ガソリンエンジンの空燃比^{*}
ファジィ制御シミュレーション山本哲彦,^{*1} 金城 寛,^{*2} 玉城史朗^{*2}

Fuzzy Control Simulation of Air/Fuel Ratio of Gasoline Engine

Tetsuhiko YAMAMOTO, Hiroshi KINJO and Shiro TAMAKI

In this study, the simulator of a gasoline engine is built, and the fuzzy theory is applied to the air/fuel ratio controller. The gasoline engine simulator is made of simple mathematical equations and torque map. The simulator consists of three parts: intake, combustion and mechanical load. The intake part has a first-order lag. The combustion part is mapped from the data based on the engine torque test. The mechanical load part is described by a differential equation. The fuzzy controller is designed to keep the air/fuel ratio constant. The controller has two fuzzy rule tables made by considering the nonlinear characteristics of the oxygen sensor. Experimental results show that the engine system with fuzzy controller has good responses from the viewpoints of engine speed and torque control.

Key Words: Gasoline Engine, Simulation, Fuel Injection, Fuzzy Control, Air/Fuel Ratio Control

1. 緒 言

内燃機関、とりわけ自動車エンジンは燃焼系や流体系を含む非線形性および時変性の強いシステムであり、数学モデルの記述が困難なシステムである。本研究では、簡単な線形モデルと実験データからのマッピングモデルより自動車用ガソリンエンジンのシミュレータを作成し、これにファジィ制御による空燃比フィードバックを適用したシステムを開発した。

自動車用ガソリンエンジンの空燃比制御は、空燃比を検出する酸素センサの出力が理論空燃比付近で急変する特性を利用したフィードバック制御を行っている⁽¹⁾。しかし、この方法ではスロットル開度を急変した場合などエンジン状態過渡期での空燃比制御は困難であった。実空燃比と理論空燃比のずれを極力抑えるためには燃料噴射量を制御する必要があり、適正な空燃比制御が行われないと、息つき、サージング、バックファイアなどの現象が発生する。また排気中の有害ガスの増加の問題も生じる。

本研究では、ファジィ制御を適用することによりこ

れまでの非線形センサを用いた場合でも有効な空燃比制御が可能であることを示す。

2. 内燃機関のモデル

エンジンモデルの作成方法とその応用はこれまで各種研究されている^{(2) (3)}。本研究ではエンジンの動的モデルを図1に示す吸気系、燃焼系、機械負荷系の三部分から構成されるものとした。

2.1 吸気系 吸気系はスロットル弁開度 θ_s 、エンジンの回転速度 n を入力とし、燃焼系のシリンダに流入する空気量 Q_{ar} を出力するモデルである。吸気系のモデルを図2に示す。スロットル部空気流量については文献(4)に示されている等空気量線図の静特性がありこれにより任意スロットル開度の空気流量が求まる。このスロットル部空気流入量 Q_{ss} に一次遅れがかり、筒内流入空気量 Q_{ar} を得る。

$$Q_{ar} = \frac{1}{\tau s + 1} Q_{ss} \quad (1)$$

図1 エンジンモデル

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年3月18日。

^{*1} 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県西原町千原1)。

^{*2} 琉球大学工学部。

ここで、時定数 τ はエンジン回転速度 n とともに変化するものとし、次式のように仮定した。

$$\tau = f(n) = 4 \times \frac{6.0}{n} \quad (2)$$

2.2 燃焼系 燃焼系は Q_{ar} と回転速度 n 、空燃比 (A/F) 、点火時期 θ_i を入力とし、エンジントルク T_e を出力するモデルである。一般に、内燃機関のトルク T はスロットル開度 θ_s 、負荷トルク T_L 、回転速度 n の関数となる⁽⁶⁾。

$$T = f(\theta_s, T_L, n) \quad (3)$$

しかし、本研究では簡単化のためエンジンの出力トルク T_e を以下のようにおいた。

$$T_e = T_b(Q_{ar}, n) \cdot g_1(A/F) \cdot g_2(\theta_i) \quad (4)$$

T_b : 基本トルク関数
 g_1, g_2 : トルク効率関数

ここで出力トルク T_e は基本トルク T_b に空燃比と点火時期の補正係数 g_1, g_2 をかけて得られるものとしている。基本トルク T_b はスロットル部空気流量 Q_{ar} とエンジン回転速度 n をもとに図3の基本トルク線図から求められる。この線図は、実際のエンジントルク試験のデータより最小二乗法を用いて三次曲線近似して作成した。トルク効率関数 g_1, g_2 はそれぞれ空燃比と点火時期がトルクに及ぼす影響を考えたものであり、これらを二次曲線と近似してモデル化を行った。

図2 吸気系のモデル

図3 基本トルク線図

2.3 機械負荷系 機械負荷系は、燃焼系より出力されるトルク T_e によりエンジンの回転運動を決定する線形モデルであり、以下の微分方程式で表される。

$$J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + D_w \frac{d \theta_L}{dt} + T_o = T_e \quad (5)$$

これより回転速度 n (rpm) は

$$n = \frac{6.0}{2\pi} \cdot \frac{d \theta_L}{dt} \quad (6)$$

θ_L : 回転角度 (rad)

J_L : 慣性質量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

D_w : 粘性摩擦係数 ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)

T_o : 摩擦力 ($\text{N} \cdot \text{m}$)

となり、この n は再び吸気系・燃焼系の計算に使用される。

3. 燃料噴射量の決定方法と問題点

一般に燃料噴射量は、1回の吸入行程でシリンダに充填される流入空気量 Q_a をもとに決定される。理論空燃比を実現するための基本燃料噴射量は、

$$G_{fi} = \frac{G_a}{(A/F)_i} = \frac{6.0 \rho_a Q_a / n}{(A/F)_i} \quad (7)$$

G_a : 流入空気質量 (g)

G_{fi} : 基本燃料噴射質量 (g)

ρ_a : 空気の密度 (g/cm^3)

$(A/F)_i$: 理論空燃比 (=14.7)

となる。実際の燃料噴射量は、これにエンジンの動力性能・応答性・排出ガス浄化・燃料経済性などを考慮して補正を加え決定される。本研究では基本燃料噴射量のみで動作する排気量2000ccエンジンを制御対象と考え、これを基本システムと呼ぶことにする。また、燃料噴射方式は4シリンダSingle Point Injectionの同期噴射方式としてシミュレートする。

図4に電子式燃料噴射装置の概念図を示す。コントロールユニットに入力される計測空気流量 Q_{ar} は、スロットル部空気流量 Q_{ar} に対し一次遅れ+むだ時間が加わった特性を持つ⁽⁶⁾。また、酸素センサによる空燃比信号 (A/F) は、燃料を噴射してから吸入・圧縮・膨張・排気の4行程後の排気ガスより検知される。このようなセンサまでの計測信号の時間的遅れ、および酸素センサの非線形特性のためスロットル弁開度を急変する場合のようなエンジン状態過渡期において、基本システムでは理論空燃比を実現できない。

いま、無負荷時の基本システムを初期状態（回転速度 $n_0=2000\text{rpm}$ 、トルク $T_e=58.8\text{N} \cdot \text{m}$ ）から一定時間定常運転の後に急加速（スロットル弁開度を θ_s を 20° か

ら60°に急開)した場合のエンジンの応答を図5に示す。
(a) 筒内流入空気量 Q_{as} は一次遅れをもって増大する。
この時(b) トルクの低下及び大きな変動が発生し、(d)
空燃比は空気過剰となり、(c) エンジン回転速度の息
つき現象などが生じている。

図4 電子式燃料噴射装置の概念図

図5 基本システムのエンジン応答

このエンジンシステムにPI制御で空燃比をコントロ
ールした時のエンジンの応答を図6に示す。これより
(a) トルクの低下は改善されているが、小さな変動は
残っており、(b) エンジン回転速度の息つき現象はな
くなり、(c) 空燃比の大きなずれは抑えられているこ
とがわかる。

4. 空燃比のファジィ制御

4.1 ファジィ制御方法 本実験では、コントロ
ーラによって燃焼系での燃料噴射量を制御し、エンジ
ン状態過渡期の空燃比を理論空燃比に保つこと。また、
理論空燃比からはずれた場合は迅速にこれを戻すよう
にすることを制御目的とした。空燃比を理論空燃比付
近に保つことによってトルクおよび回転速度の応答の
改善も期待される。

ファジィ制御器は、前件部変数に計測空気流量の増
加量 ΔQ_{as} と回転速度の増加量 Δn をとり、後件部変
数には燃料噴射量の増分 ΔG_f とした。そして、制御
規則は酸素センサの非線形特性を考慮して空燃比が空
気過剰の場合と燃料過剰の場合との2通り作成した。
図7(a), (b) にファジィ制御規則を示す。これらの制
御規則は、空燃比が空気過剰の場合は全体的に燃料を

図6 PI制御のエンジン応答

図7 ファジィ制御ルールとメンバシップ関数

図8 ファジィ制御のエンジン応答

増加するように、燃料過剰の場合は燃料を減少するように燃料量の増分 ΔGf を決定する。

メンバシップ関数は図7 (c)に示すように ΔQ_{as} , Δn , ΔGf とも同じ台形型とした。

推論法にはmin-加算-重心法⁽⁷⁾を用いて燃料増加量 ΔGf_k を算出する。k時点での燃料量 Gf_k は、1サンプリング前の Gf_{k-1} と推論によって得られた ΔGf_k とで次式の数値アルゴリズム⁽⁸⁾を用いて決定する。

$$Gf_k = Gf_{k-1} + \Delta Gf_k \quad (8)$$

4.2 シミュレーション結果 図8にファジィ空燃比フィードバック制御による応答結果を示す。これより、ファジィ制御を行ったとき(a)わずかのトルク変動の変動は残るものの比較的滑らかに推移し、(c)理論空燃比とのずれ量を早く抑えているのがわかる。

4.3 考察 基本システムではエンジン過渡状態に空燃比が急激に空気過剰側になるため、トルクの変動、回転速度の息つきが発生していた。PI制御においては回転速度の息つき現象の改善はなされていたが、トルクの変動は残っていた。ファジィ制御の応答は、PI制御の結果と比較してエンジントルク、回転速度ともに滑らかに推移しており、空燃比は比較的速く理論空燃比に落ち着いている。

5. 結 言

本論文では、ガソリンエンジンのシミュレータを簡単な線形微分方程式とデータマッピングにより作成し、ファジィ理論を空燃比フィードバック制御に適用したところ良好な制御結果を得た。本研究で開発したガソリンエンジンシミュレータは、線形パラメータやトルク試験データによるマッピングモデルを変更することにより多様なガソリンエンジンをモデル化することが可能である。また、ファジィ空燃比フィードバック制御は、酸素センサの非線形特性を補い、従来のPIフィードバック制御よりも比較的適正な燃料量の決定を行うことができることを示した。

謝辞：本研究を行うにあたり、日立オートモティブエンジニアリング㈱より奨学寄付金を受けた。記して謝意とする。

文 献

- (1) 壺井：自動車とマイコン、朝倉書店、(1989)
- (2) 難波、亀井、大羽：低次元化モデルを用いた自動車用エンジンのLQ制御、システム／制御／情報、Vol. 34, No. 1, (1990)
- (3) 瀬古沢、足立、高橋：自動車における加速度サーボ制御方式の提案、第28回計測自動制御学会学術講演会予稿集、(1989)
- (4) 藤沢、小林：電子制御ガソリン噴射、山海堂、(1987)
- (5) 廣安：わかる内燃機関、日新出版、(1979)
- (6) 林田：カーエレクトロニクス、大河出版、(1986)
- (7) 廣田、寺野：特集／ファジィ制御、コンピュータール、コロナ社、No. 28, (1989)
- (8) 菅野：ファジィ制御、日刊工業新聞社、(1988)