

## 超音波モータの PSO を用いた可変ゲイン型 PID 制御

## Variable Gain Type PID Control using PSO for Ultrasonic Motor

田中 幹也<sup>\*1</sup> (正員), 村田 裕介<sup>\*1</sup>, 西村 悠樹<sup>\*1</sup>,  
Abd Rahman Faridah <sup>\*1</sup>, 岡 正人<sup>\*2</sup> (正員), 内堀 晃彦<sup>\*2</sup>

Kanya TANAKA(Mem.), Yusuke MURATA, Yuki NISHIMURA,  
Faridah Abd RAHMAN, Masato OKA(Mem.), Akihiko UCHIBORI

Although the ultrasonic motors are useful in various cases, they are very hard to control because of the following reasons: the motors have nonlinear relations between the input(phase difference) and the output(revolving speed), the property fluctuation is caused by change of load, and the structure is quite complicated. Therefore we propose the variable gain type PID controller, in which parameters are adjusted using the particle swarm optimization (PSO). Then, the effectiveness of the proposed method is confirmed by the experiments.

*Keywords:* Variable gain, Ultrasonic motor, Particle Swarm Optimization, Proportional Integral Differential control.

## 1 まえがき

超音波モータ(Ultrasonic Motor: USM)は電磁両立性(Electro Magnetic Compatibility: EMC)に極めて優れていることから、強磁場を伴う磁気共鳴診断装置(Magnetic Resonance Imaging: MRI)内の手術用ロボットなどへの応用が研究されている[1]。また、中空構造が可能なことからカメラの一眼レフ用レンズのアクチュエータとしても用いられている[2]。USMは摩擦力駆動であるため、電磁力モータのように物理的な解析に基づいて状態変数表示の数式モデルを導出することがかなり困難である。このため、モデルに基づいた現代制御理論の適用ができず、従来は主としてPID制御が用いられてきた。しかし、USMは非線形性や特性変動が極めて強く、固定ゲイン型PID制御ではこれらを補償できなかった。この問題を解決する手法として、ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムを用いてPID制御の各ゲインを調整する研究が進められているが[3,4]、PIDゲインが局所解に収束してしまう可能性、最適値への収束速度が遅いなど、改善すべき点が存在する。一方、粒子群最適化(Particle Swarm Optimization: PSO)と呼ばれる確率的最適化手法が盛んに研究されている

[5-9]。PSOはニューラルネットワークにおけるバックプロパゲーション法と比較すると、評価関数の数値のみを利用して最適化を行うため、目的関数の連続性、微分可能性を必要とせず、複雑な非線形最適化問題の求解に有効である[10]。また、PSOは遺伝的アルゴリズムよりもシンプルなアルゴリズムで記述されているにも関わらず、非線形最適化問題を効率よく解くことができる[11]などの特徴がある。

本論文では、PSOによりPID制御の各ゲインの最適化を行う可変ゲイン型PID制御を提案し、これを用いてUSMの制御を行う。また、本提案手法を用いることで、USMの摩擦熱や、接続される負荷などの環境変化によって生じる特性変動の補償が可能であることを実機実験により示す。

本論文の構成は次の通りである。第2章においては、対象モデルであるUSMサーボ系に対して従来の固定ゲイン型PID制御を行う際の問題点を記述し、本論文での問題設定を述べる。第3章ではPSOの原理について概説し、PSOを用いた可変ゲイン型PID制御を提案する。第4章では提案手法の有用性を確認するために行った実機実験の内容および結果について述べる。第5章で本論文を総括する。

## 2 問題設定

本章では、問題設定として従来の固定ゲイン型PID制御をUSMへ適用した場合の問題点を述べる。まず、従来の固定ゲイン型PID制御のブロック線図をFig. 1

連絡先: 田中 幹也, 〒755-8611 山口県宇部市常盤台  
2-16-1, 山口大学大学院理工学研究科,  
e-mail: ktanaka@eee.yamaguchi-u.ac.jp

<sup>\*1</sup>山口大学大学院 <sup>\*2</sup>宇部工業高等専門学校

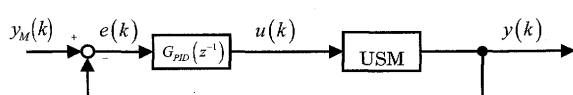


Fig. 1 Block diagram of PID control.

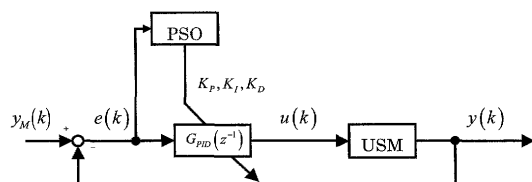


Fig. 2 Block diagram of Variable Gain Type PID control using PSO.

に示す。図中の  $G_{PID}(z^{-1})$  は PID コントローラで、次式で表される。

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

ただし、 $K_P$  は比例ゲイン、 $K_I$  は積分ゲイン、 $K_D$  は微分ゲインである。 $u(k)$  はプラントへの制御入力、 $y(k)$  はプラントからの出力である。また、 $y_M(k)$  は目標入力でつぎの規範モデルの出力を用いる。

$$y_M(k) = \frac{b_{M0}z^{-1}}{1+a_{M1}z^{-1}+a_{M2}z^{-2}} r(k) \quad (2)$$

ここでは、USM の位置決め精度を評価するために、規範入力  $r(k)$  として、周期  $T$  の矩形波を用いるものとする。目標入力と出力との誤差を  $e(k) = y_M(k) - y(k)$  とすると、制御入力  $u(k)$  は次式で合成される。

$$u(k) = (K_P + K_I + K_D)e(k) - (K_P + 2K_D)e(k-1) + K_De(k-2) \quad (3)$$

しかし、前章でも述べたように、USM はモデル化が困難である上に入出力間に非線形性を有しているため、PID コントローラにおけるゲインの調整が困難である。また、駆動時の摩擦熱や接続される負荷の変化によって特性変動を起こすため、一時的に適切なゲインが得られたとしても、良好な制御性能を維持し続けることができない。そこで、本論文では Fig. 2 に示すように PSO を用いて PID ゲインを調整する

可変ゲイン型 PID 制御を提案し、USM に適用する。

### 3 PSO を用いた可変ゲイン型 PID 制御

#### 3.1 PSO の原理

PSO は鳥や魚などの群がエサを探す振舞いをモデル化した確率的最適化手法であり、有力な手法の一つとして知られている。以下にその概略を記す。

変数  $x \in M \subset R^n$  に対して評価関数  $f: M \rightarrow M' \subset R$  を最大化する最適化問題を考える。空間  $M$  上の粒子 (質点) を  $N$  個用意し、探索回数  $m$  のときの  $i(=1,2,3,\dots,N)$  番目の粒子の位置ベクトルを  $x_i^m$ 、速度ベクトルを  $v_i^m$  とする。また、各粒子自身の探索点  $x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^m$  の中で評価関数  $f$  の値が最も大きい点 (Pbest) を  $P_i$ 、粒子全体の探索点で  $f$  の値が最も大きい点 (Gbest) を  $P_g$  とする。各粒子は、二つの漸化式

$$v_i^{m+1} = wv_i^m + c_1r_1\{p_i - x_i^m\} + c_2r_2\{P_g - x_i^m\} \quad (4)$$

$$x_i^{m+1} = x_i^m + v_i^{m+1} \quad (5)$$

によって更新される。ここで、 $w$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  は各項に対する重み係数で正の値、 $r_1$  と  $r_2$  は  $[0,1]$  の一様乱数である。PSO による最適解の探索の一例を Fig. 3 に示す。いま、探索点  $x_1^{m-3}$  が Pbest (R)、個体番号  $g$  の Pbest が Gbest ( $P_g$ ) となるとする。速度ベクトル  $v_1^{m+1}$  は、式(4)で示したように、3 つのベクトルから構成される。1 つは慣性ベクトルで、速度ベクトル  $v_1^k$  と重み係数  $w$  によるベクトルである。残り 2 つは、 $P_i$  と  $P_g$  それぞれへのベクトル、重み係数  $c_1$  と  $c_2$ 、 $[0,1]$  の一様乱数  $r$  によるベクトルである。これらの相互作用により、速度ベクトル  $v_1^{m+1}$  は粒子を最適値に近づけるように作用する。本論文ではさらに、Inertia Weight Approach と呼ばれる PSO の探索能力を高め

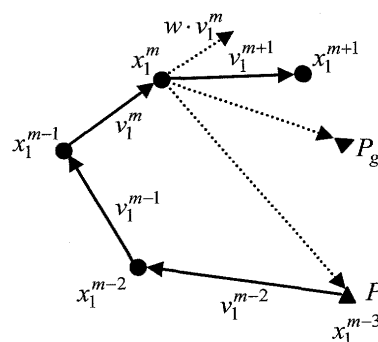


Fig. 3 Example of PSO.

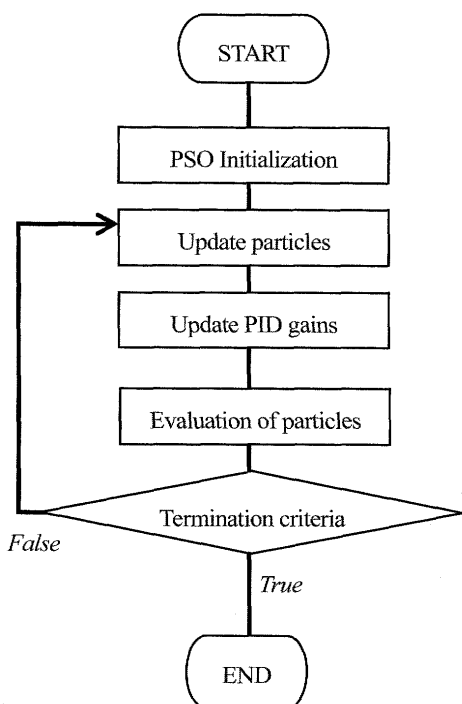


Fig. 4 Flowchart of PSO.

るための手法[12]を用いる。すなわち、式(4)中の重み定数  $w$  を

$$w^m = w_s - \frac{(w_s - w_e) \times m}{m_{\max}} \quad (6)$$

で置き換える。ただし、 $m_{\max}$  は最大探索回数を表しており、 $w$  の初期値  $w_s$  と最終値  $w_e$  は、 $w_s, w_e$  を満たすように設計する。式(6)を用いると、探索回数が進むごとに  $w^m$  の値が減少するため、式(4)右辺第一項の速度ベクトル  $v_i^{m+1}$  への影響は小さくなっていく。また、具体的な計算においては、反復計算で解が発散しないように速度の範囲を制限する必要がある。

### 3.2 可変ゲイン型 PID 制御

前節で紹介した PSO を用いて、USM に対する知的可変ゲイン型 PID 制御を提案する。PSO を適用するために、各ゲイン  $K_P, K_I, K_D$  を軸とする空間  $M_{PID} \subset R^3$  を考え、 $M_{PID}$  上の粒子を  $x_i^m = (K_{Pi}^m, K_{Ii}^m, K_{Di}^m)$  とし、一定区間の誤差  $e(k) = y(k) - y_M(k)$  を用いて粒子の評価を行う。評価関数  $f \in [0, 1]$  は

$$f = \frac{1}{1 + \sum_{i=T_s}^{T/2} e(i)^2} \quad (7)$$

とする。ただし、 $T/2$  は目標入力半周期であり、 $T_s$  は評価を始める時間（すなわち、矩形波の符号が変化してから時間）である。評価関数  $f$  は目標入力への追従性を示す評価関数であり、この関数を最大化することで定常誤差を減少させることが目的である。PSO を用いた PID ゲインの最適化は Fig. 4 に示すフローチャートに添って行う。また、目標入力式(2)に追従させるとき、USM は右回転と左回転を行うが、USM は回転方向によって特性が異なっているため、それぞれ別の PSO を用いる。

## 4 実機実験

本論文で提案する PSO を用いた可変ゲイン型 PID 制御の有用性を確認するため実機実験を行った。

最初に、USM サーボ系の構成について説明する。まず Fig. 5 に示すように、USM、エンコーダおよび電磁ブレーキを同軸上に接続する。つぎに、エンコーダからの位置情報をパーソナルコンピュータ (Personal Computer : PC) に内蔵されたカウンタボードに出力する。そして、この出力および目標値を用いて PC 内で計算された制御入力の情報を、I/O ボードを経由して、Fig. 6 に示す駆動回路に伝える。この駆動回路においては、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にある位相差制御方式を採用する。また、USM の回転方向は位相差の符号によって決まるので、位相反転回路を加える。なお、位相差制御はシフトレジスタを用いてデジタル回路で実現し、電圧可変・昇圧回路は、デジタルポテンシャルメータ、パワーオペアンプおよび昇圧トランジスタを用いて構成する。Fig. 7 が試作した実験装置である。また、Table 1 に USM、エンコーダおよび負荷の緒元を、Table 2 に駆動回路の緒元を示す。駆動周波数は固定として安定に起動ができる

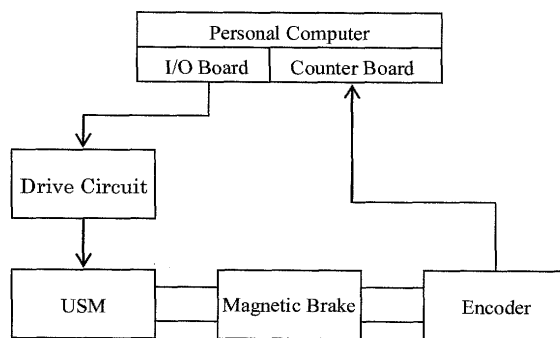


Fig. 5 USM servo system.

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。位相差は、 $-90 \sim 90$  [deg.] 間を1.406 [deg.]の刻みで調整する。また、目標入力(2)式の規範モデルが理想応答するように $b_{M0} = 0.0009$ ,

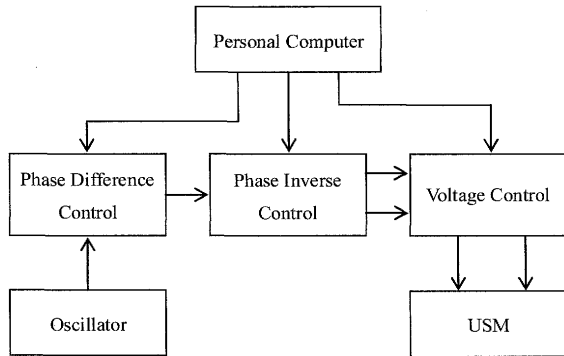


Fig. 6 Drive circuit.

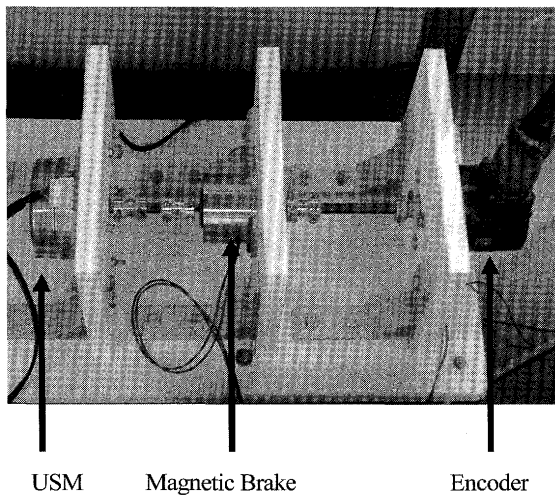


Fig. 7 Experimental equipment.

Table 1 Performance of USM, encoder and load.

USM	Rated rotational speed : 100 rpm
	Rated torque : 0.392 N·m
	Holding torque : 0.382 N·m
Encoder	Resolution : 0.0036 deg
Magnetic Brake	0~0.2 N·m

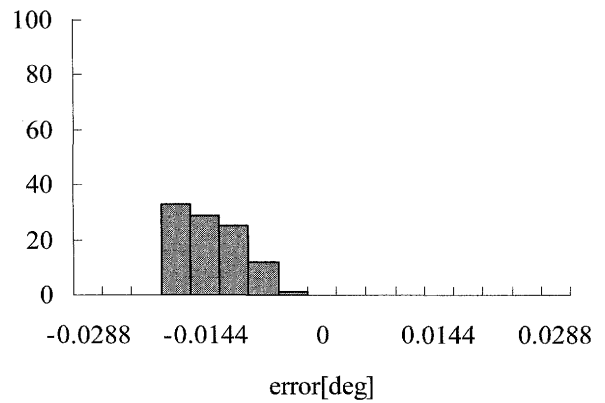
Table 2 Performance of drive circuit.

Driving frequency	36.0 kHz
Driving voltage	150 V
Phase difference	$-90 \sim 90$ deg
Resolution of phase difference	1.406 deg
Sampling time	1.0 ms

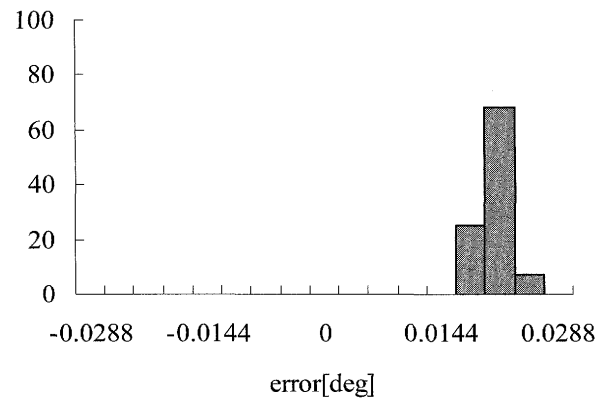
$a_{M1} = -1.9400$ ,  $a_{M2} = 0.9409$  としたものを採用し、 $r(k)$ には周期が1[s]で振幅が11 [deg.]の矩形波を用いる。以下では、固定ゲイン型PID制御とPSOを用いた可変ゲイン型PID制御、それぞれについて実験を行い、それらと比較する。実験において、負荷の影響による特性変動を生起するため、電磁ブレーキに12[V]を印加し、0.1[Nm]の力でUSMのシャフトを締め付ける力を加える。

4.1 固定ゲイン型PID制御の実験結果

各々のゲインをZiegler-Nicholsの限界感度法で $K_p = 5.0$ ,  $K_I = 0.2$ ,  $K_D = 0.2$ と決定し、固定ゲイン型PID制御の実験を行った。Fig. 8に定常誤差 $e(k) = y(k) - y_M(k)$ を100回測定した結果をヒストグラムで示した。なお、定常誤差の値は矩形波 $r(k)$ の符号が切り替わる10[ms]前の誤差を測定した。(a)時計回転の場合、定常誤差は $-0.018$ [deg.] $-0$ [deg.]の間に、(b)反時計回転の場合は $0.018$ [deg.] $-0.0288$ [deg.]の間に分散しており、いずれの場合にもかなり大きな定常誤差を



(a) Clockwise rotation.



(b) Counter clockwise rotation.

Fig. 8 Positioning accuracy of PID control with load.

生じていることがわかる。すなわち、従来の固定ゲイン型 PID 制御では、USM の非線形性や特性変動を有効に補償できていないことが確認できた。

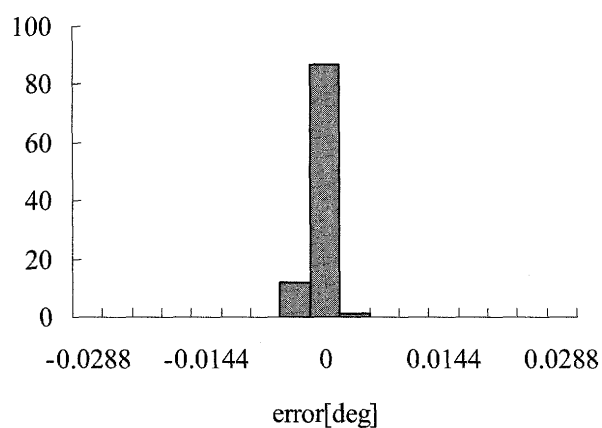
#### 4.2 PSO を用いた可変ゲイン型 PID 制御の実験結果

つぎに、提案手法である PSO を用いた可変ゲイン型 PID 制御を用いた実験を行った。PSO のパラメータは  $c_1=1.0$ ,  $c_2=1.0$ ,  $w_e=0.4$ ,  $w_s=0.9$  とし、粒子情報の初期位置、初期速度は以下の範囲の一様乱数で与えた。

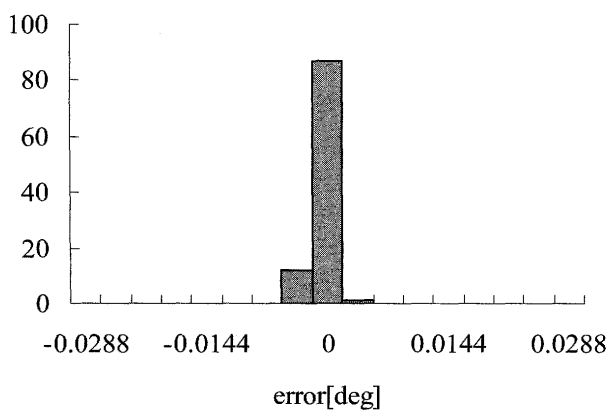
$$x_i^0 = \{[6.0, 4.0], [0.1, 0.3]\}$$

$$v_i^0 = \{[1.0, -1.0], [0.1, -0.1], [0.1, -0.1]\}$$

ただし、各パラメータ値および乱数の範囲は試行錯誤的に決定した。各ゲインは目標入力の半周期ごとに更新する。このため評価関数  $f$  を定義した(7)式において、定常応答を評価できるように  $T_s=400$ ,  $T=1000$  と設定した。また、実験の終了条件は最大探

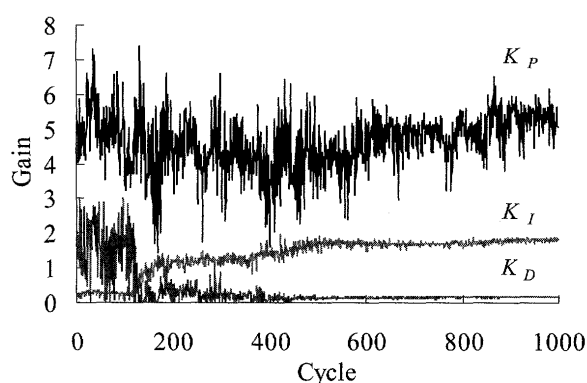


(a) Clockwise rotation.

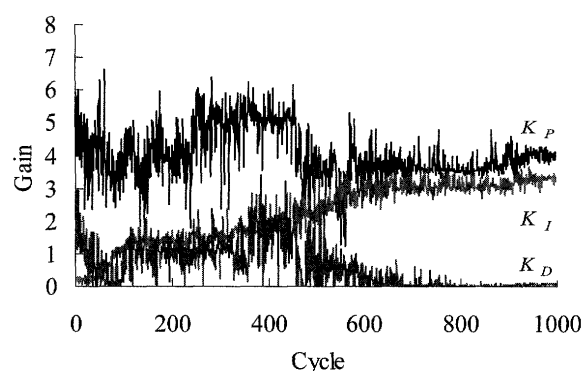


(b) Counter clockwise rotation.

Fig. 9 Positioning accuracy of proposed method with load.



(a) Clockwise rotation.



(b) Counter clockwise rotation.

Fig. 10 PID Gain of proposed method with load.

索回数 1000 周期とした。

Fig.9 に 100 回測定した定常誤差をヒストグラムで示した。(a) 時計回転, (b) 反時計回転のいずれの場合にも定常誤差は  $-0.0072[\text{deg.}] - 0.0036[\text{deg.}]$  の間に収まっており、従来の固定ゲイン型 PID 制御の結果と比較して、制御性能が大幅に改善されていることが確認できた。つぎに Fig. 10 に PSO により調整された各 PID ゲインの変化を示した。図の横軸は規範入力の矩形波の周期を表示している。各 PID ゲインが PSO により活発に調整されている様子が解る。以上の結果から、提案した PSO を用いた可変ゲイン型 PID 制御は、USM の非線形性や特性変動を補償し、高精度な位置決め制御を達成できていることが検証できた。

#### 5 あとがき

本論文では、USM の非線形性、特性変動を補償する手法として、PID 制御における PID ゲインを PSO によって調整する可変ゲイン型 PID 制御を提案し、その有用性を実機実験で検証した。市販されている USM の

コントローラはほとんどが PID 制御であるが、提案した手法は従来の PID コントローラに簡単に組み込むことが可能であり有用性の高い方法である。

(2009年11月13日受付, 2010年4月28日再受付)

#### 参考文献

- [1] 清水崇広, 井澤淳, 遠山茂樹, 伊藤宏司, 超音波モータを用いた MRI 対応マニピュランダムの開発, 信学技報, MBE2004-128, pp.21-24, 2005.
- [2] 足立幸志, 摩擦を利用したアクチュエータ: 超音波モータ, 日本機械学会誌, Vol.108, No.1037, pp.48-51, 2005.
- [3] 田中幹也, 岡正人, 内堀晃彦, 岩田洋一郎, 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 C, Vol.122, No.8, pp.1317-1323, 2002.
- [4] 田中幹也, 岡正人, 若佐裕治, 明石卓也, 長縄明大, 超音波モータの GA 調整型 NN-PID 制御, 日本 AEM 学会誌, Vol.15, No.4, pp.55-61, 2007.
- [5] J. Kennedy, R. Eberhart: "Particle Swarm Optimization", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp.1942-1948, 1995.
- [6] E. Ozcan, C. K. Mohan, Analysis of a Simple Particle Swarm Optimization System, *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks*, Vol.8, pp.253-258, 1998.
- [7] E. Ozcan, C. K. Mohan, Particle Swarm Optimization: Surfing the waves, *Proceedings of 1999 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Vol.3, pp.1939-1944, 1999.
- [8] J. Kennedy, R.C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [9] M. Clerc, J. Kennedy, The Particle Swarm, Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space, *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, Vol.6, pp.58-73, 2002.
- [10] 伊藤稔, 田中雅博, Particle Swarm Optimization の高次元問題における探索性能の改善, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.5, pp.577-579, 2006.
- [11] 井出東, 安田恵一郎, 適応型 Particle Swarm Optimization に関する基礎検討, 電気学会論文誌 C, Vol.124, No.2, pp.550-557, 2004.
- [12] Y. Shi, R. C. Eberhart, Parameter Selection in Particle Swarm Optimization, *Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming VII*, pp.591-600, 1998.