

適応制御理論を用いた A/F フィードバック制御システム

A/F Feedback Control System Using Adaptive Control Theory

牧 秀 隆*	赤 崎 修 介*	長谷川 祐 介*
Hidetaka MAKI	Shusuke AKAZAKI	Yusuke HASEGAWA
小森谷 勲*	西 村 要 一*	廣 田 俊 明**
Isao KOMORIYA	Yoichi NISHIMURA	Toshiaki HIROTA

要 旨

本研究では λ (空気過剰率)制御性を向上させる目的で、内燃機関のリアルタイム制御に対し適応制御の一手法である Self Tuning Regulator (STR) の適用を行った。目標 λ と出力 λ に着目し、適応制御をフィードバック (以下 F/B) 系に適用することにより、制御性と外乱抑制力の向上を図った。この構成は従来の PID F/B 制御器を STR に置き換えただけで用いることができる。シミュレーションにより、この制御系が高い性能を有することを確認し、実車を用いたリアルタイム制御にてテストを行った。FTP75 の LA-4 モードにおける λ 挙動の比較を行った結果、従来困難であった実機のリアルタイム適応制御を可能とし、 λ 制御性を PID F/B 制御に対して飛躍的に向上させることが確認できた。

ABSTRACT

This research project involved work, on the application of a Self Tuning Regulator (STR), one type of adaptive control technique used in the real-time control of internal combustion engines in order to enhance the λ (air excess ratio) controllability. We concentrated on the target λ and output λ values, and applied adaptive control to the feedback system. This structure enabled controllability and robustness against disturbance to be enhanced. With this structure, equivalence transformation of a conventional PID feedback controller to STR can be performed. Through simulation, it was confirmed that STR in the feedback system has high controllability and robustness against disturbance, and controllability verification tests were performed using real-time engine control on an actual vehicle. The results of a comparison of λ behavior in the FTP75 LA-4 mode confirmed that controllability could be improved over PID control. Therefore, by adopting the STR structure in the feedback system, real-time adaptive control was realized on the actual engine, which was difficult to achieve in the past. This resulted in a dramatic improvement in λ controllability.

1. まえがき

近年、地球環境問題が注目されているなかで、エミッション低減技術の開発がますます重要性を増している。特に、米国カリフォルニア州における Low Emission Vehicle (LEV) 規制の採択にともない、エミッション低減のための研究が各メーカーや研究機関によって精力的に行われている。なかでも、燃料と空気の混合比が触媒反応にとって常に最も効率のよい比率となるように制御を行うための燃料噴射制御の研究が、近年のマイクロプロセッサの能力向上に伴ってめざましい進歩を遂げてきている。

従来の内燃機関用の燃料噴射制御装置においては、各種センサからの入力に基づいて燃料噴射量を算出し、 O_2 センサやリニア λ (空気過剰率) センサを用いた λ フィードバック (以下 F/B) 制御によって内燃機関の個体差や経年変化に対する補正を行い、最終的な燃料噴射量を決定している。この λ F/B 制御には、比較的少ない演算量で、良好な制御特性を持つ PID F/B 制御方式が一般的に用いられてきた。ここで、PID F/B 制御方式に対してさらに制御性を向上させれば、触媒の浄化率を増加でき、エミッションを低減することが期待できる。そこで本研究では、PID F/B 制御方式に比較して λ 制

*和光研究所

**栃木研究所

御性を大幅に向上させることが可能な、適応制御理論を応用した制御手法を構築し、リアルタイムλ制御システムを実現化した。

本報告ではアプローチ手法、適応制御の基本構成、λ制御用適応制御ロジックの構築、シミュレーション結果および実車テストの結果について述べる。

2. アプローチ手法

λ制御性をさらに高精度化できる手法について考察した結果、内燃機関の動特性に対する補償を行うとともに、その動特性の変化に追従できる制御方式について新たに着目し、検討を行った。

近年、動特性が未知あるいは時間と共に変化するような制御対象に対し、制御装置を逐次自動調整し、制御性能を常に最適状態に保つような方式として適応制御の研究が進んできた。この適応制御をλ制御に適用すれば、PID F/B 制御方式を用いた場合よりもλ制御性を大幅に向上させることができる。

適応、制御は理論的には良好な制御性を有するが、実際の適用には難しさが指摘されてきた。その理由として、制御対象に対する制約や、外乱に対する考慮が必要であることなどが挙げられている^{1) 2)}。内燃機関の燃料噴射装置への適用を考えた場合、内燃機関はキャニスタパージガスなどの多くの外乱を有するため、適応制御を用いることは容易ではない。従って、適応制御を応用したリアルタイムλ制御システムを実現するための開発にあたり、外乱の影響を受けにくい制御系の構築を主眼として研究を行った。

3. 適応制御の基本構成

適応制御には種々の方式が考案されているが、本研究では最も一般的に用いられており理論的に考察が進んでいる、Landau 等によって開発された Self Tuning Regulator (STR) アルゴリズムを選択した。STR とは、時間によって動特性が変化する制御対象の出力が目標値と常に等しくなるよう、コントローラを自動的に調整する制御手法である。これは、Fig. 1 に示すような構成をとる。制御対象の出力 $y(k)$ が目標値 $r(k)$ に一致するように入力 $u(k)$ を作り出せるコントローラを直列に挿入する。このコントローラで用いる制御パラメータ $\theta(k)$ を、制御対象の変化に応じて、

パラメータ調整機構が自動的に計算を行う。このアルゴリズムは、式 (1) に示す伝達関数に対して適用可能である。なお、制御対象の変化とは、具体的には式 (1) の伝達関数の係数である $a_1 \sim a_n$ および $b_0 \sim b_m$ が時間と共に変化するを示す。

出力 $y(k)$ を目標値 $r(k)$ に一致させるためには、式 (1) の伝達関数を打ち消せる $u(k)$ を作り出せばよい。このためのコントローラは式 (2) の形式をとり、式 (1) を打ち消すように適応パラメータ $b_0, r_1 \sim r_{m+d-1}, S_0 \sim S_{n-1}$ が算出される。適応パラメータをひとまとめにしたベクトル $\theta(k)$ は式 (3) におかれ、式 (4) で算出される。ここで、 $\zeta(k)$ は式 (5) で示されるベクトル、 $\Gamma(k)$ は式 (6) で演算される $(m+n+d \times m+n+d)$ 次の正方行列、 $e(k)$ は式 (7) に示される同定誤差信号スカラである。 q_1 と q_2 の選び方により具体的アルゴリズムが与えられる。このアルゴリズムの収束性の証明は報告されている^{2) 3)}。

$$C(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} z^{-d} \quad (1)$$

$$u(k) = [r(k) - r_1 u(k-1) - \dots - r_{m+d-1} u(k-m-d+1) - s_0 y(k) - \dots - s_{n-1} y(k-n+1)] / b_0 \quad (2)$$

$$\theta^T(k) = [b_0 \ r_1 \ \dots \ r_{m+d-1} \ s_0 \ \dots \ s_{n-1}] \quad (3)$$

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \Gamma(k-1) \zeta(k-d) e(k) \quad (4)$$

$$\zeta^T(k) = [u(k) \ \dots \ u(k-m-d+1) \ y(k) \ \dots \ y(k-n+1)] \quad (5)$$

$$\Gamma(k) = \frac{1}{q_1} \left[\Gamma(k-1) - \frac{q_2 \Gamma(k-1) \zeta(k-d) \zeta^T(k-d) \Gamma(k-1)}{q_1 + q_2 \zeta^T(k-d) \Gamma(k-1) \zeta(k-d)} \right] \quad (6)$$

$$e(k) = \frac{y(k) - \theta^T(k-1) \zeta(k-d)}{1 + \zeta^T(k-d) \Gamma(k-1) \zeta(k-d)} \quad (7)$$

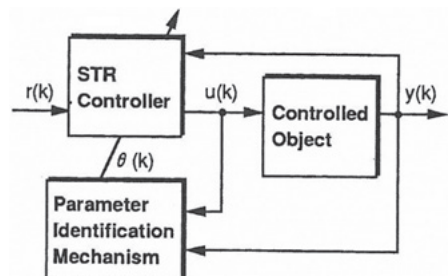


Fig. 1 Self Tuning Regulator Adaptive Structure

4. 適応制御ロジックの構築

4.1. 直列型 STR

STR を λ 制御系に適用することを考える。制御するのは燃料噴射量であるため、はじめに燃料演算系に直列に適用した。演算燃料噴射量を Fig. 1 に示した目標値 $r(k)$ とおき、実吸入燃料量を出力 $y(k)$ とおくことにより、STR が適用可能である。これを Fig. 2 に示し、直列型 STR と呼ぶ。しかし、直列型 STR は以下の理由から、外乱抑制力が低い構成となっている。

- (1) キャニスタパージなどの外乱によって、演算燃料噴射量と、 λ が目標値となる燃料量との間に誤差が含まれてしまう。直列型 STR は目標値を演算燃料噴射量とするため、誤差を含む値を目標値としてしまう。
- (2) 制御出力すなわち実吸入燃料量は実測が不可能であり、推定誤差を含んでしまう。
- (3) 変化量が多い波形に対して STR コントローラのような動的補償器は補正量すなわち $u(k)$ を大きく変化させることができる。逆に、STR コントローラで用いる適応パラメータの少しの誤差が大きな制御誤差を生む可能性がある。直列型 STR の目標値である燃料量は変化倍率が大きく、STR が (1) および (2) に示した誤差などにより、適応パラメータ $\theta(k)$ の同定結果にも誤差を持つ可能性が存在するため、必要な制御精度が得られない場合が考えられる。

直列型 STR は燃料系の制御対象モデルを直接打ち消せる構成となっているため、演算燃料噴射量および実筒内吸入燃料量の算出精度が高いことが要求される。しかし、前述の構成上の外乱抑制力の低さから、要求される制御精度を直ちに実現するには課題が残る。

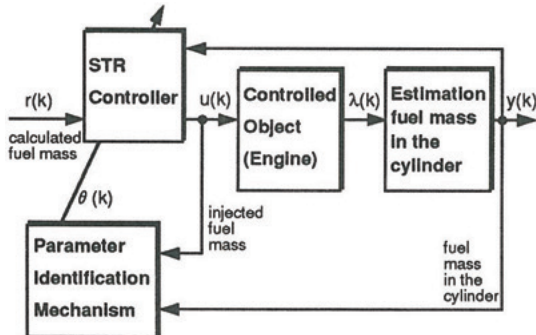


Fig. 2 Control System where STR is Applied to Fuel Mass Input/Output

4.2. F/B 型 STR

制御結果として求められるのは λ である。そこで、目標値を λ として STR を適用することを検討した。目標値を λ にすると、直列型 STR の問題点である、(1) 目標値に誤差を含む。(2) 制御出力が推定値である。(3) 目標値の変化率が多いという要素が解決可能となる。そこで、出力 λ を目標 λ に一致させるような STR の構成について考察する。

目標 $1/\lambda$ を j 倍することは、燃料量を j 倍することに等しいため、演算の都合上、ここでは燃料過剰率 ($1/\lambda$) を用いる。STR の目標値を目標 $1/\lambda$ とし、制御対象の出力を出力 $1/\lambda$ とする系に STR を適用した場合のブロック図を Fig. 3 に示す。しかしこの系では、燃料量の制御に用いることができないため、Fig. 3 の制御系を燃料量演算の系から書き換える。これにより燃料量に乘算した形になるため、Fig. 4 の制御系と等価になる。これは、

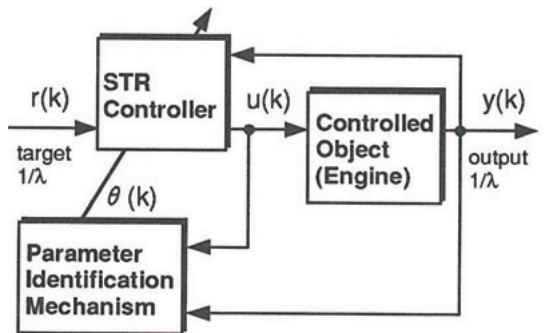


Fig. 3 Control System where STR is Applied for $1/\lambda$ Input/Output

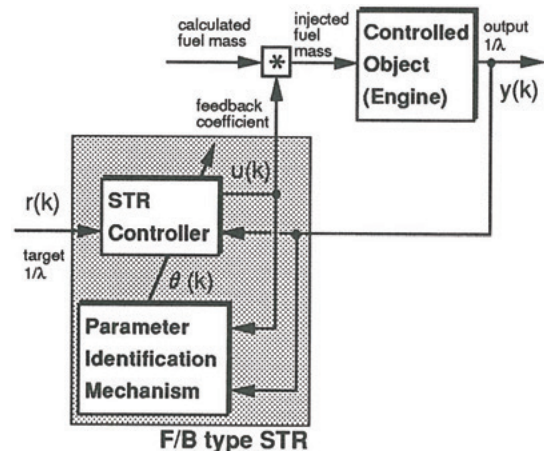


Fig. 4 Feedback Type STR Structure

PID F/B 制御器を STR に置き換えた構成となり、 $u(k)$ は従来の F/B 係数と同じ働きをする係数となる。よって、このロジックは F/B 系以外の燃料量演算則を変えることなく、F/B 制御器を置き換えるだけで用いることができる。この方式を F/B 型 STR と呼ぶことにする。

4.3. シミュレーション結果

F/B 型 STR の外乱抑制力および制御性を確認するため、燃料制御系のシミュレーションを行った。シミュレーションモデルには燃料の吸気管付着による壁面付着遅れおよびその補償器、リニア λ センサの応答遅れを考慮した。シミュレーションを行ったブロック図を Fig. 5 に示す。図中の、 $F(z^{-1})$ は壁面付着遅れであり、これを式 (8) に示す。これは式 (9) および (10) に示される漸化式から導かれる⁴⁾。 $G(z^{-1})$ は壁面付着モデルの補償器で、式 (11) に示すように $F(z^{-1})$ の逆伝達関数である。壁面付着係数テーブルは吸気管負圧を入力として、 $G(z^{-1})$ に壁面付着の係数を与える。補償器と実機の付着の誤差を表現するために、外乱 1 および 2 を加える。また、外乱 3 は演算燃料噴射量と、 λ が目標値となる燃料量との間の誤差で、環境条件への対応や、パージガス、EGR ガスといった外乱への対応が不十分な場合の誤差も含む。リニア λ センサモデルは λ の真値とセンサ出力との応答性で、テストにより一次遅れで近似できることを報告しており、これを式 (12) で表した⁵⁾。

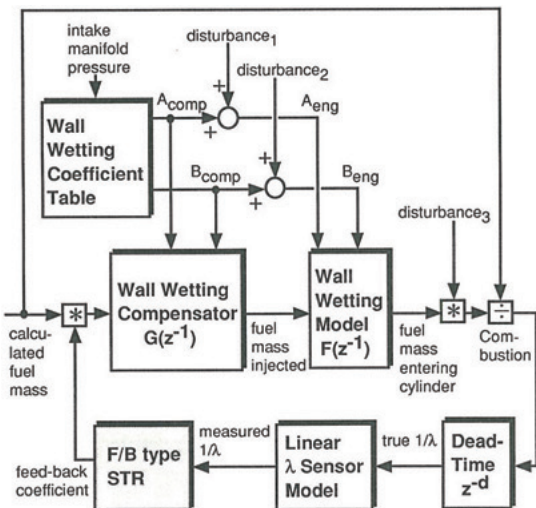


Fig. 5 Block Diagram of Simulation

$$F(z^{-1}) = \frac{G_{cyl}(z^{-1})}{G_{inj}(z^{-1})} = \frac{(B_{eng} - A_{eng})z^{-1} + A_{eng}}{(B_{eng} - 1)z^{-1} + 1} z^{-d} \quad (8)$$

$$G_{cyl}(k) = A_{eng} \cdot G_{inj}(k) + B_{eng} \cdot G_{ww}(k-1) \quad (9)$$

$$G_{ww}(k) = (1 - A_{eng}) \cdot G_{inj}(k-1) + (1 - B_{eng}) \cdot G_{ww}(k-1) \quad (10)$$

$$G(z^{-1}) = \frac{(B_{comp} - 1)z^{-1} + 1}{(B_{comp} - A_{comp})z^{-1} + A_{comp}} \quad (11)$$

$$\lambda_{sens}(k) = \alpha \cdot \lambda_{sens}(k-1) + (1 - \alpha) \cdot \lambda_{true}(k) \quad (12)$$

k	: 制御サイクル
d	: 無駄時間の次数
A_{eng}, B_{end}	: 実機の壁面付着係数
G_{inj}	: 噴射燃料量
G_{ww}	: 吸気管に付着する燃料量
G_{cyl}	: 筒内吸入燃料量
A_{comp}, B_{comp}	: 補償器の壁面付着係数
λ_{sens}	: センサ出力 λ
λ_{ture}	: 真の λ

演算燃料噴射量、吸入管負圧などのデータは実際に FTP75 の LA-4 モードを運転して計測したデータを用いた。外乱は、パージ量や燃料演算上の誤差の予想される最大値を考慮した波形とした。演算燃料噴射量、吸入管負圧、外乱の入力波形の一例を Fig. 6 (a)~(e) に示す。これらの波形を入力とし、各種制御定数の最適値を決定した。F/B 型 STR のシミュレーション結果を Fig. 7 (a) に示す。また、比較として、PID F/B 制御に置き換えたシミュレーション結果を Fig. 7 (b) に示す。F/B 型 STR では外乱抑制力が向上したことにより、PID F/B 制御方式に比較して大幅に制御性が向上している。

5. 実車を用いたテスト結果

シミュレーションで構築した制御ロジックの効果を確認するため、実車によるテストを行った。演算燃料噴射量はスピードデンシティ方式を基本に、運転状態や環境に対する各種補正を行って算出し、PID F/B 制御器を F/B 型 STR に置き換えた。適用エンジンは、Fig. 8 に示すような L-4、2.2L の試作エンジンを 4 速オートマチックトランスミッション車に搭載して行った。

テストは、FTP75 の LA-4 モードにおける F/B 型 STR により得られる λ と、PID F/B 制御方式による λ

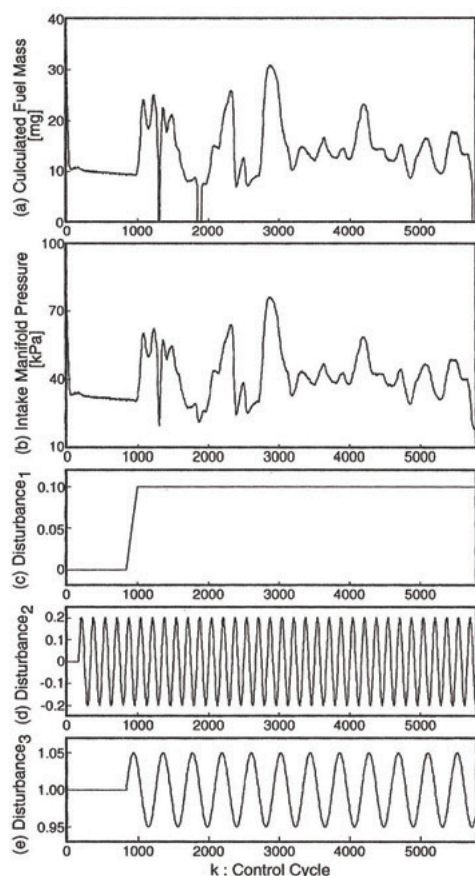


Fig. 6 Simulation Input

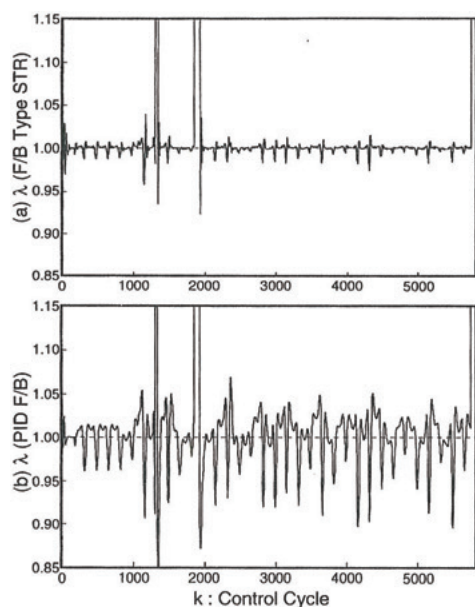


Fig. 7 Simulation Results

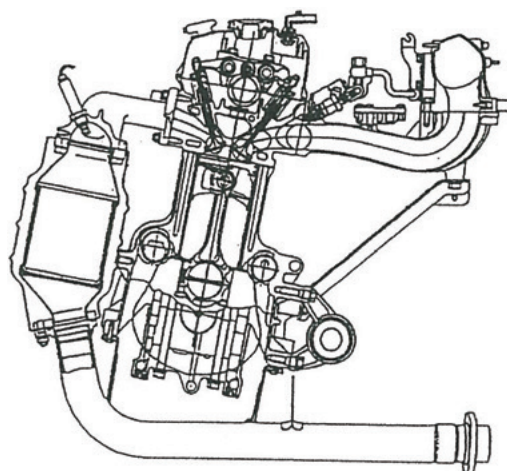


Fig. 8 Test Engine

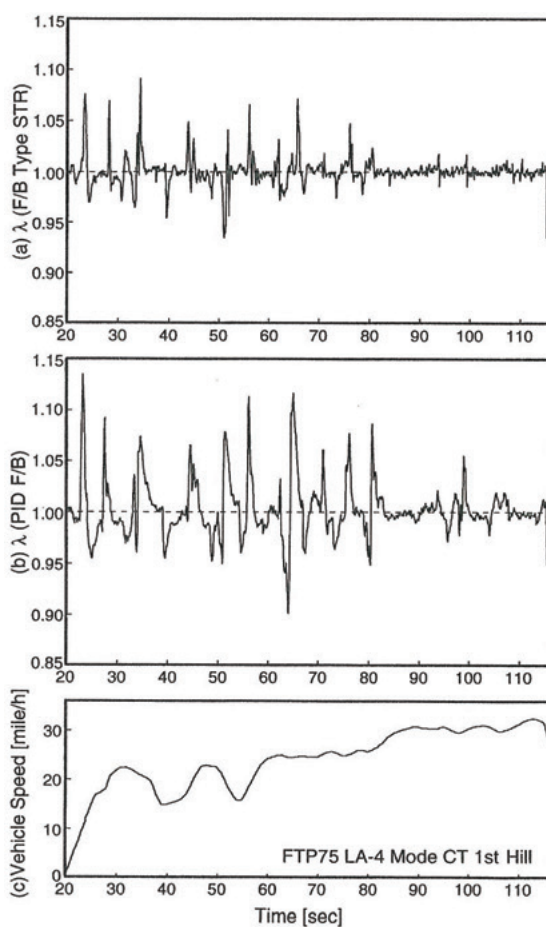


Fig. 9 λ Behavior on Actual Engine in FTP75 LA-4 Mode

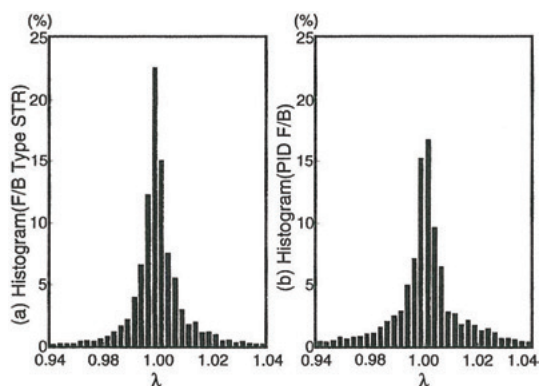


Fig. 10 Histogram

の挙動の比較で行った。目標 λ は一定で、ここでは $\lambda = 1$ としている。モード中の λ の挙動の一部を Fig. 9 に示す。F/B 型 STR を用いると、 λ の暴れが改善され、短時間で収束していることが確認される。収束性の向上を表現するために、FTP75 の LA-4 モード全域を通しての λ の出現時間頻度を Fig. 10 に示す。モード全域を通して目標値付近の出現頻度が向上している。

6. まとめ

適応制御は安定性の問題から実機への適用が難しく、実際の適用例も少ない。特に内燃機関は複雑な非線形性および外乱を持つとともに、制御する燃料量を間接的に λ で検出するため、適応制御を用いることが難しい。

F/B 型 STR という外乱抑制力の高い構成をとることに、従来困難であった内燃機関のリアルタイム制御を可能とした。また、実車テストにより、全運転領域で使用可能であり、 λ 制御性が飛躍的に向上することが証明された。

今回のテストは、目標 λ を一定としてテストを行ったが、F/B 型 STR は実 λ を目標 λ に忠実に追従させることが可能な構成となっているため、内燃機関や触媒が要求する λ が時間によって変化する場合も含め、様々な条件に応用できると考える。

参考文献

- 1) 寺尾, 金井「ロバスト適応制御入門」, オーム社, 1989
- 2) 藤井「デジタル適応制御」コンピュータロル N027, P28~, コロナ社, 1989
- 3) I. D. Landau, "Adaptive Control-The Model Reference Approach," Marcel Dekker, 1979
- 4) M. Matsumoto, M. Saitoh, R. Matsumura, and F. Yukawa, "Improvement of Lambda Control Based on an Exhaust Emission Simulation Model that Takes into Account Fuel Transportation in the Intake Manifold," SAE 900612
- 5) Y. Hasegawa, S. Akazaki, I. Komoriya, H. Maki, Y. Nishimura, and T. Hirota, "Individual Cylinder Air-Fuel Ratio Feedback Control Using an Observer," SAE 940376

■ 著 者 ■



牧 秀 隆



赤 崎 修 介



長谷川 祐介



小 森 谷 勲



西 村 要 一



廣 田 俊 明