学術論文

超音波モータの GA 調整型 NN-PID 制御

GA Adjustment Type NN-PID Control for Ultrasonic Motor

田中幹也(正員)*1, 岡 正人(正員)*2, 若佐裕治*1, 明石卓也*1, 長縄明大*3

Kanya TANAKA (Mem.), Masato OKA (Mem.), Yuji WAKASA, Takuya AKASHI, Akihiro NAGANAWA

The ultrasonic motor (USM) has strong non-linearity caused by frictions. Therefore, it is difficult to accomplish satisfactory control performance by using PID control. In this paper, we propose the genetic algorithm (GA) adjustment type neural network (NN)-PID control that used GA for study of NN. The effectiveness of the proposed method is confirmed by experiments.

Keywords: Ultrasonic motor, non-linearity, PID control, genetic algorithm, neural network.

1 はじめに

超音波モータ(USM)は圧電素子に電圧を印加した際に 生じる振動を駆動源とする原理のモータで,小型軽量, 作動音がしない、低速時でも高トルクが得られる、停止 時の保持トルクが大きい等の従来の電磁力モータにない 優れた特性を有している[1,2]。また、原理上電磁ノイズ を発生せず、また、電磁場の影響を受けることもなく電 磁両立性に極めて優れている。このため今後、医療福祉 分野を始め、産業界のあらゆる分野への応用が期待され ている。しかし、USM は摩擦力駆動のため電磁力モータ のように物理的な解析が困難でそのモデル化は容易では ない。このため数式モデルに基づく現代制御理論の適用 ができず、これまで主として構造が簡単である PID 制御 が多くの現場で用いられてきた[3-5]。しかし, USM は駆 動時の温度変化や負荷変化によりプラントの特性が変動 し、従来の固定ゲイン PID 制御では制御性能が低下して しまう。また、USM は摩擦力駆動で非線形性がかなり強 いため従来の固定ゲイン方式の PID 制御では、制御性能 に限界があり精密な位置決め性能を達成するには至って いなかった。このため USM にニューラルネットワーク (NN)を用いて特性変動や非線形性を補償する制御方式が 試みられてきた[6-8]。筆者らも従来の PID 制御と NN を 組み合わせた NN-PID 制御を提案している[9]。しかし, NN では最急降下法を用いて結合荷重の学習を行う場合

連絡先: 岡 正人, 〒755-8555 宇部市常盤台 2-14-1, 宇部工 業高等専門学校機械工学科,

e-mail: oka@ube-k.ac.jp

*1山口大学 *2宇部工業高等専門学校 *3秋田大学

その解が局所最適解に収束し、大域的最適解に収束しないという問題点が指摘されている[10]。また、NNの学習にはバックプロパゲション(BP)法を用いることが多い。 その場合出力信号の入力信号による偏微分(ヤコビアン) 値が必要となるがモデル化が困難な USM ではその事前 情報が得られないという問題点がある。

上記の問題点を解決するため本論文では、PID 制御に NNを併用した NN-PID 制御を用い NN における結合荷重 の学習を BP 法ではなく遺伝的アルゴリズム(GA)[11]を用 いて直接調整する GA 調整型 NN-PID 制御の方法を提案 する。

本稿の構成は、第2章で考察の対象とする USM を用い たサーボ系について記述する。第3章では、従来型 PID 制御と提案する GA 調整型 NN-PID 制御の構成法につい て説明する。第4章では、GA の構成法について説明を行 う。第5章では、提案した構成法の有用性を確認するた めに実在の USM を用いて行った実機実験の結果を示す。 実験では、PID 制御と提案した GA 調整型 NN-PID 制御を 比較して述べる。

2 USM サーボ系

Fig.1 に本論文で扱う USM を用いたサーボ系の構成を 示す。USM, エンコーダおよび負荷が同軸上に接続され ている。エンコーダからの位置情報は, パーソナルコン ピュータ(PC)に内蔵されたカウンタボードに入力される。 この出力および目標値より PC 内で計算された制御入力 の情報は, I/O ボードを経由して駆動回路に伝えられる。 駆動回路は、シフトレジスタを用いてデジタル回路で構

成した[4]。Fig.2に駆動回路のブロック図を示す。また、 終段の電圧可変・昇圧回路は, デジタルポテンションメー タ,パワーオペアンプおよび昇圧トランジスタを用いた。 ここで用いている USM はキャノン販売製の UA60/SR50 で、エンコーダおよび負荷を含めた諸元を Table 1 に示す。 駆動回路では基準となる電圧(A相)と一定の位相差を持 った電圧(B相)を用いて USM を駆動している。Fig.3 に この USM の位相差と回転速度の特性を示す。位相差に対 する回転速度の特性は非線形であり、負荷を加えること により不感帯が増加している。この不感帯はUSM が摩擦 力駆動であるため静止摩擦の影響で生じる不可避なもの であると考えられる。駆動周波数は固定として安定に起 動ができるように、USM の共振周波数より 1.0 [kHz]ほど 高い 36.0 [kHz]とした。USM の駆動は、ヒステリシス現 象が少なく、入力と出力が比較的線形に近い関係がある 位相差制御方式を用いた。位相差は、間を 0.0245 [rad]の 刻みで調整できる。駆動回路の諸元を Table 2 に示した。



Fig. 1 USM servo system.



Fig. 2 Block diagram of drive circuit.

Table 1	Performance	of USM.	encoder	and	Load.

	Rated rotational speed: 100 rpm	
USM	Rated torque: 0.392 N • m	
	Holding torque: 0.392 N • m	
Encoder	Resolution: 0.0036 deg	
Load	0~0.2 N ⋅ m	



Fig. 3 Speed characteristics to phase difference (f=36.0kHz).

36.0 kHz	
150 V	
−90~90 deg	
1.406 deg	

Table 2Performance of drive circuit.

3 制御系の構成

3.1 従来型 PID 制御

まずUSMの従来型PID制御の構成をFig.4に示す。PID コントローラは、

$$G_{PID} = \frac{K_P (1 - z^{-1}) + K_I + K_D (1 - z^{-1})^2}{(1 - z^{-1})}$$
(1)

と記述される。ここで、 K_p , K_1 , K_p はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインを表している。この式より、PID コントローラからの制御入力u(k)は、

$$u(k) = u(k-1) + (K_P + K_I + K_D)e(k)$$
(2)
- (K_P + 2K_D)e(k-1) + K_De(k-2)

となる。ただし,

$$e(k) = r(k) - y(k) \tag{3}$$

とする。





3.2 GA 調整型 NN-PID 制御

つぎに提案した GA 調整型 NN-PID 制御の構成を Fig.5 に示す。従来から市販の USM のコントローラはほとんど が PID 制御であり,これらの PID コントローラを簡単な 改良で高機能化するためここでは PID コントローラに並 列に GA-NN を付加する構成法を示す。コントローラに立 の構成法では NN の結合荷重を GA を用いて調整し、USM の特性変動や非線形性を補償し、常時最適な制御性能を 達成する。図より制御入力u(k)は、PID コントローラか らの制御入力 $u_{PD}(k)$ と GA-NNからの制御入力 $u_{GA}(k)$ より

$$u(k) = u_{PID}(k) + u_{GA}(k) \tag{4}$$

と合成される。NN の結合荷重の調整を GA で行う。



Fig. 5 Block diagram of GA adjustment type NN-PID control.

GA-NN の構成を Fig.6 に示す。プラントの非線形性や外 乱を補償し,同時にオンライン型の GA-NN を実現するた めにここでは2 層構造の GA-NN を採用した。NN の入力 層のニューロン数は3で,入力として

$$I_{i}(k) = \{e(k), e(k-1), e(k-2)\}$$
(5)

を用いており、これらの信号は(2)式の PID コントローラ

で用いている信号と同じある。各入力信号に対応する結 合荷重を w_i (i = 1,2,3) とする。出力層のニューロン数 は1で、GA-NN からの出力 $u_{GA}(k)$ はつぎのように計算す る。

$$u_{GA}(k) = f\left(\sum_{i=1}^{3} w_i(k)e(k+1-i)\right)$$
(6)

ただし, f(x)はつぎのようなシグモイド関数である。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$
(7)



Fig. 6 Architecture of GA-NN.

なお、GA-NNのみでコントローラを構成することも考 えられる。しかしその場合はプラントの特性が変動する と GA の学習がある程度進むまでの過渡期では制御性能 は劣化し、場合によっては制御系自体が不安定になる可 能性もある。また従来 GA の調整はオフラインで行われ ることが多かったが、本手法ではこれをオンラインで行 うことにより実用的なコントローラを実現している。

4 GA の構成法

Fig. 7に GA の構成と調整法を示す。GA における染色体(Chromosome)には NN の 3 つの入力に対する結合荷重を一本に繋げたものを用い、遺伝情報を伝える遺伝子としてそれぞれの結合荷重を用いる。遺伝子は結合荷重の実数値を用いて構成する。N 個の染色体集団が 1 つの世代(Generation)を構成する。図は N=5 の例である。1 つの染色体が目標入力r(k)の1つの周期に対応し1世代経過した時に、各染色体を適応度(Fitness)によって評価する。評価した染色体を選択する際に用いる選択方法は、各染色体を適応度の高い順に並べ替えを行うランキング選択とランキングの高い染色体をそのまま次の世代に残すエリート保存選択を併用している。染色体の選択交配は、エリート保存選択によってランキング上位 20%は次の世代にそのまま残し、下位 20%を淘汰している。したがっ

て次の世代の染色体残り 80%を交配によってつくる。本稿においては淘汰されていない染色体 80%の上位と下位を交配させることで残り 80%の染色体をつくる。交配させる時に用いる交叉方法は、1 点交叉を用いる。突然変異率は 1%の確率で遺伝子の実数値を-0.1~0.1 の範囲でランダムに変化させる。ただし、突然変異はエリート保存 選択をした染色体の遺伝子は除いてその他の染色体の遺伝子にのみ生じさせる。





5 実機実験

5.1 実験条件

提案した構成法の有用性を確認するため実機実験を行った。実験はPID制御,および提案したGA調整型NN-PID 制御の 2 つの制御手法を比較する形で行った。サンプリ ング間隔は 1.0 [ms] とし,目標入力 に周期 4 [s],振幅が ±45 [deg]の矩形波を用いた。

まず、PID 制御の各ゲインは Ziegler-Nichols の限界感度法 よりつぎのように選んだ。

$$\left.\begin{array}{l}
K_{P} = 3.0 \\
K_{I} = 0.02 \\
K_{D} = 0.02
\end{array}\right\}$$
(8)

つぎに、GA 調整型 NN の結合荷重の初期値は-0.1~0.1 の一様乱数を用いた。また GA の世代を構成する染色体 は予備実験に基づき N=10 個で構成した。本実験では、目 標入力に矩形波を用いたが、回転方向によって USM の特 性が異なるために回転角(矩形波の符号)が正と負でそれ ぞれ別々に NN 制御装置を準備した。制御目的は定常的 な位置決め精度の向上であるため制御性能はつぎの適応 度(Fitness)を用いて評価した。適応度は 0 から 1 を範囲と し、適応度が大きいほど良好な制御を示す。

Fitness =
$$\frac{1}{1 + \sum_{i=k_1}^{k_1 + k_2} e(i)^2}$$
 (9)

Fitnessの評価は矩形波の符号変化後1.5 [s] $(k_1 = 1500)$ から0.4 [s] 間 $(k_2 = 400)$ とした。位置決め精度は矩形波の符号が変化した後の1.9 [s]後の精度を測定した。 また,ここでは位相差制御を採用しているので、制御入力は $\pi 2 \sim -\pi 2$ の有効範囲内で使用している[12]。

5.2 従来型PID制御の実験結果

Fig.8に十分に時間の経過したときの従来型PID制御の 目標入力と出力を対比して示した。Fig.9にその場合の制 御入力 の変化を示した。Fig.10に定常状態(792[s]後) における30回分の位置決め精度をヒストグラムで示した。 これより位置決め精度は、矩形波〈+45[deg]〉側で-0.0144 ~-0.0072[deg], -45[deg]〉側で0.0036~0.0108[deg]に分散 しており満足のできる位置決め精度が達成されていない ことがわかる。また、Fig.11は負荷(0.1 [N·m])が加わった 場合の位置決め精度である。位置決め精度は〈+45[deg]〉 側で-0.1584~-0.1476[deg],〈45[deg]〉側で0.1584~0.1692 [deg]と大幅に悪化しており従来型PID制御では負荷に対 しても脆弱であることが確認できる。

5.3 GA 調整型 NN-PID 制御の実験結果

Fig. 12 は提案した GA 調整型 NN-PID 制御の結果であ る。Fig. 8 と Fig. 12 を比較すると, GA 調整型 NN-PID 制 御の方が立ち上がりが改善されていることがわかる。こ れは Fitness の評価は定常状態のみであるが, NN 自体は 制御の全区間に渡って働いているためこれが立ち上がり を改善するように効いているためであると推察される。 また, Fig. 13 にそれぞれの制御入力の変化を示した。Fig. 14 は 30 回分の位置決め精度のヒストグラムである。図よ り, 位置決め精度は (+45 [deg]) 側で-0.0036~0.0036 [deg],

〈45 [deg]〉側で,エンコーダの分解能である±0.0036 [deg]以内に収まっており USM の非線形性に十分に対処 でき,極めて良好な位置決め精度が達成されていること がわかる。Fig. 15 は負荷を加えた場合の位置決め精度の ヒストグラムである。図より位置決め精度は〈+45 [deg]〉 側で-0.018~0.0036 [deg],〈45 [deg]〉側で0~0.0144 [deg] 以内に収まっており,負荷が加わっても位置決め精度は 十分維持されていることがわかる。Fig. 16 に無負荷の状



日本AEM学会誌 Vol.15, No.4 (2007)



Fig. 14 Positioning accuracy of GA adjustment type NN-PID control (No load).



Fig. 15 Positioning accuracy of GA adjustment type NN-PID control (Load : 0.1N·m).



Fig.16 Responses of GA adjustment type NN-PID control in the case of adding the load $(0.1N \cdot m)$ on the way.



Fig.17 Control input of GA adjustment type NN-PID control in the case of adding the load $(0.1N \cdot m)$ on the way.

日本AEM学会誌 Vol.15, No.4 (2007)





態から途中で負荷(0。1[N·m])を(図中の矢印の時点で)加 えた場合の目標入力と出力を対比して示した。Fig. 17およ びFig. 18はその場合の制御入力とNNの結合荷重_{W1}の変 化を示した。Fig. 16から出力については図の縮尺の関係で 負荷を加えた前後の違いは顕著には認められない。一方, 制御入力についてはFig. 13とFig. 17を詳細に比較すると 負荷を加えた後,特に798 [s]以降で違いがでていることが わかる。また, Fig. 18から負荷を加えた後から結合荷重が 変化しておりNNが負荷を補償していることがわかる。

6 あとがき

本稿では、非線形性や特性変動の激しいUSMの位置決め制御手法として、GAを用いたNN-PID制御を提案し、 実機実験によりその有用性を示した。本手法はUSMばか りではなく、非線形性や特性変動の強い空気圧系やプロ セス系へも応用可能である。なお、広く産業応用を進め るためには、ここで示した非線形性や一定値負荷ばかり でなく時変負荷に対する補償法も必要であるので今後の 課題としたい。

(2006年11月23日受付, 2007年5月19日再受付)

参考文献

- [1] 見城尚志,指田年生,超音波モータ入門,総合電子出版.
- [2] 福田耕治,鎌野琢也,鈴木茂行,安野卓,原田寛信,周波 数および位相差ニューラルネットワークを用いた超音波 モータ位置サーボシステムの高精度化,日本 AEM 学会, Vol.6, No.4, pp.350-357, 1998.
- [3] 福田耕治, 鎌野琢也, 安野卓, 鈴木茂行, 周波数および位 相差ファジィハイブリッド制御による超音波モータ二自 由度位置サーボシステム, 電気学会論文誌, Vol.119-C, No.11, pp.1310-1315, 1999.
- [4] 田中幹也,岡正人,内堀晃彦,岩田洋一朗,森岡弘,NN 併用型 PID 制御器を用いた超音波モータの精密位置決め 制御,電気学会論文誌, Vol.122-C, No.8, pp.1317-1324, 2002.

- [5] 西堀賢司,大熊繁,江龍康雄,酒井哲,超音波モータを用いたロボットマニピュレータの PWM とファジィ推論による位置決め制御,日本機会学会論文集, Vol.60-574, No.93-1426, pp.2052-2056, 1994.
- [6] F. J. Lin and R. J. Wai, Wavelet Neural Network Control for Linear Ultrasonic Motor Drive via Adaptive Sliding-Mode Technique, *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, Vol.50, No.6, pp.686-698, 2003.
- [7] T. Senjyu T. Yoshida, K. uezato, and T. Funabashi, Position Control of Ultrasonic Motor Using Dead-Zone Compensation with Fuzzy Neural Network, *Proc. of Annu. Conf. Power Electron Spec. Conf.*, Vol.34, No.4, pp.1871-1876, 2003.
- [8] T. Senjyu, T. Yoshida, K. Uezato, N. Urasaki, and S. K. Panda, Speed Sensorless Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network, *Proc. of Annu Conf. IEEE Ind. Electron Soc.*, Vol.29, No.1, pp.335-340, 2003.
- [9] 田中幹也,岡 正人,内堀晃彦,長縄明大,森岡弘,岩田 洋一朗,竹口哲馬,NN併用型 PI 制御器を用いた超音波 モータの高速・精密位置決め制御,日本機械学会論文集(C), Vol.69, No.681, pp.1289-1294, 2003.
- [10] J. J Hopfield and D. W. Tank, Neural computation of decisions in optimization problems, *Biol. Cybern*, Vol.52, No.3, pp.141-152, 1985.
- [11] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, *Addison Wesley*, 1989.
- [12] 千住智信,宮里裕,上里勝実,ハイブリッド制御による超音波モータの高速・精密位置決め制御,電気学会論文誌,Vol.115-D, No.11, pp.1333-1340, 1995.