非常に少ない。省エネルギー化を目指すには駆動エネルギーの考慮が必須であり、残留振動抑制と省エネルギー化の両立が望ましいと考えられる。そこで本研究では、水平関節型 1 リンクフレキシブルマニピュレータの PTP 制御問題を扱い、多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)を用いて、駆動エネルギー最小化と残留振動抑制を両立させる軌道計画法を提案する。

## 2. マニピュレータの支配方程式

本研究で扱う 1 リンクフレキシブルマニピュレータの実験装置を図 1 に示す。モデル実験では、長さ 86[mm]のハブに長さ×幅×厚さ=514[mm]×50[mm]×1[mm]の真鍮製のはりを取り付け、これをフレキシブルマニピュレータとして用いた。旋回には減速比 1:25 の AC サーボモータを使用し、速度制御型のサーボパックを介して駆動した。サーボモータの駆動トルクの計測には、サーボパックのアナログモニタ機能を用いた。マニピュレータのたわみを計測するためにストレインゲージを用いることとし、マニピュレータ固定端から 4[cm]の位置に取り付けた。

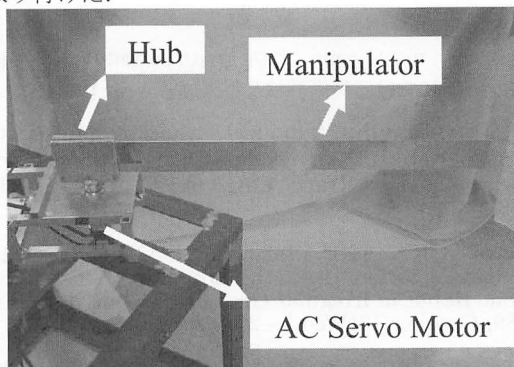


Fig.1 Photograph of the experimental set up

理論解析ならびに実験装置を用いたパラメータ同定実験から、マニピュレータの支配方程式は以下のように得られる<sup>(2)</sup>。

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

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

ここで、 $\theta$ 、 $W$  と  $\tau$  はそれぞれマニピュレータの関節角、振幅および駆動トルクを示しており、 $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $c$ 、 $\zeta$  および  $\omega$  はパラメータ同定実験から定められる係数である。なお、 $\omega$  は固有角振動数であることに注意されたい。

## 3. MOGA による最適軌道計画

本研究では、時間  $T_E$  で関節角  $\theta_E$  を回転させる PTP 制御を考え、マニピュレータの残留振動と駆動エネルギーを最小にする関節角軌道  $\theta(t)$  を MOGA により求める。

はじめに、時間  $T_E$  を  $2n$  等分して各分割時間  $t_i$  に対応する離散角  $\theta_i$  を定義する。なお、 $t_{2n} = T_E$ 、 $\theta_{2n} = \theta_E$  である。2 回微分可能な 3 次のスプライン補間を用い、離散角を補間することにより関節角の軌道を生成する。本研究では、パラメータ  $\Delta\theta_i$  を用いて離散角を次式のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{i+1} &= \Phi(t_{i+1}) + \Delta\theta_i, \quad (i=1,2,\dots,n-1) \\ \theta_{2n-1-i} &= \theta_E - \theta_{i+1}, \quad (i=1,2,\dots,n-2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\Phi(t)$  はサイクロイド曲線

$$\Phi(t) = \theta_E \left\{ \frac{t}{T_E} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_E}\right) \right\} \quad (4)$$

である。したがって、 $\Delta\theta_i$  はサイクロイド曲線からの偏差を表すパラメータとなっている。3 次のスプライン補間で用いた境界条件は以下のとおりである。

$$\theta(0) = 0, \theta(T_E) = \theta_E, \dot{\theta}(0) = 0, \dot{\theta}(T_E) = 0 \quad (5)$$

この場合、 $\ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta}(T_E) = 0$  の条件を満足することができない。そこで、この条件を満足するように離散角  $\theta_i$  および  $\theta_{2n-1}$  を定めることとする。以上の提案した手法に基づけば、 $2n$  分割に対して僅か  $n-1$  個のパラメータ  $\Delta\theta_i$  を用いて軌道を表現することができる。

以下、軌道計画法の概要について述べる。最適化するパラメータを  $\Delta\theta_i$  ( $i=1,2,\dots,n-1$ ) とする。3 次のスプライン補間から得られた軌道を用いて角速度  $\dot{\theta}$  と角加速度  $\ddot{\theta}$  を求め、式(2)を数値積分し、マニピュレータの変位を求める。次いで、式

(1)の逆動力学解析から駆動トルク  $\tau$  が計算される。本研究では、残留振動抑制と駆動エネルギー最小化の観点から、目的関数  $f_{1,2}$  を次式のように定義する。

$$f_1 = |W_{\max}|, \quad f_2 = \int_0^{\theta_E} |\tau| d\theta \quad (6)$$

ここで、 $|W_{\max}|$  は位置決め後 1 秒間におけるマニピュレータ振幅の最大値である。この 2 つの目的関数を同時に最小化するように MOGA を適用し、最適軌道を求める。以下、本研究で用いた MOGA のアルゴリズムを簡単に説明する。

1) 最適化するパラメータを実数値でコーディングし、ランダムに初期集団を発生させる。

2) 式(6)の目的関数  $f_{1,2}$  を求め、パレートランキング法に基づいて各個体に適応度を与える。個体  $i$  の適応度は次式となる。

$$f_p(i) = 1/(1 + n_i) \quad (7)$$

ここで、 $n_i$  は個体  $i$  がいくつ他の個体に支配されているかを表している。

3) 解に多様性を保持させるために、シェアリング関数を用いて適応度の調整を行う。すなわち、 $f_p(i)$  から  $f_s(i)$  を以下のように定める。

$$f_s(i) = f_p(i) / \sum_{j=1}^N s(d(i, j)) \quad (8)$$

ここで、 $s(d(i, j))$  はシェアリング関数といい、次式のように定義されており、

$$s(d(i, j)) = \begin{cases} 1 - \left( \frac{d(i, j)}{\sigma_{shear}} \right)^\alpha & d(i, j) < \sigma_{shear} \\ 0 & d(i, j) \geq \sigma_{shear} \end{cases} \quad (9)$$

$d(i, j)$  は目的関数空間での個体間の距離、 $\sigma_{shear}$  はシェアリング半径と呼ばれるパラメータである。

- 4) 確率変数に基づいて交差および突然変異を行う。
- 5) ベスト N 選択法を適用し、次世代の集団を生成する。そして、あらかじめ指定した世代交代数になるまで手順 2) ~ 5) を繰り返す、パレート最適解の集合を求める。

#### 4. 数値シミュレーション結果

本研究で提案した軌道計画法の有効性を検証するため、数値シミュレーションを行った結果を以下に示す。なお、関節角軌道生成の際の分割数は  $n=5$  とした。

図 3 は、関節目標角  $\theta_E = \pi/2$  [rad] の位置決めを  $T_E=1$  [s] で行わせたときの MOGA で得られた残留振動最小軌道とサイクロイド曲線との結果である。図(a), (b)はそれぞれマニピュレータ先端の変位および駆動トルクである。図からサイクロイド曲線で旋回させた場合、位置決め後 1 秒以降に 17.6[mm]程度の残留振動が生じ、それに伴って関節角度を  $\theta_E$  に保持するための保持トルクが発生していることがわかる。これより、旋回終了後もモータのエネルギーが消費されることが認められる。一方、本手法で求めた軌道でマニピュレータを旋回させた場合、残留振動はほぼ完全に抑制されており、サイクロイド曲線において見られた保持トルクも発生していないことがわかる。

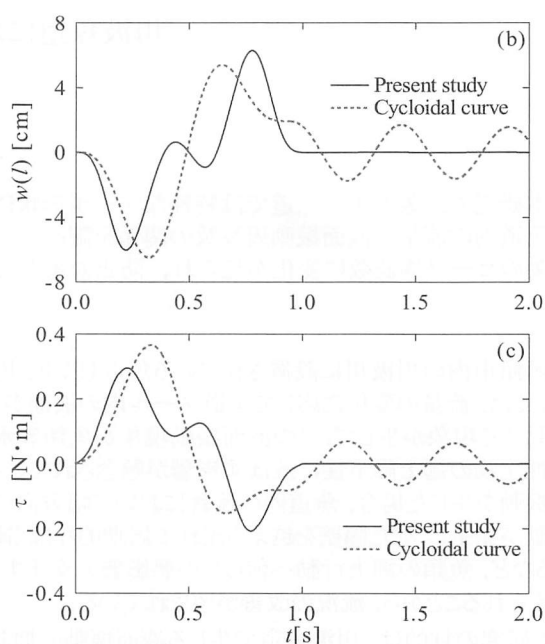


Fig.2 Comparison of Numerical Simulation Results

Table 1 Comparison of the objective function

		Cycloidal curve	Present study
$T_E=0.9$ [s]	$f_1$ [mm]	15.5	0.769
	$f_2$ [J]	0.407	0.271
$T_E=1$ [s]	$f_1$ [mm]	17.6	0.243
	$f_2$ [J]	0.282	0.216
$T_E=1.1$ [s]	$f_1$ [mm]	27.2	$3.22 \times 10^{-2}$
	$f_2$ [J]	0.199	0.181

関節目標角を  $\theta_E = \pi/2$  [rad] と固定して旋回時間  $T_E$  を変化させた場合、本手法とサイクロイド曲線から得られる目的関数  $f_1, f_2$  の比較を表 1 に示す。ここで、本手法の値として残留振動最小軌道を採用している。残留振動を示す  $f_1$  および駆動エネルギー  $f_2$  の値とも、本手法で求めた軌道の方がサイクロイド曲線で旋回したものよりも小さいことがわかる。したがって、提案された軌道計画法は、残留振動と駆動エネルギーを同時に抑制する軌道を生成していることが認められる。

#### 5. まとめ

本研究では、1リンクフレキシブルマニピュレータの PTP 制御問題を扱い、多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)を用いて、駆動エネルギー最小化と残留振動抑制を両立させる軌道計画法を提案した。数値シミュレーション結果より、本手法は、残留振動と駆動エネルギーを同時に抑制する軌道を生成していることを示した。

#### 参考文献

- (1) S. K. Dwivedy, P. Eberhard, Dynamic Analysis of Flexible Manipulators, A literature review, *Mechanism and Machine Theory*, Vol.41, No.7, (2006), pp.749-777.
- (2) 阿部・笹森, GA を用い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 Robomec'08 講演論文集, 2A1-G04, (2008)