

## 自動車エンジン用電磁駆動バルブの位置決め制御への 遺伝的アルゴリズム応用に関する検討

打田 正樹\*, 勝見 広\*\*, 須波 浩規\*\*\*, 坊向 陽介\*\*\*\*

### Consideration of Genetic Algorithm to Positioning Control of Electromagnetic Engine Valve

Masaki Uchida\*, Hiro Katsumi\*\*, Hiroki Sunami\*\*\* and Yohsuke Bohmuki\*\*\*\*

An ElectroMagnetic engine Valve (EMV) has received a great deal of attention due to the growing importance of issues such as fuel economy and environmental protection in the automotive. We study on the design of the structure of the linear actuator and the positioning controller for the EMV in order to realize the EMV. Conventionally, we realized the linear actuator and the positioning controller for the EMV. But, the mechanical and the electrical characteristics of the EMV are changing over a long time. Therefore, an adaptive controller is required in order to compensate deterioration of control performances. In this paper, we propose the positioning control using a Genetic Algorithm (GA) as the first step to realize the adaptive controller. By using the GA, we realize the auto tuning method of the design parameters of the positioning controller. The effectiveness of the GA is confirmed by numerical analysis.

#### 1 緒言

近年, 自動車用エンジンの吸排気バルブを電動化するエンジン用電磁駆動バルブ(Electro-Magnetic engine Valve:以下 EMV と略記)が注目されている<sup>[1],[2]</sup>. EMV とは, 電磁力を用いたアクチュエータによって吸排気バルブを開閉するものであり, カム駆動の可変動弁機構と比べて自由度の高い軌跡でのバルブ開閉を狙ったものである. これによって, 自動車用エンジンのポンピングロスを低減することができ, 燃費を大幅に改善することができる.

従来著者らは, EMV の実現を目指し EMV 用途のバルブ位置決め制御とバルブ開閉用のアクチュエータに関する研究を行ってきた<sup>[3]-[6]</sup>. その結果, EMV 用途の位置決め制御系とアクチュエータを実現することができた.

一方, EMV は長期にわたり使用するものであり, バルブガイドの摩擦の変化, バルブフェイスへのスラッジの付着による可動部質量の変化によって EMV の特性が大幅に変化する. さらに, これらの変化はあらかじめ予測することが困難である. よって実用化のためには, これらの長期的な変化を補償する適応型制御系が必要である.

従来著者らは, 適応制御の一つであるスライディングモード制御を EMV 用途の制御系に利用してきた. しかし, この制御系はバルブ駆動用のアクチュエータの推力リップルやディテント力などの非線形特性の補償を目的としたものである. そこで本稿では, EMV の長期的な変化に対応する適応型制御系の実現を目的に, 遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:以下 GA と略記)<sup>[7]</sup>をバルブ位置決め制御に応用することを提案し, GA の EMV 用途への有効性を検討する. 本稿では, EMV 用途の制御系のための

---

\* 機械工学科    \*\* 共和工業株式会社    \*\*\* トナミ運輸株式会社    \*\*\*\* 特殊発條興業株式会社

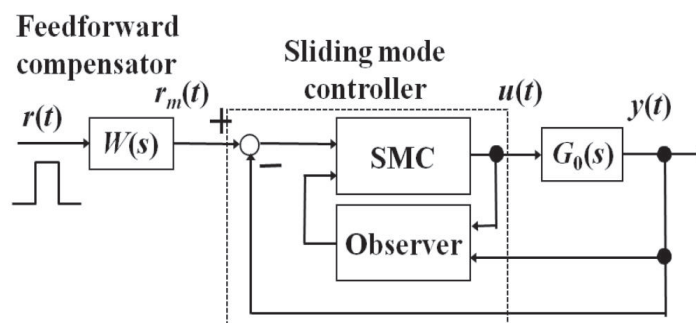


Fig.1 Block diagram of SMC and feedforward compensator.

GA の設計と，シミュレーションによる提案 GA の有効性の検証について述べる．

## 2 EMV 用途の制御系

EMV 用途の可変切換超平面をもつスライディングモードサーボ制御(Variable Sliding Mode servo Control:以下 VSMC と略記)<sup>[6]</sup>では，非線形特性による制御性能の劣化を低減しながら，高速な応答とオーバーシュート低減を実現することができた．この制御系において，制御系の動特性は可変切換超平面に大きく依存し，その導出のためにはリカッチ微分方程式を数值的に解く必要があった．そのことから，バルブを駆動しながらコントローラの設計パラメータを適応的に変化させることが不可能であった．よって，VSMC では，EMV 用途の適応型制御系を構築することは困難である．

そこで，VSMC と同等の制御性能を実現しながら，VSMC の問題点を回避し，適応型制御系を実現するために，スライディングモードサーボ制御(Sliding Mode servo Control:以下 SMC と略記)に加えフィードフォワード補償を用いた制御系を提案した<sup>[5]</sup>．ここで，その制御系のブロック図を Fig.1 に示す．この制御系では SMC 閉ループによって，アクチュエータの非線形特性を補償するためハイゲインのものを用いる．そして，SMC のサーボ帯域の制約や，SMC では補償することができない無駄時間などによるオーバーシュートなどをフィードフォワード補償器で補償する．この制御系では，VSMC と同等の制御性能を得ながら，制御系の構造を簡素なものとし，バルブを駆動しながらコントローラの設計パラメータの変更を可能としている．

フィードフォワード補償器として下式で示されるハイパス型のノッチフィルタ(High Pass Notch filter:以下 HPN と略記)型のものを用いる．

$$W(s) = \frac{K(s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2)}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \quad (1)$$

ただし， $K$ ， $\omega_n$ ， $\omega_d$ ， $\zeta_n$ ， $\zeta_d$ は設計パラメータである．フィードフォワード補償器として SMC 閉ループの逆モデルなどを用いる手法が考えられるが，構造の簡素化のため，式(1)で示されるハイパス型のノッチフィルタを用いた．

本稿では適応型制御系を実現するための第一歩として，フィードフォワード補償器の設計パラメータを自動的に調整する GA を実現する．

### 3 提案 GA の設計

フィードフォワード補償器の設計パラメータは複数あり、GA で調整を行うには、その GA が多変数の探索に対応していることが必要である。そこで本稿では、多変数の探索を行う GA を新たに提案、設計する。その提案 GA では、多変数の探索と一変数の探索を併用する。部分的に一変数の探索を用いることで、収束性を向上させる。

提案 GA では、多変数の探索によって決定した個体の周辺から一変数の探索によってより高い適合度が得られる個体を探索する。さらに、この探索によって決定した個体の周辺から多変数の探索によってより高い適合度の個体が含まれる極所を発見する。上記の操作を繰り返すことによって多変数の探索を実現する。ここで、提案 GA の探索手法の詳細を以下に示す。

1. 探索範囲を指定し、それぞれの設計パラメータの初期値をランダムに発生させることで個体の初期集団を作成する。
2. それぞれの個体の適合度を計算する。一番適合度が高い個体はそのまま変化させず、2 番目と 3 番目に適合度が高い個体を交差させる。また、エリート個体と交差によって得られた個体の他の個体を突然変異させ、染色体を反転させる。
3. 設計パラメータの中からランダムで探索パラメータを一つ決定し、1～3 の操作によって探索を行う。この際、他のパラメータは変化させない。次に、探索が終了した設計パラメータを除いた設計パラメータの中から他の設計パラメータについても上記の操作を繰り返す。
4. 3 の設計パラメータの探索が終了後、3 で決定した設計パラメータの周辺から(1 で設定した選択範囲を縮小する)すべてのパラメータの初期値をランダムに発生させ、すべての設計パラメータの探索を同時に行う。4 が終了した時点における適合度より高い適合度の個体が探索されるか、適合度が変化しなくなるまで、この探索を繰り返す。
5. 以後 3～4 の操作を繰り返す。

GA の探索目的はバルブの位置目標値とバルブの位置との偏差を小さくすることとし、適合度  $S$  はバルブの位置目標値とバルブの位置との偏差の時間積分値の逆数とし、以下で定義するものとする。

$$S = \frac{1}{\int_0^T e \, dt} \quad (2)$$

$$e = r(t) - y(t) \quad (3)$$

ただし、 $r(t)$  はバルブの位置目標値、 $y(t)$  はバルブの位置である。バルブの位置は数値シミュレーションによって導出する。 $T$  はシミュレーションの終了時間である。

一方数値シミュレーションでは、制御対象  $G_0(s)$  と SMC を含めた SMC 閉ループのモデル  $G_d(s)$  が必要となる。 $G_d(s)$  は文献[6]の手法と同様に同定によって求めた。そのモデルを以下に示す。

$$G_C(s) = \frac{-1.5 \times 10^{-5} s^5 + 1.7 s^4 - 2.3 \times 10^5 s^3 + 1.0 \times 10^{10} s^2 - 5.9 \times 10^{13} s + 2.0 \times 10^{17}}{s^5 + 1.5 \times 10^4 s^4 + 4.7 \times 10^8 s^3 + 8.9 \times 10^{11} s^2 + 4.6 \times 10^{14} s + 1.9 \times 10^{17}} \quad (4)$$

零点	極
$2.93 \times 10^4 \pm 1.06 \times 10^5 i$	$-6.51 \times 10^3 \pm 2.00 \times 10^4 i$
$3.14 \times 10^3 \pm 3.67 \times 10^3 i$	$-2.49 \times 10^2 \pm 4.77 \times 10^2 i$
$4.85 \times 10^4$	$-1.48 \times 10^3$

$G_C(s)$ の妥当性は、同定に用いた実験データと比較することで確認している。

一方、提案 GA の主な仕様を Table 1 に示す。これらは、10000 世代の探索で、より高い適合度が得られるように設定した。この GA を用いて探索を行った場合の適合度の逆数の推移を Fig.3 に示す。ただし、この図には 5 試行分の推移を示している。Fig.3 より、収束度合いにばらつきがあるものの世代を追うごとに適合度の逆数が小さくなっていることがわかる。このことから、提案 GA が多変数の探索が可能であることがわかる。また適合度の逆数、つまり位置決め偏差が小さくなっていることから提案 GA が EMV 用途に利用可能であることがわかる。

ここで、人間が手動で調整した設計パラメータと、提案 GA を用いて調整を行った設計パラメータ及

Table 1 Parameters of proposed GA

作成個体数 $n$			15
個体遺伝子長 $L$			10
探索する変数の数 $d$			5
最大世代数 $G$			10000
選択方式	多変数	エリート選択	
	一変数	エリート選択	
交叉方式	多変数	一様交叉	
	一変数	一様交叉	
突然変異の確率	多変数	反転	0%
		入替	80%
	一変数	反転	0%
		入替	80%

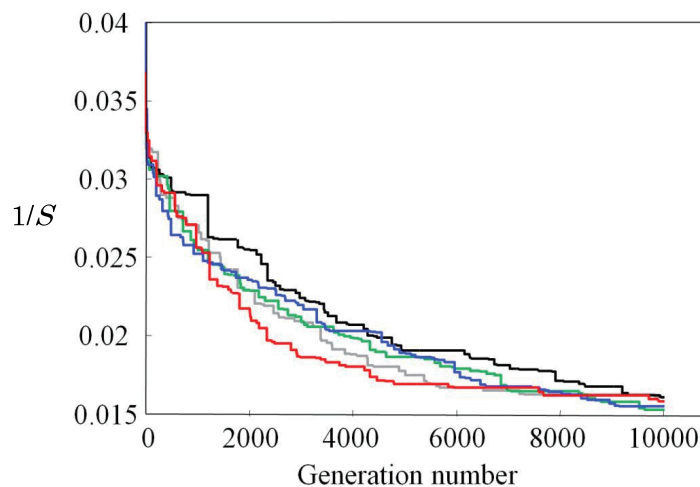


Fig.3 Relationship between generation number and  $1/S$ .

Table 2 Parameters (without GA, with GA)

	$K$	$\omega_n$	$\omega_d$	$\zeta_n$	$\zeta_d$	$S$
Without GA	1.28	484	546	0.284	0.374	28.8
With GA	3.86	476	933	0.520	0.627	46.4

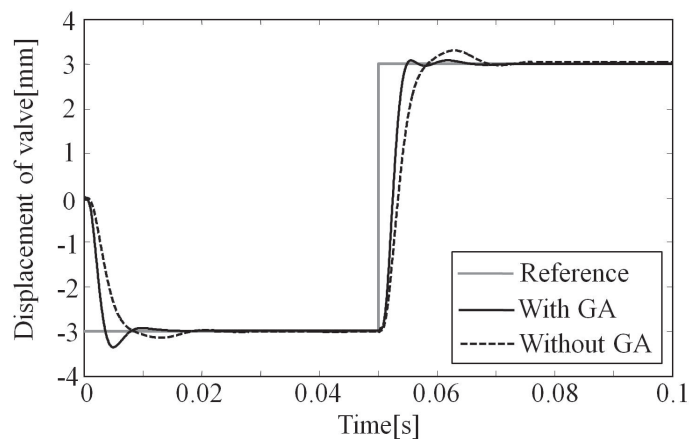


Fig.4 Time responses of displacement of valve.

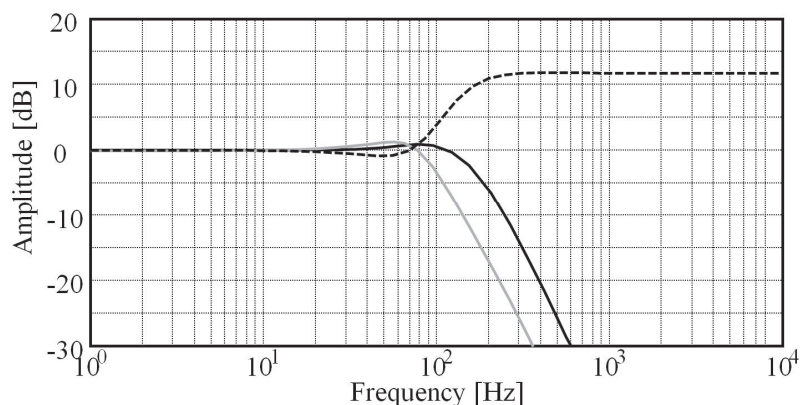


Fig.5 Frequency characteristic of feed forward compensator (with GA).

び適合度を Table 2 に示す. Fig.4 にその設計パラメータを用いた場合のバルブの位置応答波形を示す. 黒点線は手動で調整したパラメータを用いた場合, 黒線は提案 GA で調整したパラメータを用いた場合, 灰線はバルブの位置目標値をそれぞれ示す. Fig.4 より, 手動で調整したパラメータを用いた場合よりも GA で調整したパラメータを用いた場合では, 移動時間を短縮しながらオーバーシュートを大幅に削減できていることがわかる. このことから, GA による探索が EMV 用途において有効であるといえる. ここで, 移動時間とはバルブの位置目標値が変化してから, バルブが目標位置に到達するまでの時間とする.

一方, Fig.5 に手動で調整したパラメータを用いた場合, Fig.5 に GA で調整したパラメータを用いた場合のフィードフォワード補償器, 及び, それを用いた場合の制御系, それぞれの周波数特性を示す. 黒線は  $r(t)$  から  $y(t)$  まで, 灰線は  $r_m(t)$  から  $y(t)$  まで, 灰点線は  $r(t)$  から  $r_m(t)$  までの周波数特性を示す. Fig.5 より, 提案 GA で調整した設計パラメータを用いたフィードフォワード補償器によって, SMC 閉ループの周波数特性, つまり  $r(t)$  から  $y(t)$  までの周波数特性の共振点付近でのゲインが小さくなっていることが

わかる。さらに、サーボ帯域が拡大できていることがわかる。以上のことから、提案 GA を用いて調整したフィードフォワード補償器によってオーバーシュートの減少と移動時間の短縮が実現できたと考える。これらのことから、提案 GA で調整した設計パラメータが有効であることがわかる。

#### 4 結言

本稿では、EMV を実用化するために必要となる適応型制御系を実現するための第一歩として、多変数の探索が可能な GA を新たに提案，設計した。その GA を用いて EMV 制御系のフィードフォワード補償器の設計パラメータの調整を行った。その結果、手動で調整した設計パラメータより良い制御性能が得られる設計パラメータを得ることができた。このことから、提案 GA は適応型制御系への適用が可能であると考えられる。

ここで、提案 GA を用いた場合の適応型制御系の構築法について述べる。

EMV の特性が変化する前に、設計パラメータのエリート個体の集団を決定する。それ以後は、より良い制御性能が得られるように設計パラメータの探索を常に行い、EMV の経年変化に対応する。ただし、突然変異の確率は 0%とする。

今後の課題としては、より少ない世代数で適合度の高い設計パラメータを得るための提案 GA の改良、及び、EMV 実験装置へ提案 GA を実装し、その有効性を検証することがあげられる。

本研究は科研費(19860071)の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

#### 文献

- [1] 野平 英隆, 欧州における燃費向上技術の動向, 自動車技術, Vol.56, pp.20-26, 2002
- [2] 守谷 嘉人, 清水 弘一, 吉原 裕二, 動弁系技術の現状と今後の動向, 自動車技術, Vol.56, pp.22-26, 2002
- [3] M.Uchida, T.Yabumi, Y.Morita, K.Fuwa and H.Kando, “Development of high-speed and compact moving-magnet-type linear motor for EMV ～Positioning and Following Performance～”, Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.24, Nos.3-4, pp.163-176, 2007
- [4] 打田正樹, 竹村昌也, 森田良文, 神藤 久, 藪見崇生, 「自動車エンジン用電磁駆動バルブのための磁石可動型リニア振動アクチュエータの設計」, 日本AEM学会誌, Vol.14, No.4, pp.394-399, 2006
- [5] Masaki Uchida, Hideyuki Hasegawa, Ryohei Murata, Yoshifumi Morita and Takao Yabumi, “Sliding Mode Servo Control with High Pass Notch Filter for Electromagnetic Engine Valve”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2008, pp.589-594, 2008
- [6] 打田正樹, 村田領平, 森田良文, 神藤 久, 藪見崇生, 「自動車エンジン用電磁駆動バルブ位置決め制御系の設計とDSPへの実装」, 高速信号処理応用技術学会誌, Vol.9, No.2, pp.70-76, 2006
- [7] 石田良平, 村瀬治比古, 小山修平, パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版株式会社, 1999

(平成 21 年 3 月 31 日受理)