過渡時空燃比制御における単純適応制御の適用の検討*

瀧山 武^{*1}Investigation about Simple Adaptive Control Application
for Air Fuel Ratio Control at Transient StateTakeshi TAKIYAMA^{*1}^{*1} Dept. of Mech., Grad. of Eng., Osaka City University
3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585, Japan

The regulation about emission purification and fuel consumption of an automobile becomes increasingly strict for environmental issue. Especially, the performance while transient state is focused on because transient state was increased in the new JC08 emission test-mode. Emission purification of the gasoline engine is attained both using a three way catalyst and controlling air fuel ratio(AFR) by means of an oxygen sensor while steady state. However, while transient state, AFR is deteriorated because of non-linear character such as a fuel wall-wet flow balance, allowance of each engine, aging and ambient of operation. Therefore, highly performed controller is necessary for AFR control at transient state. In this paper, an application of simple adaptive control(SAC) is investigated for AFR regulate control to compensate a disturbance affection at transient state. SAC has two degrees freedom system that was consist of both a feed forward tracker and a feedback stabilizer. Then, SAC control the time response of a plant to agree with that of a reference model. However, there were few report that SAC was applied as a regulator to overcome a disturbance. This paper investigated the control system to apply SAC for AFR regulate control at transient state. Then, the experiment were carried out at different operating condition, and the results showed a good regulating performance as a transient state regulator.

Key Words : Gasoline Engine, Adaptive Control, Transient State, Air Fuel Ratio, Simple Adaptive Control

1. 緒 言

内燃機関の燃費低減のためアイドル時機関停止や吸排気弁駆動可変などが行われ、機関運転が過渡状態になる頻度が増えている。また JC08 モードにおいても車両加速度が変化する過渡状態が増えており、過渡時の制御精度向上は不可欠である。ガソリン機関は排出ガス浄化のために三元触媒を使い、三元触媒を最適に作動させるために、吸気質量と燃料質量の比である空燃比をウィンドウと呼ばれる狭い範囲の中に保持することが必要である。定常運転状態であれば酸素センサを用いた空燃比フィードバック制御により、ウィンドウ範囲内に空燃比を保持することは可能である。しかし過渡運転時には、シリンダ内に流入する空気質量をサイクル毎に正確に把握することが困難なことや、吸気管内での燃料の付着蒸発バランスが崩れることなどや、しかも運転状態・機差・経年変化などの影響を受けてそれらの挙動が非線形に変化するため、過渡運転時に空燃比をウィンドウ範囲内に保持することは困難となる。したがって過渡運転時の空燃比を精度よく制御するために、制御系にロバスト性や適応性を持たせることなどの制御システムの検討がこれまで多く行われている^{(1)~(3)}。

このように近年さまざまな制御理論が適用されてきているが、いずれもフィードバック (FB) 制御を主体としたものが多い。通常の制御系構築において、速応性向上にはフィードフォワード (FF) 制御を用い、パラメータ変化にはフィードバック (FB) 制御で補償することがよく行われており、これらを扱う仕組みとして二入力制御システ

* 原稿受付 2011 年 2 月 9 日

^{*1} 正員, 大阪市立大学 大学院工学研究科機械物理系専攻
(〒 558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138)
E-mail: takiyama@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

ムがよく知られている．しかし，FF 制御系と FB 制御系を統合して扱うことや，また制御系のロバスト性のみならず，制御対象系のパラメータ変化に適応することなどが，制御系構築に望ましいと考えられる．

これまで，適応制御が空燃比制御に用いられた例はあるが⁽²⁾，パラメータ推定の簡易化や適応速度の改善など，さらなる適応性能向上が必要であると考えられる．単純適応制御 (Simple Adaptive Control) は，出力フィードバックで安定性を確保しフィードフォワード入力によりモデル出力と一致させる 2 自由度構造を持ち，かつそれぞれ適応的に補償する機構を備えた制御方式である⁽⁴⁾．したがって，FF 制御と FB 制御を統合的に容易に扱う制御系構築が期待できる．また，対象システムのパラメータ学習が不要なので，適応速度の高速化も期待できる．しかし，外乱抑制定値制御または空燃比定値制御に用いられた報告はあまり見られない．

本論文は，過渡時外乱を補償する空燃比定値制御のための SAC 適用を検討し，非常に優れた制御結果を得ることができたことを述べる．

2. 対象系システム

2.1 実験装置

供試機関は乗用車用の 660cc,3 気筒ガソリン機関をベンチ上に設置し，車両等価質量のない無負荷で実験を行った．回転系慣性が小さいので吸気流速の変化が早く，高速な空燃比制御が必要であると考えられる．排気マニホールド集合部に空燃比センサを取り付けた．計測制御周期は 4ms である．

2.2 対象系モデル

制御系検討を机上で実施するために対象系モデルを作成した⁽³⁾．図 1 に対象系モデルの構成を示す．吸気系・燃焼室・回転系慣性・燃料輸送遅れ・空燃比センサ遅れの各ブロックからなる．表 1 に本文や図中で用いた記号を示す．これ以外はその都度記す．燃料輸送遅れ部分については，よく知られている一次遅れ系を用いた⁽⁵⁾．スロットル弁開度 θ と燃料噴射期間 t_f が入力で空燃比 AFR が出力である．式 (1) に対象系モデルの状態方程式などを示す．これに離散化を施してシミュレーションを行った．同定結果を図 2 に示す．実験結果を exp. シミュレーショ

Fig. 1 Objective system

Table 1 Nomenclature

Engine Condition			State value of objective system	
AFR: Air fuel ratio	—, g_a : Intake air mass	mg	L_s : Dead time of AFR measurement	s
g_f : Fuel mass	mg, J : Inertia	kgm ²	T_{fb} : Time constant of fuel flow	s
n_e : Engine speed	s ⁻¹ , P_b : Intake manifold pressure	kPa	T_{ff} : Time constant of fuel film evaporation	s
T_e : Engine torque	N, T_L : Load torque	N	T_{pm} : Time constant of air intake system	s
t_f : Fuel injection period ms, α : Direct intake ratio of fuel	—	—	T_s : Time constant of AFR measurement	s
λ_o : Air excess ratio	—, θ : Throttle valve angle	rad		
~	: Symbol of target value			

ン結果を sim. で示す．図 2[A] はスロットル弁開度 θ をステップ状に開けた加速時と閉じた減速時の挙動を示し，加速時はほぼ一致しているものの，減速時にはやや不一致がみられる．これは吸気挙動の時定数などの非線形性によるものと考えられる．図 2[B] は燃料噴射期間 t_f をステップ状に変化させた場合で減少時にやや不一致が見られ，燃料の吸気管壁への付着蒸発の挙動の非線形性によるものと考えられる．これらの不一致に対しては時定数の場合分けなどを行えば一致する．これ以外は両者ほぼ良好に一致しており，モデルは妥当であると考えた．

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), y(t) = \mathbf{c}\mathbf{x}(t), AFR(t) = y(t + L_s) \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \frac{\partial T_L}{\partial n_e} & \frac{1}{J} \frac{\partial T_e}{\partial g_a} \frac{\partial g_a}{\partial P_b} & 0 & \frac{1}{J} \frac{\partial T_e}{\partial g_f} & 0 \\ -\frac{1}{T_{pm}} \frac{\partial P_b}{\partial n_e} & -\frac{1}{T_{pm}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_s} \frac{\partial g_a}{\partial P_b} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} & -\frac{1}{T_s} & \frac{1}{T_s} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{fb}} & \frac{1}{T_{fb}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{ff}} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{pm}} \frac{\partial P_b}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\alpha}{T_{fb}} \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \\ 0 & \frac{1-\alpha}{T_{ff}} \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \end{bmatrix}, \mathbf{c} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0], \mathbf{u} = [\theta \ t_f]^T$$

[A] θ step input result [B] t_f step input result

Fig. 2 Model identification results

3. 空燃比制御システムの構成

3.1 単純適応制御 (Simple Adaptive Control)

単純適応制御 (SAC) は，式 (2) で示す可制御可観測な n 次 1 入力制御対象を，プラントパラメータが未知であっても，式 (3) で示す安定な n_m 次 1 出力理想規範モデルに一致させる制御入力を求める適応制御手法である．

$$\dot{\mathbf{x}}_p(t) = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{b}_p u_p(t), y_p(t) = \mathbf{c}_p \mathbf{x}_p(t) \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{b}_m u_m(t), y_m(t) = \mathbf{c}_m \mathbf{x}_m(t), n \geq n_m \quad (3)$$

$$e(t) = y_p(t) - y_m(t) \quad (4)$$

以下の仮定 1,2 が成立し， $u_m(t), \dot{u}_m(t)$ は有界とする．この時に式 (5) の適応制御入力により， $e(t)$ は有界となる．特に $u_m(t) \equiv \dot{u}_m(t) \equiv 0$ の場合には $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ となる⁽⁶⁾．この制御システムが SAC である．

仮定 1 プラントは ASPR (概強正実) である．ASPR の十分条件は (i) 相対次数 γ が 0 または 1 (ii) 最高位係数が正 (iii) 最小位相系，を満たすことである．

ASPR にならない場合は，並列フィードフォワード補償器 (PFC) $G_f(s)$ を付加し，拡張システム $G_a(s) = G_p(s) + G_f(s)$ を構成して ASPR にすればよいことが知られている⁽⁴⁾．

仮定 2 理想モデルの出力 y_m に制御対象の出力 y_p を完全に追従させる理想的なフィードフォワード制御入力 (Command Generator Tracker 解) を持つ．下記の仮定 (i)(ii)(iii) が成立すれば，CGT 解は存在する．

$$\text{仮定 (i) } \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{b}_p \\ \mathbf{c}_p^T & 0 \end{bmatrix} = n + 1$$

$$\text{仮定 (ii)} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{b}_p \\ \mathbf{c}_p^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{I}_{n+1}$$

仮定 (iii) Ω_{11} の固有値は A_m の固有値の逆数と一致しない。

SAC の制御入力は以下のとおりとなる。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{k}(t)^T \mathbf{z}(t), \quad \mathbf{k}(t) = \begin{bmatrix} k_e(t) \mathbf{k}_x(t)^T k_u(t) \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} e(t) \mathbf{x}_m(t)^T u_m(t) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$e(t) = y_a(t) - y_m(t) = y_p(t) + y_f(t) - y_m(t), \quad y_a(t) = y_p(t) + y_f(t), \quad y_f(t) : \text{output of PFC} \quad (6)$$

$$\mathbf{k}(t) = \mathbf{k}_I(t) + \mathbf{k}_P(t) = \begin{bmatrix} k_{I_e}(t) \mathbf{k}_{I_x}(t)^T k_{I_u}(t) \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} k_{P_e}(t) \mathbf{k}_{P_x}(t)^T k_{P_u}(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} k_e(t) \mathbf{k}_x(t)^T k_u(t) \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{k}}_I(t) = -\Gamma_I \mathbf{z}(t) e(t), \quad \mathbf{k}_I(0) = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{k}}_P(t) = -\Gamma_P \mathbf{z}(t) e(t) \quad (8)$$

$$\Gamma_I = \begin{bmatrix} \gamma_{I_e} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{I_x} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{I_u} \end{bmatrix}, \quad \Gamma_P = \begin{bmatrix} \gamma_{P_e} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{P_x} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{P_u} \end{bmatrix}, \quad \gamma_{I_x} = \gamma_{I_x}^T > 0, \quad \gamma_{P_x} = \gamma_{P_x}^T > 0 \quad (9)$$

$$\therefore \mathbf{u}(t) = k_e(t)e(t) + \mathbf{k}_x^T(t) \mathbf{x}_m(t) + k_u(t)u_m(t) = U_e(t) + U_x(t) + U_u(t) \quad (10)$$

$$k_e(t) = k_{I_e}(t) + k_{P_e}(t) = \int [\gamma_{I_e} e^2(\tau)] d\tau + \gamma_{P_e} e^2(t), \quad \mathbf{k}_x(t) = \mathbf{k}_{I_x}(t) + \mathbf{k}_{P_x}(t) = \int [\gamma_{I_x} \mathbf{x}_m(\tau) e(\tau)] d\tau + \gamma_{P_x} \mathbf{x}_m(t) e(t) \quad (11)$$

$$k_u(t) = k_{I_u}(t) + k_{P_u}(t) = \int [\gamma_{I_u} u_m(\tau) e(\tau)] d\tau + \gamma_{P_u} u_m(t) e(t)$$

式 (5) におけるゲイン $\mathbf{k}(t)$ の選定方法として、式 (7) に示す積分+比例型適応調整則と称される方法を用いた。 $\mathbf{k}_I(t)$ で示す第 1 項目が積分型適応調整則、 $\mathbf{k}_P(t)$ で示す第 2 項目が比例型適応調整則と称される。したがって、式 (9) に示す積分ゲイン増加速度に相当する Γ_I と比例ゲイン Γ_P が設計パラメータとなる。このように SAC は CGT を陽に求める必要はなく、式 (10) を制御入力とする。図 3 に、SAC の基本構成を示す。

Fig. 3 Schematic system of simple adaptive control

3.2 過渡時空燃比制御への SAC の適用

過渡時として、加速減速の θ 操作で生じる吸気質量変化による空燃比変動を抑制して理論空燃比 (14.5) 一定に制御することを目的とし、そのためには入力を t_f 、出力を AFR としたシステムを対象とする。この対象系の伝達関数は図 1 より式 (12) となる。

$$\frac{AFR(s)}{t_f(s)} = \frac{1 + \alpha T_{ff}s}{1 + T_{ff}s} \frac{1}{1 + T_{fb}s} \frac{1}{1 + T_{fs}s} \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} e^{-L_s s} \quad (12)$$

このように対象系にはむだ時間があるため、ASPR の条件は満たさない。ただし、むだ時間を一次遅れ近似した報告⁽⁷⁾や、むだ時間を考慮しなくても安定に制御できた報告⁽⁶⁾がある。また、制御対象のむだ時間 L_s は一次遅れシステム $1/(1 + T_s s)$ の一部として考えることもできるので、陽な扱いを必要としないことも考えられる。検討の結果、むだ時間を考慮しない対象系に対して ASPR であれば安定に制御できた。この時式 (12) の相対次数は 2 なので、ASPR にするために式 (13) に示す 1 次の PFC を使い、拡張システム $G_a(s) = G_p(s) + G_f(s)$ を構成した。 $\delta = 10^{-5}$, $T_\delta = 0.2$ とし、制御性能に与える影響を少なくした。

$$G_f(s) = \frac{\delta}{1 + T_\delta s} \quad (13)$$

3.2.1 定値制御のための SAC 構成

緒言で述べたように, SAC はモデル一致を目指す FF 制御部と安定化を図る FB 制御からなる. しかし, 定値制御を行う場合は, 図 3 において $u_m = x_m = y_m = 0$ となり, K_e のゲインだけで動作する制御系になる. このようなレギュレータとして用いた報告もあるが⁽⁸⁾, 本対象系の外乱抑制を目的とした場合は安定した制御ができなかった. 検討の結果, SAC の制御入力要素として u_m, x_m の FF 制御部が大変重要なことがわかった. ところで, θ 外乱を t_f 入力により素早く制御するためには, 対象系モデルの逆モデルによる FF 制御が適している⁽³⁾. そこで, 以下で述べる対象系逆モデルの出力を u_m に用いることを検討した.

3.2.2 対象系逆モデル

図 1 より, 入力 θ, t_f から g_a までの入出力関係は式 (14), t_f から g_f までの伝達関数は式 (15) となる. 吸気質量 g_a や燃料質量 g_f に関わらず空燃比を一定にするためには式 (16) の条件を満たす必要がある. したがって, 過渡時の θ 操作による空燃比変動を燃料噴射 t_f で補償するために, 式 (17) で示す逆モデル伝達関数を用いて求めた噴射期間 t_{fFF} を入力することが必要となる. これに離散化を施して入力 u_m に用いた.

$$\theta(s) \frac{\partial P_b}{\partial \theta} - B(s) \cdot D(s) \frac{\partial T_e}{\partial g_f} t_f(s) = \left(B(s) \frac{\partial T_e}{\partial g_a} + \frac{1+T_{pms}}{\frac{\partial g_a}{\partial P_b}} \right) g_a(s), \quad B(s) = \frac{\partial P_b}{\partial n_e} \frac{1}{Js + \frac{\partial T_L}{\partial n_e}}, \quad D(s) = \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \frac{1+\alpha T_{ffs}}{1+T_{ffs}} \frac{1}{1+T_{fbs}} \quad (14)$$

$$\frac{g_f(s)}{t_f(s)} = \frac{1+\alpha T_{ffs}}{1+T_{ffs}} \frac{1}{1+T_{fbs}} \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \quad (15)$$

$$g_a(s) \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} + g_f(s) \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} = 0 \quad (16)$$

$$G_M'^{-1}(s) = \frac{t_{fFF}(s)}{\theta(s)} = \frac{\frac{\partial P_b}{\partial \theta} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} (1+T_{ffs})(1+T_{fbs})}{\frac{\partial g_f}{\partial t_f} (1+\alpha T_{ffs})} \frac{(Js + \frac{\partial T_L}{\partial n_e})}{\left[\frac{\partial P_b}{\partial n_e} \left(\frac{\partial T_e}{\partial g_f} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} - \frac{\partial T_e}{\partial g_a} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} \right) - \frac{\partial g_f}{\partial g_a} (T_{pms} + 1) (Js + \frac{\partial T_L}{\partial n_e}) \right]} \quad (17)$$

3.2.3 空燃比定値制御 SAC の構成

図 3 や式 (10) で示すように SAC には対象システムの状態量 x_m を用いることができるので, 機関内の状態である n_e, p_b, g_a などを利用できる. しかし検討の結果, 制御システムを簡便にするために, 式 (18) に示す AFR のみをシステム状態量に用いた. 式 (19) に SAC で扱う状態量を示す. 構成した制御系システムを図 4 に示す. 規範モデル $G_M(s)$ は, 図 1 に示す対象系モデルにおいて同定した値を用いたものとした. 式 (20) で示す. また, PFC を付加した時の定常偏差を少なくするために, $G_f(s)$ の入力を $G_p(s)$ 入口 (U_x, U_u 加点后) から k_e 出口 (U_e) に移動した⁽⁶⁾. 式 (21) が具体的な設計パラメータである.

$$x_m(t) = AFR(t) \quad (18)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} e(t) AFR(t) u_m(t) \end{bmatrix}^T, \quad u_m(t) = t_{fFF}(t) \quad (19)$$

$$G_M(s) = c(sI - A)^{-1} B \quad (20)$$

$$\Gamma_I = \text{diag} [\gamma_e \gamma_{AFR} \gamma_u], \quad \Gamma_P = \text{diag} [\gamma_{p_e} \gamma_{p_{AFR}} \gamma_{p_u}], \quad k_I(0) = 0 \quad (21)$$

Fig. 4 AFR regulation control system using SAC

4. 実験結果

まず, モデル同定運転点とほぼ同一の機関回転速度 30s^{-1} 近傍を運転開始点とした実験を行った. 外乱として, 加速減速に相当する θ 開閉を 20 秒を 1 周期として 50% duty で, 12 回繰り返した. 図 5 に示す. この外乱 θ 開度の大きさは, 未学習時の失火による機関停止を防ぐために 0.028rad 程度とした. ゲイン $\Gamma_I = [\gamma_e, \gamma_{AFR}, \gamma_u]$, $\Gamma_P = [\gamma_{Pe}, \gamma_{PAFR}, \gamma_{Pu}]$ は実験的に求めた. 表 2 に示す.

Fig. 5 Periodic disturbance input signal and evaluation division

Table 2 Gain table

γ_e	γ_{AFR}	γ_u	γ_{Pe}	γ_{PAFR}	γ_{Pu}
60×10^{-6}	60×10^6	240	50×10^{-6}	2×10^7	200

[A] Time response of engine condition

[B] Gain response

[C] Control input response from SAC

Fig. 6 Experimental results using SAC

[A] SAC result

[B] FB(PI) with FF control result

Fig. 7 Experimental results in periodic over write

図 6 に実験結果の時間応答を示す. 図 6[A] は上段からスロットル弁開度 θ , 吸気管負圧 P_b , 空燃比 AFR, 回転速度 n_e の全 12 周期間の機関状態の時間挙動を示す. θ 開度の変化は 0.028rad 程度だが無負荷なので n_e が 2 秒

間で 8s^{-1} 程度急激に変化しており、急加速に相当すると考えている。またゲイン初期値をゼロから始めたので、最初の 1 周期目の加速時空燃比挙動は θ 外乱により大きく希薄側に变化しているが、それ以降はほぼ理論空燃比 (target) 近傍に一致していることがわかる。

図 6[B] は式 (11) に示す SAC の制御ゲインの時間応答を示す。 θ 外乱により空燃比変化が生じるため目標値との偏差 $e(t)$ が生じて積分修正則が働き k_{Iu}, k_{IAFR}, k_{Ie} の学習が始まり、値が大きく変化する。このゲイン変化速度は表 2 で示す $\gamma_u, \gamma_{AFR}, \gamma_e$ で調整し、2 周期目以降の増加が少なくなるように調整した。また、1 周期目は目標値との偏差が大きいのので比例調整則からも修正が行われて各比例修正ゲイン k_P が大きく振動し、このため空燃比挙動も振動している。積分調整則だけの場合はこの振動は観察されなかった。2 周期目以降は、比例調整則による修正はほとんど行われず、積分調整則による修正も k_{Iu} はほぼ定常値になっているがゲイン k_{IAFR}, k_{Ie} は漸増している。

図 6[C] に式 (10) や図 4 中で示す SAC による算出値の各入力 U_u, U_x, U_e 毎の時間挙動を示す。図 6[B] で示したとおり k_{AFR}, k_e とともに漸増しているが、式 (10) で示すように状態量 $[e(t), AFR(t), u_m(t)]$ と積算して入力になる。そして、ゲインの学習により偏差 $e(t)$ が減少して零に近づいているので U_e は大変小さい入力になり、 U_x は外乱入力時に AFR が定常値から外れた時に作用するので、ゲインの漸増はほとんど影響を与えないことがわかる。このように、SAC 制御入力要素のうち、過渡の外乱変化時は U_x 、定常的な偏差抑制は U_e が負担し、過渡と定常の両者において U_u が多大な動きをしていることがわかる。

時間軸を拡大してわかりやすく示すために、1 周期毎の応答を全周期分重ね描きした結果を図 7 に示す。最下段に AFR を示す。図 7[A] に SAC を用いた実験結果を示す。最初の 1 周期目だけが目標値から大きく離れているが、1 周期内でゲインがほぼ定常に達したので 2 周期目以降はほぼ目標値に一致していることがわかる。また、1 周期目では空燃比が希薄になっているため回転速度の立上りがやや遅れているが、2 周期目以降ではほぼ同一の加速になっていることがわかる。

比較のために、PI 制御+FF 制御で行った結果を図 7[B] に示す。PI 制御ゲインは実験的に求めた。FF 制御系は、SAC に用いたものと同一の逆モデルである。以降 FBwFF と称する。こちらは全 12 周期ともほぼ同一の挙動であることがわかる。外乱入力時には、パラメータ変化などの影響でわずかに空燃比が最大で 0.3 程度約 1 秒間、目標値から離れていることがわかる。

実験結果の評価として、各周期毎に空燃比分布を統計的に解析した。また、1 周期内を図 5 中に示すように (i) 初期定常区間 ($0 \leq t < 5, ss$ と記す) (ii) 過渡立上り区間 ($5 \leq t < 8, ut$ と記す) (iii) 立上り後定常区間 ($8 \leq t < 15, us$ と記す) (iv) 過渡立下がり区間 ($15 \leq t < 18, dt$ と記す) (v) 立下がり後定常区間 ($18 \leq t < 20, ds$ と記す) の区間に分割して過渡・定常状態毎の空燃比分布の解析も行った。図 8 に示す。

図 8[A] は 1 周期毎の統計解析結果を連続的に示したもので、上段は各周期における空燃比の平均値と周期内の最大最小値、下段は空燃比が 14.5 ± 0.1 の範囲内にある割合を示し、集中度 (convergent ratio) と以下称す。以下の

Fig. 8 Numerical analyses of control results in each period

ことがわかる．

- (1) 空燃比平均値は，SAC は 2 周期目以降ではほぼ目標値と一致しているが，わずかながら若干過濃側 (14.5 以下) になっている．FBwFF はほぼ目標値と一致している．
- (2) 各周期における最大値と最小値は FBwFF の方が大きい．SAC の最大値は評価範囲の上限 (14.6) と下限 (14.4) からあまり離れていないが，FBwFF ではこの上下限から大きく逸脱している．
- (3) 最大値最小値の振れ幅は，FBwFF では上限下限側とも同じようだが，SAC では最小値が下限側 (14.4) を下回る大きさが多い．このため，やや SAC の平均値は過濃側になったと考える．
- (4) 14.5 ± 0.1 範囲内への集中度 (con. ratio) は，FBwFF は全周期とも 93% 前後である．SAC は 3 周期目以降で FBwFF より確率が良くなり，6 周期目以降ではさらに良くなり，97% 前後の集中度となった．

このように，SAC の学習は早く進行するが，良好な制御性能を得るためには数周期の繰り返しが必要である．

さらに図 5 に示したように 1 周期内を立上り・立下り，定常・過渡に区間分割した各区間毎の評価結果を図 8[B] に示す．各区間は図中に ss, ut, us, dt, ds として示す．図 8[A] と同様に上段は各区間における空燃比の平均値と区間内の最大最小値，下段は空燃比が 14.5 ± 0.1 の範囲内にある集中度を示す．なお見やすくするために，最大最小値の限度を示す表記を略し，また，過渡の立上り区間評価結果該当箇所を 印 (立上り過渡時=加速時)，立下り区間評価結果該当箇所を 印 (立下り過渡時=減速時) で示す．印をつけた箇所以外は定常区間を示す．

- (a) 区間毎の平均値の変動は，FBwFF の方が SAC より少ない．
- (b) 定常区間 (無印箇所) での平均値は SAC, FBwFF いずれでもほとんど目標値近傍にある．
また，定常区間での最大最小値は， 14.5 ± 0.1 の範囲内にある．
- (c) 立上り過渡区間 (印, 加速時) での最大値は，SAC の場合は評価範囲上限 (14.6) 近傍にあるが，FBwFF の場合では上限から大きく離れていることがわかる．
- (d) 立下り過渡区間 (印, 減速時) での最小値は，FBwFF の場合では評価範囲下限 (14.4) から大きく離れており，立上り過渡とほぼ対称の挙動であることがわかる．

SAC の場合は FBwFF より少ないものの下限からやや離れ，立上り過渡と非対称の挙動であることがわかる．

- (e) 下段の集中度でみると，無印の定常区間ではほぼ 100% 範囲内にある．

FBwFF の場合では，立上り過渡区間 (印) 立下り過渡区間 (印) とともに，集中度が低下している．特に立下り過渡の方が悪化している．

SAC の場合では，立上り過渡区間 (印) では，あまり集中度が低下せず良好な制御ができているが，立下り過渡区間 (印) では FBwFF より少ないもののやや低下している．

このように，SAC では過渡の立上り (加速) 時と立下り (減速) 時での制御性能にやや差が生じていることがわかる．これはモデル同定の際に示したように，加速・減速時の時定数などの違いによる影響であると考えられる．

したがって，SAC はやや非線形性には弱いものの，過渡時のレギュレータとして通常の 2 入力制御 (FBwFF) より非常に優れた制御結果を得ることができたと考えられる．

4.1 運転点に対するロバスト性検討

機関運転点により吸気の感度や時定数などが変化するので，FF 制御系には運転点に合致したパラメータが必要となる．運転点に関するロバスト性検討として，初期機関回転速度 30 s^{-1} でのモデル・制御系定数を用いて，初期機関回転速度を $25, 36 \text{ s}^{-1}$ 回転近傍と移動して同様の実験を行った．紙面の都合で，周期毎の空燃比制御値の統計解析結果を，図 9 に SAC を，図 10 に FBwFF の結果を示す．参考のため，図中には前節で示した初期回転速度 30 s^{-1} の結果も併記する．

各図 [A] は，空燃比平均値，最大最小値と空燃比が 14.5 ± 0.1 の範囲にある集中度の周期毎の挙動を，初期機関回転速度毎に示す．図 9[A] に示す SAC の場合，運転点が変わると若干最大値側の偏差が大きくなり最小値側の偏差が小さくなるようである．また集中度は若干よくなる場合が多い．いずれにしても，初期回転速度が変化しても，平均値，最大最小値，集中度はあまり変化しない結果になっており，運転点の変化にはロバストであると考えられる．一方図 10[A] に示す FBwFF の場合は，初期回転速度 36 s^{-1} の場合は 30 s^{-1} の場合とほとんど変化がないが，

[A] average,max.,min. AFR and concentration within ± 0.1 while each period

[B] AFR distribution while last three period

[C] AFR distribution while last three period focussed on transient state

Fig. 9 Comparison result with operating points, Numerical analyses of control results using SAC

[A] average,max.,min. AFR and concentration within ± 0.1 while each period

[B] AFR distribution while last three period

[C] AFR distribution while last three period focussed on transient state

Fig. 10 Comparison result with operating points, Numerical analyses of control results using FBwFF

25s⁻¹ の場合、最大値最小値の振幅が大きくなり、集中度は大幅に低下する。これは、25s⁻¹ の運転点では時定数変化などの影響が大きく現れるためであると考えられる。また、いずれの運転点でも集中度は SAC の方が FBwFF

より良いことがわかる。

各図 [B] に、全 12 周期における最後 10,11,12 周期目の計 3 周期間の空燃比分布を初期回転速度毎に示す。左から順に $30, 25, 36 \text{ s}^{-1}$ の場合である。また図中に平均値 (ave.), 分散 (var.), 誤差自乗 (e^2), 尖度 (kur.), 14.5 ± 0.1 の範囲内への集中度を記す。図 9[B] に示す SAC の場合は、平均値はわずか 0.01 程度であるが目標空燃比値と偏差が生じている。しかし、分散、誤差自乗が小さく、尖度も大きく、非常に目標値近傍に集中している。そして集中度も 98% 程度と非常に高い。また運転点を変えてもこれらの特徴は変わらず、運転点の変化にはロバストであるといえる。目標値と若干偏差が生じるのは PFC の影響なども考えられるので今後の検討としたい。図 10[B] に示す FBwFF の場合は目標空燃比値と一致しているが、分散や誤差自乗が大きく、やや空燃比分布が広がり集中度も SAC より低い。特に初期回転速度が 25 s^{-1} の場合は空燃比分布の幅が大きく広がり、 14.5 ± 0.5 の範囲を越える頻度が大変多くなり集中度も低くなる。

各図 [C] には、さらに過渡性能に重点を置いた評価として、前記 10,11,12 周期の内、図 5 中 uz,dz で示す定常区間を短くした範囲における空燃比分布を示す。図 9[C] に示す SAC の場合では集中度が若干 2 ポイント程度低下するものの分布の違いはあまり現れない。図 10[C] に示す FBwFF の場合では中央値の割合が大きく低下し、集中度も大幅に低下することがわかる。したがって、FBwFF の制御性能評価は定常状態の重みが多く、過渡の制御性能は SAC が非常に良いことがわかる。

図 11 に図 9,10 中に記した空燃比平均値、集中度、誤差自乗について SAC と FBwFF の比較を示す。図 11[A] は図 9,10[B] 中に記した最終 3 周期の比較を示し、図 11[B] は図 9,10[C] 中に記した最終 3 周期中の過渡状態に重点を置いた比較を示す。空燃比平均値は通常用いられる FBwFF の方が目標値と一致しており、SAC では若干ではあるが目標値と離れている。しかしその差はわずかであり、それ以外の集中度と誤差自乗はいずれも SAC の方が良好であり、また初期回転速度が変化しても SAC の方が評価値の変動が少なくかつ良好であることがわかる。また、過渡状態を重点比較した場合は FBwFF が大きく悪化しており、SAC の過渡状態の制御性能は良好であるといえる。このように、SAC は従来の FBwFF と比較して制御性能が良好でロバストであるといえる。

本研究は実験装置の都合で無負荷で実験を行った。有負荷の場合は車体質量に相当する慣性負荷が大きくなるほか、同一回転速度において機関トルクが高い運転点に移行するため、対象系パラメータが変化する。この場合、吸気ゲインが小さくなることや空燃比挙動の動特性が緩やかになることなどが考えられるので、SAC と従来の FBwFF の制御性能差が小さくなることも考えられる。また、無負荷時と有負荷時いずれにおいても機関回転速度変化幅を同一にした場合には、有負荷時ではスロットル弁開度の変化幅が大きくなり、過渡状態の期間が長くなるので SAC の優位性が拡大することも考えられる。

また、SAC は適応機構によりゲイン調整が比較的簡単でありかつ高精度な制御を行うことができるので、従来のゲイン調整に労を要す FBwFF と比べると低コストであると考えられる。

以上より、SAC を過渡時空燃比制御に用いることで大幅な制御性能向上が得られることがわかった。

Fig. 11 Comparison results of evaluation value with SAC and FBwFF

5. 結 言

単純適応制御 (SAC) を過渡時空燃比制御に適用することを検討し、以下の結論を得た。

1. 対象系はむだ時間を有するシステムなので、ASPR なシステムではないが、検討の結果 SAC の適用が可能であった。
2. SAC を過渡時の空燃比定値制御に用いるためには逆モデル FF 制御系の入力が必要であった。
3. SAC は加速・減速時などに生じる時定数の変化にやや弱いものの、高精度の制御を行うことができ、制御精度を大幅に向上することができた。特に、SAC は過渡の制御性能が優れていると考えられる。
4. 数回の学習繰り返しで精度よく制御できるので、SAC の適応速度は比較的速いと考えられる。
5. SAC は初期機関回転速度を変化させた場合に制御性能の変化が少なく、ロバスト性を有した。
6. SAC を用いると目標値と若干偏差が生じるのは PFC の影響なども考えられるので今後の検討としたい。

文 献

- (1) 安井裕司, 赤崎修介, 上野将樹, 岩城善久, 触媒後 O₂ フィードバックのための適応スライディングモード制御, 自動車技術会論文集, Vol.33, No.3, (2002-7), pp.43-48.
- (2) Maki H., Hasegawa Y., Akazaki S., Komoriya I., Nishimura Y., Hirota T., Real Time Engine Control Using STR in Feedback System, *SAE Tech paper*, 950007, (1995).
- (3) 瀧山武, 機関・CVT・A/F 統合制御における非干渉制御理論の適用の検討, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.67, No.658, (2001-6), pp.1598-1604.
- (4) 水本郁朗, 岩井善太, 単純適応制御 (SAC) の最近の動向, 計測と制御, Vol.40, No.10, (2001-10), pp.723-728.
- (5) C.F. Aquino, Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine, *SAE Paper*, 810494, (1981).
- (6) 岩井善太, 水本郁朗, 水本弘文, “単純適応制御 SAC”, (2008), 森北出版
- (7) 岩井善太, 江頭豊一, 日野満司, 高橋将徳, 京和泉宏三, “単純適応制御 (SAC) 手法の油圧サーボシステムの位置制御への応用”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.61, No.690(1995), pp.3991-3998.
- (8) 佛慈浪漫人, 野波健蔵, “低損失ホモポーラ磁気軸受フライホイールのゼロバイアス単純適応制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.757,(2009), pp.2507-2514.