進化計算を用いた機械システムのロバスト振動制御

阿 部 晶*・久保田 響*

Robust Vibration Control for Mechanical Systems by Using Evolutionary Computation

Akira ABE* and Hibiki KUBOTA*

This paper presents a feedforward control technique for the suppression of residual vibrations in mechanical systems with parameter variations. We deal with the Point-To-Point (PTP) motion of the pendulum system consisting of an unactuated pendulum attached to the end of a horizontal rotating arm, and demonstrate the effectiveness of the proposed method through numerical simulations and experiments.

Key Words: robust control, PTP control, trajectory generation, residual vibration suppression, particle swarm optimization

1. はじめに

著者らはこれまでに機械システムの Point-To-Point (PTP) 制御問題に対するフィードフォワード振動制御法を提案してきた^{1),2)}。これら手法の特長は、ソフトコンピューティングに基づくので、扱う数学モデルが非線形性であっても、数値積分可能であれば容易に制御系を構築できる点である²⁾。一方、フィードフォワード制御の性能は、制御対象のモデルの精度に依存しており、モデルのパラメータ変動の影響を受けやすい。しかしながら、これまでの提案手法^{1),2)}においてはロバスト性の検証はなされていない。

そこで本研究では、機械システムのパラメータ変動に対してロバストなフィードフォワード制御法を新たに提案する。提案手法において、正弦波関数を用いた入力をサイクロイド関数に与えて軌道を表現する。この軌道は正弦波関数の係数に依存する。そこで、この係数を Particle Swarm Optimization (PSO)³⁾を用いてチューニングし、機械システムのパラメータ変動に対してロバストな最適化軌道を生成させる。提案手法の有効性を確認するために、本手法を先端に振子を取り付けられたアームの PTP 制御に適用する。そして、振子に取り付けられた集中質量の位置が変化しても、振子の残留振動が抑制されるロバストな軌道が生成されることを示す。

2. 実験装置および数学モデル

Fig. 1 に本研究で扱った実験装置の写真を示す。この写真に示されるように、回転アームの先端に振子を取り付けられており、振れ角はエンコーダ (LINE SEIKI: CB-1000LD) で計測される。振子には集中質量が負荷されており、この位置を可変パラメータとする。アームは減速比 1/10 のボール減速

Fig. 1 Photograph of experimental setup

機 (KAMO SEIKO: BR50SH-10G-T7) を介して AC サーボモータ (OMURON: W10030L-S1) で駆動される。なお、サーボモータはサーボドライバ (OMURON: R88D-WT01HL) より速度制御モードで運転され、アームの角速度が制御可能となる。この場合、アームの目標角への追従制御が実機で実現されると仮定し、アームの運動方程式を扱う必要がなくなる^{1),2)}。

これより、数学モデルとして振子のダイナミクスのみを扱い、その運動方程式は次式によって与えられる。

$$\ddot{\phi} + \omega^2 \sin \phi + \alpha \dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \phi + \beta \ddot{\theta} \cos \phi = 0 \quad (1)$$

ここで、Fig. 1 に示されるように、 θ はアームの旋回角、 ϕ は振子の振れ角であり、固有角振動数 ω 、係数 α と β は

$$\left. \begin{aligned} \omega^2 &= \frac{(ml/2 + ML)g}{ml^2/3 + ML^2}, \quad \alpha = -\frac{ml^2/4 + ML^2}{ml^2/3 + ML^2} \\ \beta &= \frac{(ml/2 + ML)L_0}{ml^2/3 + ML^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

と定義されている。上式で、 m と M はそれぞれ振子および集中質量の質量、 g は重力加速度、 L_0 はアームの長さ、 l は振子の長さ、 L は振子の回転支点から集中質量までの距離であり、その値は以下に与えられる。

$$m = 35 \text{ g}, M = 127 \text{ g}, L_0 = 0.383 \text{ m}, l = 0.554 \text{ m}$$

なお、集中質量の位置は $L \in [0, 0.5] \text{ m}$ の範囲で可変となり、

* 旭川工業高等専門学校システム制御情報工学科
旭川市春光台 2 条 2 丁目 1-6

* Department of Systems, Control and Information Engineering, Asahikawa National College of Technology, 2-2-1-6 Shunkodai, Asahikawa

(Received March 27, 2014)

(Revised May 2, 2014)

Fig. 2 Influence of the position L on the parameter variations

$L = 0$ は集中質量なしと等価である。

Fig. 2 は集中質量の位置 L と固有周期 T と係数 α , β の関係を示したものである。この図より、 L の増加に伴って α は単調に減少するものの、 $L = 0.108$ m で T と β はそれぞれ極小点、極大点をもつことがわかる。

3. 軌道生成アルゴリズム

本論文では、時間 T_E でアーム関節角を θ_E 回転させる PTP 制御において、集中質量の位置が変化しても振子の残留振動が抑制される関節角軌道 $\theta_{opt}(t)$ を求めるを試みる。この軌道を次式のサイクロイド関数を用いて表現する。

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

ここで、 $u(t)$ は時間 t に関するサイクロイド関数の入力を示しており、 $u(t)$ と生成される軌道 $\theta_{opt}(t)$ においてつぎの関係が成り立つ²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{opt} = 0, \quad \dot{\theta}_{opt} = \ddot{\theta}_{opt} = 0 \quad \text{at} \quad u = 0 \\ \theta_{opt} = \theta_E, \quad \dot{\theta}_{opt} = \ddot{\theta}_{opt} = 0 \quad \text{at} \quad u = 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

これより、入力 $u(t)$ は軌道の始点で $u(0) = 0$ 、終点で $u(T_E) = 1$ を満たす関数であればよい。なお、 $\dot{\theta}_{opt} = 0$ 、 $\ddot{\theta}_{opt} = 0$ のために $\dot{u} = 0$ あるいは $\ddot{u} = 0$ の条件は不必要であることに注意されたい。本研究では入力 $u(t)$ としてつぎの正弦波関数を用いることとする。

$$u(t) = t/T_E + \sum_{n=1}^N a_n \sin(2n\pi t/T_E) \quad (5)$$

ここで、係数 a_n がすべて 0 であるとき、入力は t/T_E となり (3) 式から生成される軌道はサイクロイド曲線となる。ゆえに、サイクロイド曲線の入力 t/T_E に正弦波関数による補正を加えて軌道が生成される仕組みとなっている。正弦波関数を $2n\pi$ と展開している理由は、時間 $T_E/2$ で角速度パターンが対称となるためである。

(3) 式から生成される軌道は (5) 式の係数 a_n に依存する。そこで、この係数を最適化手法の探索パラメータとし、進化

Fig. 3 Simulation results (optimization for the positions $L = 0.108$ and 0.5 m): (a) angular velocity and (b) sway angle

計算の一種である PSO を用い、振子の残留振動抑制軌道を生成するようチューニングする。以下、このアルゴリズムについて簡単に述べる。はじめに、PSO の初期値として係数 a_n をランダムに与え、(3) 式から $\dot{\theta}_{opt}$ と $\ddot{\theta}_{opt}$ を得る。次いで、(1) 式の数値積分から振子の振れ角 ϕ を求める手順となる。この際、固有周期が最小と最大になる位置 L の 2 点で残留振動を抑制する軌道を生成すれば、 L の全域において残留振動が減少させられると期待できる。そこで、固有周期の最小値の $L = 0.108$ m と最大値の $L = 0.5$ m の振れ角 $\phi(t)_{L=0.108}$ および $\phi(t)_{L=0.5}$ を計算する。そして、この 2 つの振れ角の絶対値の総和を評価関数 F として与える。すなわち、

$$F = \sum_{i=1}^I (|\phi^i|_{L=0.108} + |\phi^i|_{L=0.5}) \quad (6)$$

ここで、 F はアーム旋回開始から位置決め後 2 s 間までの振れ角の絶対値の総和である。 ϕ^i は時間間隔 $\Delta t = 2$ ms ごとの振れ角を示しており、 $I = (T_E + 2)/\Delta t + 1$ と定義されている。アーム旋回開始から位置決め後までの振れ角も評価関数に考慮することにより、残留振動抑制のみならず駆動中の振動も抑制することが期待できる¹⁾。(6) 式の評価関数が最小化されるよう PSO のアルゴリズムに従って係数 a_n をチューニングすれば最適軌道 θ_{opt} が求まる。なお、PSO の個体の更新および最適解の定義は文献 4) と同じである。

4. シミュレーションおよび実験結果

本論文で提案したロバストフィードフォワード振動制御法の妥当性ならびに実現性を検証するため、シミュレーションおよび実験を行なった結果を以下に示す。なお、以下の結果においては、駆動時間 $T_E = 2.0$ s、目標角 $\theta_E = \pi/2$ rad と設定した。

Fig. 3 は評価関数 (6) の下で最適化軌道を求めたときのシミュレーション結果である。この計算条件としては、(5) 式の項数を $N = 3$ 、PSO の粒子数を 50、繰り返し回数を 100 とした。係数 a_n の探索範囲を $a_n \in [-0.1, 0.1]$ とし、求めた値は以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 7.541 \times 10^{-2}, \quad a_2 = 3.196 \times 10^{-2} \\ a_3 &= 1.627 \times 10^{-2} \end{aligned} \right\}$$

Fig. 3 (b) より、 $L = 0.108, 0.5$ m においては残留振動が抑

Fig. 4 Maximum sway angle obtained by simulations: (a) until positioning and (b) after positioning

Fig. 5 Simulation results (optimization for the positions $L = 0.016, 0.108$ and 0.45 m): (a) angular velocity and (b) sway angle

制されていることがわかる。これはわずか3個の係数 a_n のパラメータチューニングからこれが実現できている。しかしながら、 $L = 0.3$ m と設定してこの軌道でアームを旋回させると、最大振幅 6 deg 程度の残留振動が発生してしまう。

集中質量の位置 L の変化の影響を調べたものを Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a) はアーム駆動中の振子の最大振幅 $|\phi_1|$ 、Fig. 4 (b) は残留振動の最大振幅 $|\phi_2|$ である。また、細線は最適化軌道、太線はサイクロイド曲線の結果である。最適化軌道による $|\phi_1|$ の最大値は 9.97 deg ($L = 0.112$ m)、 $|\phi_2|$ の最大値は 5.96 deg ($L = 0.016$ m) と、サイクロイド曲線のものよりも減少しており、本手法の妥当性を認めることができる。一方、Fig. 4 (b) から、評価関数 (6) にさらにほかの位置 L を追加すれば、ロバスト性が向上すると考えられる。

そこで、評価関数を次式のように $L = 0.016, 0.108$ および 0.45 m の3つの振れ角の総和として最適化軌道を求めた結果を以下に示す。

$$F = \sum_{i=1}^I (|\phi^i|_{L=0.016} + |\phi^i|_{L=0.108} + |\phi^i|_{L=0.45}) \quad (7)$$

ここで、Fig. 4 (b) の $|\phi_2|$ が最大となる位置として $L = 0.016$ m を追加した。また、Fig. 2 (a) より、 $L = 0.016$ と 0.308 m の固有周期は一致しており、 $L = 0.3$ m 付近の制振性能向上が見込まれる。Fig. 4 (b) から、 $L = 0.108$ および 0.5 m から離れるにつれて残留振動の振幅が大きくなっており、その中点付近で最大となっている。そこで、 $L = 0.108$ から 0.5 m の間の $|\phi_2|_{\max}$ の最大値を低減させるために、最端の $L = 0.5$ m よりわずかに減少させた $L = 0.45$ m を採用した。

評価関数 (7) の最小化から求めた最適化軌道の結果を

Fig. 6 Maximum sway angle obtained by simulations and experiments: (a) until positioning and (b) after positioning

Fig. 5 に示す。ここでは、(5) 式の項数を $N = 6$ 、PSO の粒子数を 100、繰り返し回数を 200 とした。係数 a_n の探索範囲は先程と同一であり、求めた値は

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 8.520 \times 10^{-2}, & a_2 &= 4.551 \times 10^{-2} \\ a_3 &= 3.929 \times 10^{-2}, & a_4 &= 2.877 \times 10^{-2} \\ a_5 &= 1.318 \times 10^{-2}, & a_6 &= 9.050 \times 10^{-3} \end{aligned} \right\}$$

である。Fig. 5 (b) から、 $L = 0.016$ m においては残留振動が完全に抑制されていないものの、その値は十分に小さく、得られた最適化軌道の有効性を認めることができる。この最適化軌道の集中質量の位置 L に対するロバスト性を検証した結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a), (b) は Fig. 4 のものと同様である。図中の○、●印はそれぞれ最適化軌道およびサイクロイド曲線の実験結果である。Fig. 6 から、駆動中の最大振幅を大幅に増加させることなく、 L の全域で残留振動が抑制されていることがわかる。残留振動の振幅の最大値は 2 deg 程度であり、提案手法はパラメータ変動に対して有効であるといえる。さらには、シミュレーション結果と実験結果が十分に一致しており、本手法の実現性も認められる。

5. おわりに

本研究では、進化計算を利用した新たなロバストなフィードフォワード制御法を提案した。先端に振子を取り付けられたアームの PTP 制御問題を扱ったシミュレーションおよび実験結果を通じて、進化計算を用いた提案手法からパラメータ変動に対してロバストな残留振動抑制軌道が生成されることを実証した。

参考文献

- 1) A. Abe: Trajectory planning for flexible cartesian robot manipulator by using artificial neural network: Numerical simulation and experimental verification, *Robotica*, **29**-5, 797/804 (2011)
- 2) 阿部 品: べき級数を用いた簡便な軌道生成法の提案 (機械システムの残留振動抑制への適用), 日本機械学会論文集 C 編, **79**-804, 2869/2873 (2013)
- 3) M. Clerc and J. Kennedy: The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE Trans. Evol. Comput.* **6**-1, 58/73 (2002)
- 4) 阿部, 伊藤: ソフトコンピューティングを用いた巻き上げ機構を有する天井クレーンのオープンループ制御, 日本機械学会論文集 C 編, **77**-778, 2201/2210 (2011)