適応 PID 制御と適応 FF 機構が融合した過渡時空燃比制御の検討*

瀧山 武^{*1}Investigation about Air Fuel Ratio Control at Transient State
by Fusing Adaptive PID Control and Adaptive Feedforward SystemTakeshi 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. Both a feedforward and a feedback control were required to obtain such performance. However, each control system was designed independently. Therefore harmonizing both control system is desired when those were performed at a same time. In this paper, adaptive gain system was respectively equipped to the feedforward system and the feedback control. After some time repeat of a regulate control, those control system were fused and performed as a feedforward controller with a small feedback compensation. Then, the experiment were also carried out at different operating condition. The results showed a good regulating performance as a transient state regulator.

Key Words : Gasoline Engine, Adaptive Control, Transient State, Air Fuel Ratio, Adaptive PID, Feedforward 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 (Air Fuel Ratio: AFR) 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)}が、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自由度制御システムがよく知られている。過渡時の制御性能向上にはこれら FF 制御系と FB 制御系両者を活用することが必須であるが、それらは個別に設計されることが多いため、両者併用時には FF 制御系と FB 制

* 原稿受付 2011 年 6 月 10 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

御系の両方から運転条件や偏差に応じた入力が行われるので、過剰な補償が行われないように各制御系からの入力の兼ね合いをとるなどの調和を図る必要があると考えられる。

単純適応制御 (SAC) は、出力 FB で安定性を確保し FF 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⁾。そこで、FF 制御と FB 制御併用時の統合的な制御系構築を期待して検討したところ良好な制御結果を得ることができ、FF 入力が非常に有用であり、目標値近傍に非常に集中しているものの統計処理すると 0.1% 程度の偏差が残存したので、FB 制御系に改善が必要であるという知見を得た⁽⁵⁾。本論文はこの観点より、ロバスト性を低下させずに偏差を減らすことを主目的とした。

FB 制御性能の改善のために、SAC に PID 制御を併用した報告⁽⁶⁾もあるが、本論文では SAC と同様に制御対象系の概強正実 (ASPR) 性を利用して適応ゲインを用いる適応 PID 制御を用いた。適応機構により FB ゲインが可変となるので、制御対象のゲインや時定数などのパラメータ変化に応じた適切な FB 制御の実施が期待できる。また ASPR 性を利用した適応 PID 制御は制御対象のパラメータ推定を必要としないので、モデル規範型適応制御やニューラルネットワークなどよりも適応速度が早いことも期待できる。同様に FF 制御系にもパラメータ変化に応じた適応が必要である。スライディングモード制御を利用した適応 FF 制御機構の検討⁽⁷⁾も行われているが、簡単に適応を図る手法として、SAC の FF 入力機構と同様の可変ゲインと対象系逆モデルを用いた FF 制御系を用いた。そして FB 制御系と FF 制御系両者に適応機構を持たせることで、両者併用時の調和を自動的に図ることを期待し、制御特性の解析を行った。本論文は FF 制御系と FB 制御系の各々に適応制御機構を用いることで、パラメータ変化に対応しかつ速応性に優れるという FB 制御系と FF 制御系の両者の長所が融合した良好な過渡時空燃比制御ができたことを報告する。

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。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⁽⁸⁾。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 y_{af} が出力である。

スロットル弁開度をステップ状に変化させた時の同定結果を図 2 に示す⁽⁵⁾。上段から順にスロットル弁開度 θ と空燃比 AFR の時間挙動で、実験結果を exp. シミュレーション結果を sim. で示す。スロットル弁開度 θ をステッ

Fig. 1 Object model

Table 1 Nomenclature

Engine Condition				State value of object system	
g_a :Intake air mass	mg	g_f :Fuel mass	mg	L_s :Dead time of AFR measurement	s
J :Inertia	kgm ²	n_e :Engine speed	s ⁻¹	T_{fb} :Time constant of fuel flow	s
P_b :Intake manifold pressure	kPa	r_{af} :Target value of AFR	—	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	y_{af} :Air fuel ratio	—	T_s :Time constant of AFR measurement	s
α :Direct intake ratio of fuel	—	λ_o :Air excess ratio	—		
θ :Throttle valve angle	rad

Fig. 2 Model identification results

ブ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。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。これ以外はほぼ良好に一致しており、モデルは妥当であると考えた。

3. 空燃比制御システムの構成

3.1 フィードバック制御システム

3.1.1 PFC を用いた適応 PID 制御システム^{(9)~(11)}

式 (1) で示す可制御可観測な 1 入出力系とし、設定入力 $r(t)$ と外乱 $d(t)$ は式 (2) で示す内部モデルを満たしているとする。プラントパラメータ値が未知であっても設定入力 $r(t)$ と出力 $y(t)$ が一致する PID 制御系を構成する。これを簡単に解くために式 (3) の変数を導入する。さらに、 $D(p)$ を $e(t)$ に作用させると式 (4) を得る。式 (1)~(4) より式 (5) で示す拡大システムを得る。ここに d_i はスカラー、 p は微分演算子、 $D(s)$ は安定多項式である。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) + \mathbf{b}_1d(t), \quad y(t) = \mathbf{c}\mathbf{x}(t), \quad \mathbf{x} \in R^n, u, y, d \in R^1, \mathbf{A} \in R^{n \times n}, \mathbf{b}, \mathbf{b}_1, \mathbf{c} \in R^n \quad (1)$$

$$D(p)r(t) = 0, \quad D(p)d(t) = 0, \quad D(p) = p^p + d_1p^{p-1} + \cdots + d_p \quad (2)$$

$$\mathbf{z}(t) = D(p)\mathbf{x}(t), \quad v(t) = D(p)u(t), \quad e(t) = y(t) - r(t) \quad (3)$$

$$D(p)e(t) = \mathbf{c}\mathbf{z}(t) \quad (4)$$

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}}(t) = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{x}}(t) + \bar{\mathbf{b}}v(t), \quad \bar{y}(t) = e(t) = \bar{\mathbf{c}}\bar{\mathbf{x}}(t) \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{z} \\ e \\ \vdots \\ e^{p-1} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ \mathbf{c} & -d_p & \cdots & -d_2 & -d_1 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{c}} = [\mathbf{0} \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0] \quad (6)$$

$$G_p(s) = \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{b}, \quad \bar{G}(s) = \frac{1}{D(s)}G_p(s)$$

式 (5) の拡大システムにおいて $\bar{\mathbf{c}}\bar{\mathbf{b}} = 0$ が恒等的に成立するのでこの拡大系は ASPR ではない。そこで式 (7) に示す n_f 次の並列フィードフォワード補償器 (Parallel Feedforward Compensator:PFC) を導入し、式 (5) と式 (7) を結

合して式 (8) で示す拡大系を得る .

$$\dot{\mathbf{x}}_f(t) = \mathbf{A}_f \mathbf{x}_f(t) + \mathbf{b}_f v(t), y_f(t) = \mathbf{c}_f \mathbf{x}_f(t), \mathbf{c}_f \mathbf{b}_f > 0 \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_a(t) = \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{b}_a v(t), y_a(t) = \bar{y}(t) + y_f(t) = y(t) - r(t) + y_f(t) = \mathbf{c}_a \mathbf{x}_a(t) \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_a = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}} \\ \mathbf{x}_f \end{bmatrix}, \mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_f \end{bmatrix}, \mathbf{b}_a = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{b}} \\ \mathbf{b}_f \end{bmatrix}, \mathbf{c}_a = [\bar{\mathbf{c}} \quad \mathbf{c}_f]$$

$$G_a(s) = \bar{G}(s) + G_{PFC}(s), G_{PFC}(s) = \mathbf{c}_f (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_f)^{-1} \mathbf{b}_f \quad (9)$$

式 (8) に示す拡大系が ASPR の時 , 式 (10) で示す適応 PID 制御器によって制御系は安定化され , $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ となることが知られている^{(9)~(11)} . ただし適応 PID ゲインは式 (11) で示す適応調整則で調整されるものとする .

$$v(t) = -\mathbf{k}(t)\mathbf{z}(t), \mathbf{k}(t) = [k_p(t), k_d(t), k_I(t)], \mathbf{z}(t)^T = [y_a(t), \dot{y}_a(t), w(t)], \dot{w}(t) = y_a(t) \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{k}}(t)^T = \mathbf{\Gamma} \mathbf{z}(t) y_a(t) = \begin{bmatrix} \gamma_p & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_d & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_a(t) \\ \dot{y}_a(t) \\ w(t) \end{bmatrix} y_a(t) = \begin{bmatrix} \gamma_p y_a^2(t) \\ \gamma_d \dot{y}_a(t) y_a(t) \\ \gamma_I w(t) y_a(t) \end{bmatrix}, \mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Gamma}^T > 0 \quad (11)$$

3.1.2 空燃比フィードバック制御システムへの適用

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 ($r_{af}=14.5$) 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 y_{af} としたシステムを対象とする . この対象系の伝達関数 $G_p(s)$ は図 1 より式 (12) となる . この対象系の近似伝達関数 $G_p^*(s)$ を式 (13) とする . システムのフィルタ $D(s)$ を式 (14) , ASPR である伝達関数 $G_{ASPR}(s)$ を式 (15) で示す . そしてシステムを ASPR にするための PFC を式 (16) で示すとおり構成した⁽¹⁰⁾ . 図 3 に適応 PID 制御のシステムを示す . 対象系 $G_p(s)$ にはむだ時間があるため ASPR にはならないが , 検討の結果 , 式 (13) ~ (16) に示す伝達関数を用いることで安定に制御できた .

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

$$G_p^*(s) = \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \frac{1}{T_s s + 1} \frac{1}{(T_{ff} + T_{fb})s + 1}, T_s > T_{fb} > T_{ff} \quad (13)$$

$$D(s) = T_d s + 1, T_d = 0.1 \quad (14)$$

$$G_{ASPR}(s) = \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \frac{1}{T_{ASPR}s + 1}, T_{ASPR} \approx T_s \quad (15)$$

$$G_{PFC}(s) = G_{ASPR}(s) - \frac{G_p^*(s)}{D(s)} \quad (16)$$

3.2 フィードフォワード制御システム

3.2.1 対象系逆モデルを用いたフィードフォワード入力

図 1 より , 入力 θ, t_f から g_a までの入出力関係は式 (17) , t_f から g_f までの伝達関数は式 (18) 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 (19) 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 (20) 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 . 式 (20) を状態方程式で示すと式 (21) となり , 式 (22) で示すように制御周期 (τ) で離散化して用いた . この式 (22) で示す入力を , θ 外乱入力時の基本 FF 制御入力とした .

$$\theta(s) \frac{\partial P_b}{\partial \theta} - B(s) \cdot D(s) \frac{\partial T_e}{\partial g_f} t_f(s) = \left(B(s) \frac{\partial T_e}{\partial g_a} + \frac{1 + T_{pms}}{\frac{\partial g_a}{\partial P_b}} \right) g_a(s), B(s) = \frac{\partial P_b}{\partial n_e} \frac{1}{Js + \frac{\partial T_L}{\partial n_e}}, D(s) = \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \frac{1 + \alpha T_{ff}s}{1 + T_{ff}s} \frac{1}{1 + T_{fb}s} \quad (17)$$

$$\frac{g_f(s)}{t_f(s)} = \frac{1 + \alpha T_{ff}s}{1 + T_{ff}s} \frac{1}{1 + T_{fb}s} \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \quad (18)$$

$$g_a(s) \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} + g_f(s) \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} = 0 \quad (19)$$

$$G_M'^{-1}(s) = \frac{t_{fFF}(s)}{\theta(s)} = \frac{\frac{\partial P_b}{\partial \theta} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} (1 + T_{ff}s)(1 + T_{fb}s)}{\frac{\partial g_f}{\partial t_f} (1 + \alpha T_{ff}s)} \frac{(Js + \frac{\partial T_L}{\partial n_e})}{\left[\frac{\partial P_b}{\partial n_e} \left(\frac{\partial T_e}{\partial g_f} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} - \frac{\partial T_e}{\partial g_a} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} \right) - \frac{\partial g_f}{\partial g_a} (T_{pm}s + 1) (Js + \frac{\partial T_L}{\partial n_e}) \right]} \quad (20)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{rf}(t) = \mathbf{A}_{rf} \mathbf{x}_{rf}(t) + \mathbf{b}_{rf} u(t), y(t) = \mathbf{c}_{rf} \mathbf{x}_{rf}(t) + d_{11} u(t), y(t) = t_{fFF}(t), u(t) = \theta(t) \quad (21)$$

$$t_{fFF}(k+1) = \Phi t_{fFF}(k) + \Psi \theta(k), \Phi = e^{\mathbf{A}_{rf} \tau}, \Psi = (\Phi - \mathbf{I}) \mathbf{A}_{rf}^{-1} \mathbf{b}_{rf} \quad (22)$$

$$\mathbf{A}_{rf} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{b}_{rf} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{31} \end{bmatrix}, \mathbf{c}_{rf} = [c_{11} \ c_{12} \ c_{13}]$$

$$a_{31} = -\frac{\left(\frac{\partial T_e}{\partial g_a} - K_\lambda \right) \frac{\partial g_a}{\partial P_b} \frac{\partial P_b}{\partial n_e} + \frac{\partial T_L}{\partial n_e}}{\alpha T_{ff} T_{pm} J}, K_\lambda = \frac{\frac{\partial T_e}{\partial g_f} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a}}{\frac{\partial g_f}{\partial g_a}}$$

$$a_{32} = -\frac{J + \frac{\partial T_L}{\partial n_e} T_{pm} + \left[\left(\frac{\partial T_e}{\partial g_a} - K_\lambda \right) \frac{\partial g_a}{\partial P_b} \frac{\partial P_b}{\partial n_e} + \frac{\partial T_L}{\partial n_e} \right] \alpha T_{ff}}{\alpha T_{ff} T_{pm} J}, a_{33} = -\frac{(T_{pm} + \alpha T_{ff}) J + \alpha \frac{\partial T_L}{\partial n_e} T_{ff} T_{pm}}{\alpha T_{ff} T_{pm} J}$$

$$b_{31} = -\frac{\frac{\partial g_a}{\partial P_b}}{\alpha \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} T_{ff} T_{pm} J}, c_{11} = \frac{\left\{ \alpha \frac{\partial T_L}{\partial n_e} T_{pm} + \left[\left(K_\lambda - \frac{\partial T_e}{\partial g_a} \right) \frac{\partial g_a}{\partial P_b} \frac{\partial P_b}{\partial n_e} - \frac{\partial T_L}{\partial n_e} \right] T_{fb} \right\} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} \frac{\partial P_b}{\partial \theta}}{\alpha \frac{\partial g_f}{\partial t_f} T_{pm}}$$

$$c_{12} = \frac{\left\{ (\alpha T_{pm} - T_{fb}) J + K_T \frac{\partial T_L}{\partial n_e} + \left[\left(K_\lambda - \frac{\partial T_e}{\partial g_a} \right) \frac{\partial g_a}{\partial P_b} \frac{\partial P_b}{\partial n_e} - \frac{\partial T_L}{\partial n_e} \right] \alpha T_{ff} T_{fb} \right\} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} \frac{\partial P_b}{\partial \theta}}{\alpha \frac{\partial g_f}{\partial t_f} T_{pm}}$$

$$c_{13} = \frac{(K_T - \alpha T_{fb} T_{ff}) \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} \frac{\partial P_b}{\partial \theta} J}{\alpha \frac{\partial g_f}{\partial t_f} T_{pm}}, K_T = [\alpha T_{ff} + (\alpha - 1) T_{fb}] T_{pm}, d_{11} = -\frac{\frac{\partial g_a}{\partial P_b} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_a} \frac{\partial P_b}{\partial \theta} T_{fb}}{\alpha \frac{\partial g_f}{\partial t_f} \frac{\partial \lambda_o}{\partial g_f} T_{pm}}$$

3.2.2 適応フィードフォワード機構

式 (23) で示すように、単純適応制御で用いたフィードフォワード入力と同一の適応機構とした。\$u_m\$ は前述の逆モデル FF の出力である。これを適応フィードフォワード (Adaptive FeedForward: AFF) 機構と称す。

$$u_{FF}(t) = k_u(t) u_m(t), k_u(t) = k_{Iu}(t) + k_{Pu}(t) = \int [\gamma_{u_m} u_m(\tau) e(\tau)] d\tau + \gamma_{p_{u_m}} u_m(t) e(t) \quad (23)$$

3.3 空燃比定値制御システム全系

以上に基づく制御系システム構成を図 4 に示す。適応 PID 制御による入力を整理して式 (24) で示す。FF 系は式 (26) で示すとおり、式 (23) に示す適応 FF 入力 (AFF) を用いる場合と、基本の FF 入力を用いる場合を検討した。

$$\begin{aligned} v(t) &= -[k_p(t) y_a(t) + k_d(t) \dot{y}_a(t) + k_I(t) w(t)] = -[u_p(t) + u_d(t) + u_I(t)] \\ &= -\left\{ \left[\int \gamma_p y_a^2(\tau) d\tau \right] y_a(t) + \left[\int \gamma_d \dot{y}_a(\tau) y_a(\tau) d\tau \right] \dot{y}_a(t) + \left[\int \gamma_I w(\tau) y_a(\tau) d\tau \right] w(t) \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

$$u_{FB}(t) = v(t)\mathcal{L}^{-1}[D^{-1}(s)] : (APID), y_a(t) = e(t) + y_f(t) \quad (25)$$

$$u_{FF}(t) = k_u(t)u_m(t) : (AFF), \text{ or } u_{FF}(t) = u_m(t) : (FF), u_m(t) = \mathcal{L}^{-1}[G_M'^{-1}(s)\theta(s)] \quad (26)$$

$$u(t) = u_{FB}(t) + u_{FF}(t) \quad (27)$$

Fig. 3 Schematic of adaptive PID control with PFC

Fig. 4 AFR regulation control system

4. 実験結果

4.1 実験条件

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 にこの外乱のパターンと 4.5 節で用いた評価区間の区分を略語とともに示す。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。本実験装置は無負荷のため所定の走行モード試験を行うことはできないが、このスロットル弁開閉の外乱入力により機関回転速度が 2 秒間で約 8s^{-1} 程度変化するので比較的急加速であり、最悪ケースに近い条件であると考えている。

4.2 制御系構成

表 2 に本実験で用いた FB 系と FF 系の制御機構の組み合わせ方法と略称を示す。例えば、FB 系に API を、FF 系に AFF を用いた制御手法を APIwAFF(API with AFF) と称す。これらの組み合わせた制御手法により実験を行い、制御性能を比較検討した。制御系の各ゲインは実験的に求めた。 $\gamma_d=0$ としたので微分項は零になるので、適応 PID 制御を用いた制御系を以降、適応 PI(Adaptive PI:API) 制御と称す。 $[\gamma_p, \gamma_i, \gamma_{u_m}, \gamma_{p_{u_m}}]$ や、比較のために用いた PI 制御の比例ゲイン p gain, 積分ゲイン i gain などを表 3 に示す。

4.3 適応 PI 制御と適応 FF 機構を用いた実験結果

図 6 に APIwAFF 運転の実験結果の時間挙動を示す。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、比較的早い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スパイク状の偏差が生じているが、それ以降は徐々にスパイクが小さくなり、理論空燃比 (r_{af}) 近傍に一致していくことがわかる。

dt : down step transient state	ut : up step transient state
ds : down state	us : up state
dz : down transient evaluation zone	uz : up transient evaluation zone
ss : steady state	

Fig. 5 Periodic disturbance input signal and evaluation division

Table 2 Nomenclature of control method

	API, Eq.(25)	PI
AFF, Eq.(23)	APIwAFF	PIwAFF
FF, Eq.(20)	APIwFF	PIwFF

Table 3 Gain table

	API		AFF		PI	
	γ_p	γ_i	γ_{u_m}	$\gamma_{p_{u_m}}$	p gain	i gain
APIwAFF	2×10^5	2×10^5	6×10^{-5}	0	—	—
APIwFF	2×10^5	2×10^5	—	—	—	—
PIwAFF	—	—	6×10^{-5}	5×10^{-5}	2×10^3	4×10^1
PIwFF	—	—	—	—	2×10^3	4×10^1

Fig. 6 Experimental results of time response using APIwAFF

Fig. 7 Experimental results in periodic over write

図 6(C) は式 (23)~(24) に示す AFF と API それぞれの制御ゲインの時間挙動を示す。θ 外乱により空燃比変化が生じるため目標値との偏差 $e(t)$ が生じて調整則が働き k_u, k_p, k_I 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 3 で示す $\gamma_p, \gamma_I, \gamma_{I_{um}}, \gamma_{p_{um}}$ で調整した。ゲイン k_{Iu}, k_p はいずれも漸増しているが、12 周期時点ではほぼ定常値に到達していると考えられる。FB 系のゲイン k_I は誤差の大きさに比例して変化し、誤差の減少とともに零に近づいている。したがってこれら適応制御系のゲイン適応速度は比較的早いと考えられる。なお $\gamma_d=0$ とし

たので、 $k_d=0$ 一定である。

図 6(D) に式 (23) ~ (24) 中で示す AFF, API 各々からの入力 u_{FF}, u_p, u_I の時間挙動を示す。図 6(C) で示したとおり、 k_u は増加しているので FF からの入力量 u_{FF} は増大している。一方、 k_p は漸増しているが、式で示すように $e(t)$ と積算して入力になる。制御系により $e(t)$ が減少し k_I も零に近づいているので u_p, u_I ともに零に近づいている。

図 6(B) に FF 制御系からの入力 u_{FF} と FB 制御系からの入力 u_{FB} の時間挙動を示す。図 6(C) と図 6(D) で述べたように、FF 系と FB 系の各々の適応制御機構により、FB 系からの入力が減少して FF 系からの入力が増加するという FB 誤差学習のような挙動になっており、FF 系と FB 系が融合して制御が行われたようにもみられる。

4.4 各制御手法の比較

FB 制御系、FF 制御系の各々の適応機構の有無による挙動の比較を行う。時間挙動をわかりやすく示すために、1 周期毎の時間挙動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) は図 6 を 1 周期毎に重ねたものを示す。最初の 1 周期目は目標値から大きく離れるが、2 周期目以降に徐々に偏差が減少していくことがわかる。比較のために、PI と AFF を用いた PIwAFF の結果を図 7(B) に示す。こちらは全 12 周期ともほぼ同一の挙動であり、外乱入力直後の偏差があまり減少していないことがわかる。そこで、各制御手法における入力信号の時間挙動を比較した。図 8 に示す。図 8(A) は PIwAFF、図 8(B) は APIwFF の場合の入力を示す。

Fig. 8 Comparison result of control input signal

Fig. 9 Comparison result between API and PI without FF compensator

図 6(B) の APIwAFF の入力と図 8(A) の PIwAFF の入力を比較すると、以下のことがわかる。

- (1) 最初の一周目での FB 系入力は、PIwAFF の方が APIwAFF より大きい。FB 系だけの比較を見やすくするために、AFF を伴わない、PI 制御だけの場合と API 制御だけの場合の比較結果を図 9 に示す。図 9(A) は入力信号の比較、図 9(B) は空燃比制御の結果の比較を示す。PI の方が API よりも入力が大きく目標値に早く収束し、良好な制御結果であることがわかる。図 7(A) は重ね描きのため見づらいが、AFF を伴う場合でも同様に、最初の一周目だけの比較では、APIwAFF より PIwAFF の方が制御性能がよい。
- (2) 最初の一周目での FF 系入力は、APIwAFF の方が PIwAFF より大きい。AFF による入力は偏差 $e(t)$ でゲイ

ンが決まるため、FB系の制御性能差により入力の違いが生じたと考えられる。

- (3) APIwAFFの方は前述のとおり、周期が進むとともに u_{FF} の増加と u_{FB} の減少が続くという、FBがFFに乗り移って融合していくような挙動となっている。
- (4) 一方PIwAFFの方は、周期毎に u_{FF} が増加しているが、その変化はAPIwAFFの場合と比べて小さい。また、 u_{FB} の時間挙動形状変化はやや認められるものの、 u_{FB} の大きさはほとんど変化していないことがわかる。つまり、PI制御はゲイン固定なので、APIで見られたFBを縮小してFFへ乗り移って融合するというような挙動は起きていないことがわかる。
- (5) 12周期目での u_{FF} の大きさは、PIwAFFよりAPIwAFFの方が大きい。したがって、APIwAFFでは制御主体が当初のFB系からFF系に移行したが、PIwAFFでは当初のFB系主体のまま移行がないことがわかる。
- (6) 参考として式(20)の基本FFとAPIを用いたAPIwFFの入力を図8(B)に示す。この場合はFF入力が大きく、APIによるFB入力は小さい。この時の u_{FF} をAPIwAFFの12周期目と比較すると、APIwAFFの方が大きい。つまりFF制御系もAPIと組み合わせることで入力の大きさの適応化が行われたと考えられる。

このように、FF制御系とFB制御系両者にゲインの適応可変機構を設けることにより両者が融合し、誤差の収束に応じてFB制御主体からFF制御主体へ移行したことがわかる。適応FF機構による速応性向上と適応PID制御による目標値一致が行われるので、制御性能の向上が期待できる。

4.5 周期毎の統計解析評価

実験結果の評価として各周期毎の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 ss($0 \leq t < 5$)、(ii)過渡立上り区間 ut($5 \leq t < 8$)、(iii)立上り後定常区間 us($8 \leq t < 15$)、(iv)過渡立下がり区間 dt($15 \leq t < 18$)、(v)立下がり後定常区間 ds($18 \leq t < 20$)、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10に1周期毎の統計解析結果を連続的に示す。図10(A)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。API系は実線、PI系は破線で示す。以下のことがわかる。

- (1) 空燃比平均値は、どの制御手法であってもほぼ目標値と一致している。
- (2) 各周期毎の最大最小の振幅は、APIwAFF(緑色実線)では周期が進む毎に小さくなるが、他の制御手法ではあまり振幅の変化が目立たない。
- (3) 最大最小の振幅は、8周期目までは基本FFを用いたAPIwFF(青色実線)やPIwFF(赤色破線)が小さいが、9周期目以降ではAPIwAFFが最小になる。

(A) average,max.,min. AFR and concentration within ± 0.1 while each period

(B) Square error while each period
(C) average,max.,min. AFR and concentration within ± 0.1 while each period in divided short term

Fig. 10 Comparison result of each control method

(4) 下段に示す 14.5 ± 0.1 範囲内への集中度 (con. ratio) は、基本 FF を用いた APIwFF は全周期とも 90% 前後、PIwFF は全周期とも 93% 前後である。AFF を用いた場合では、PIwAFF (水色破線) は周期を重ねても振幅、集中度の向上は認められず、全周期とも集中度は 90% 前後である。APIwAFF は 7 周期目以降で他の制御手法より集中度が良くなり、10 周期目以降では、95% 以上の集中度となった。

(5) 図 10(B) に周期毎の誤差自乗和 $e^2(t)$ の遷移を示す。APIwAFF の値は PIwFF などの半分程度と非常に小さくなっているため、APIwAFF の集中度はまだ上昇するかもしれないが十分であると考えた。

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集中度を図 10(C) に示す。各区間は図中に ss, ut, us, dt, ds として示す。なお見やすくするために、過渡の立上り区間 (立上り過渡時=加速時) 評価結果該当箇所を 印、立下り区間 (立下り過渡時=減速時) 評価結果該当箇所を で示す。印をつけた箇所以外は定常区間を示す。

(a) 無印の定常区間ではほぼ 100% が 14.5 ± 0.1 範囲内にある。

(b) 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 (印) の方が悪化している。これは、吸気系の時定数の非線形性の影響であると考えられる。

(c) 過渡区間の集中度に着目する。当初は PIwFF (赤色破線) が最も良いが、周期が進むにつれて APIwAFF (緑色実線) が良くなる。そして、PIwFF では 85% 程度が最高だが、APIwAFF では 10 周期目以降では 90% 程度以上となる。つまり速応性が大変良好であることがわかる。

このように、AFF と API を組み合わせて 10 周期程度以上の学習を繰り返すことにより制御性能の向上を得ることができ、特に過渡時の速応性能が大幅に向上したことがわかる。

4.6 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、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} 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。周期毎の空燃比制御値の統計解析結果として、APIwAFF と PIwAFF の場合をそれぞれ図 11 と図 12 に示す。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 11(A) に示す APIwAFF の場合、いずれの運転点でもほぼ同じ傾向と大きさとで、振幅が徐々に減少し、集中度が向上していく。このように、APIwAFF は初期回転速度が変化しても、平均値、最大最小値、集中度はほとんど変化しない結果になっており、運転点の変化にロバストであると考えられる。

一方図 12(A) に示す PIwAFF の場合は、 30 s^{-1} の場合 (青色破線) と比べると、 $36, 25 \text{ s}^{-1}$ いずれでも振幅が減少していくが、集中度の向上はあまり認められない。また、 25 s^{-1} の場合、加速減速時の時定数の違いによる PI 制御への影響が大きく、PIwAFF の集中度は大幅に低く、AFF の学習により周期が進む毎に向上しているが、他の運転点よりは低い。このことからパラメータ変化に対する FB 系のロバスト性を API は良好に有していると考えられる。

各図 (B) に、全 12 周期における最終 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 11(B) に示す APIwAFF の場合は、平均値はほぼ目標値と一致し、分散、誤差自乗も小さく非常に目標値近傍に集中している。そして集中度も 96% 程度と非常に高い。また運転点を変えても分布形状や集中度などはほとんど変化せず、運転点の変化にロバストであるといえる。

図 12(B) に示す PIwAFF 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い。 36 s^{-1} では、目標値近傍の頻度が増えているが、分布の幅がやや広がり APIwAFF の集中度より低い。

図 13 に図 11(B), 12(B) 中に記した空燃比平均値、集中度、誤差自乗についての全制御手法の比較を左から順に示す。参考のために基本となった API 制御や PI 制御単独の場合の結果も記入した。API 系は実線で、PI 系は破線で示す。図 13(A) は図 11(B), 12(B) 中に記した最終 3 周期の比較を示す。図 13(B) は図 5 中の uz, tz に示す過渡期間を主に抽出した最終 3 周期の比較を示す。

(A) average,max.,min. AFR and concentraton within ± 0.1 while each period

(A) average,max.,min. AFR and concentraton within ± 0.1 while each period

(B) AFR distribution while last three period

(B) AFR distribution while last three period

Fig. 11 Comparison result with operating points, Numerical analyses of control results using APIwAFF

Fig. 12 Comparison result with operating points, Numerical analyses of control results using PIwAFF

(A) whole period time

(B) focussed on transient state

Fig. 13 Comparison results of evaluation value among all control method

- (1) 空燃比平均値はいずれの制御手法であっても概ね目標値と一致し、偏差は最大でも 0.01%(0.0021) 程度以下である。SAC で 0.1%(0.015) 程度残存した偏差を 1/10 以下とすることができたので、FB 性能を改善できたと

考えられる．

- (2) API と PI の集中度を比較する．API は運転点を変更してもあまり変化しないが，PI は 25s^{-1} で悪化する．FF 系と併用した時も同様の結果となっている．これは加速と減速時での時定数の非線形性の影響によるもので，API はロバスト性を有するといえる．ただし 25s^{-1} 以外での集中度は PI の方が良く，API 単独での制御性能はさほど良くない．

このように無負荷でも初期回転速度という運転点による吸気の感度や時定数の違いが現れ，PI や逆モデルを用いた FF などの線形的な制御では制御性能が大きく変化したが，API では適応機構により吸気系のパラメータ変化に対応ができたといえる．

- (3) API, PI いずれの制御手法であっても FF 付加より，AFF 付加の方が集中度が向上している．AFF の可変ゲイン機構により，適切な FF 制御が行うことができたと考えられる．
- (4) APIwAFF と PIwAFF の集中度を比較すると，APIwAFF の方がよい．したがって，FF 系だけの適応でなく FB 系との連携した適応が必要であると考えられる．
- (5) FF または AFF は PI より API に付加することで大幅な集中度向上と誤差自乗の減少を得ることができた．つまりゲイン可変の機構をどこかに持つことは有利であると考えられる．
- (6) 30s^{-1} では PIwFF の方がよいが，他の運転点では PIwAFF のほうがよい．したがって FF 系に適応機構を持たせることはロバスト性向上に有効であると考えられる．
- (7) APIwAFF の集中度は，初期回転速度が変化しても変動が少なくロバストであり，かつ最良である．
- (8) APIwAFF と APIwFF または PIwAFF と PIwFF の集中度の変動を比べると wAFF の方が変動の幅が少ないので，AFF はロバスト性を有していると考えられる．
- (9) 図 13(B) に示す過渡期間を重点比較した場合は，APIwAFF 以外は大幅に悪化しており，APIwAFF の過渡時の制御性能は良好であるといえる．また，PI 系では 25s^{-1} で大きく低下しているのので，API 系は良好なロバスト性を有していると考えられる．
- (10) 誤差自乗も集中度と同様に APIwAFF が良好である．
- (11) 3 運転点の平均集中度を表 4 に示す．APIwAFF がいずれの場合でも良い．過渡期間を重点比較すると PI 系では 10point 近く低下するが，API 系では低下が少ない．つまり API 系は速応性が良いことがわかる．

最後に，文献⁽⁵⁾で得られた SAC を用いた場合との比較を図 14 に示す．APIwAFF の方が初期回転速度が変化しても目標空燃比に精度よく制御することができ，ロバスト性を低下させずに偏差を減らす所期の目標を満たすことができたといえる．

以上より，過渡時空燃比制御において，FF 系と FB 系それぞれに適応制御機構を用いることで両者が融合した制御を行い，良好な集中度とロバスト性を有し，大幅な制御性能向上が得られることがわかった．

Table 4 Average of concentration ratio in three operating condition

	APIwAFF	APIwFF	PIwAFF	PIwFF
whole peiod	96.22%	93.87%	90.67%	88.61 %
transient	92.72%	87.76%	82.37%	78.41 %

(A) whole period time (B) focussed on transient time

Fig. 14 Comparison result of regulation performance between APIwAFF and SAC

5. 結 言

ASPR 性に基づく適応 PID 制御と逆モデル FF に適応ゲインを組み合わせた適応 FF 機構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. FF 系と FB 系の両者に適応制御機構を持たせることで両者が融合した制御を行い、外乱の影響を抑制した良好な過渡時空燃比制御を行うことができた。
ロバスト性を低下させることなく、目標値との偏差を 0.01% 程度以下と SAC を用いた場合の 1/10 以下にすることができ、制御性能の改善を図ることができた。
2. 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 PFC を用いた適応 PID 制御の適用が可能であった。
3. 単純適応制御 (SAC) で用いたフィードフォワード機構を単独で用いても誤差に応じた適応機能を有した。
4. 適応 PID 制御は、単独ではさほど制御性能は良くないが、FF 系と組み合わせることで、良好な制御性能を得ることができた。
5. 適応 FF 機構は誤差に応じて入力の大きさが可変となるので、FB 系の適応機構と組み合わせることで、良好な制御性能を得ることができた。
6. 10 回程度の繰り返しで精度良く制御できるので、適応 PID や適応 FF ゲインの適応速度は比較的早いと考えられる。
7. 適応 PID 制御と適応 FF 機構を併用した運転は、過渡時の制御性能が優れている。
8. 適応 PID 制御と適応 FF 機構を併用した運転は、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、運転点の違いに対するロバスト性を有した。

文 献

- (1) 瀧山武, “スライディングモード制御を用いた機関・CVT 統合制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.643, (2000-3), pp.134-139.
- (2) 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.
- (3) Maki H., Hasegawa Y., Akazaki S., Komoriya I., Nishimura Y., Hirota T., “Real Time Engine Control Using STR in Feedback System”, *SAE Technical Papers*, 950007, (1995).
- (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) 瀧山武, “過渡時空燃比制御における単純適応制御の適用の検討”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.779, (2011-7), pp.2673-2683.
- (6) 大友篤, 岩井善太, 永田正伸, 内田博也, 小米良豊, “PID および適応外乱補償を付加した単純適応制御によるゴム人工筋アクチュエータの制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63, No.605, (1997-1), pp.166-173.
- (7) 安井裕司, 川澄郁絵, 東谷幸祐, “好燃費-低公害エンジンのための適応空燃比制御”, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.9, No.3, (2010), pp.11-16.
- (8) C.F. Aquino, “Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine”, *SAE Technical Papers*, 810494, (1981).
- (9) 水本郁朗, 岩井善太, “既強正実 (ASPR) 性に基づく適応 PID 制御系設計”, 計測と制御, Vol.48, No.8, (2009-8), pp.640-645.
- (10) 岩井善太, 水本郁朗, 水本弘文, “単純適応制御 SAC”, (2008), 森北出版
- (11) Iwai, Z., Shah, S.L., Mizumoto, I., Liu, L., and Jiang, H., “Adaptive Stable PID Controller with Parallel Feedforward Compensator” *Proceedings of 9th International Conference. Control, Automation, Robotics and Vision*, (2006), pp.1253-1258.