

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 第三報

– オンボード同定型状態予測スライディングモード制御による適応性能の向上 –

Adaptive Sliding Mode Control for Secondary O₂ Feedback (Part 3)

– Improvement of Adaptability by the Use of Prediction and Identification Sliding Mode Control –

安井 裕 司* 赤崎 修 介*
Yuji YASUI Shusuke AKAZAKI
北川 浩* 岩城 喜久*
Hiroshi KITAGAWA Yoshihisa IWAKI

要 旨

エミッション低減のための有効な技術として触媒後 O₂ フィードバックがあり、その性能向上により、更なるエミッション低減効果を得ることができる。そこで、本報では、第一報と第二報で述べたスライディングモード制御を基に、オンボード同定型状態予測スライディングモード制御を新たに設計し、触媒後 O₂ フィードバックへ適用した。その結果、あらゆるエンジンの運転条件や触媒の劣化条件において、触媒後 O₂ フィードバックの制御性を高めることができた。これにより、FTP モードにおけるエミッションを 32～42% 低減でき、また、触媒劣化に対するその効果の安定性を飛躍的に向上することができた。

ABSTRACT

Secondary O₂ feedback is one of the effective methods for reducing vehicle emissions, and improvement of its performance yields even greater reduction of emissions.

This report details a significant advance in the algorithm for sliding mode controls that were described in our first and second reports, and the application of this newly designed algorithm to secondary O₂ feedback. The results show that feedback control performance was significantly improved under all engine loads and catalyst aging conditions. Moreover, the FTP mode emission was reduced by 33–44%, and the emission stability with respect to catalyst aging conditions was dramatically improved.

1. まえがき

第一報⁽¹⁾、第二報⁽²⁾において、触媒後 O₂ フィードバック^{(1)~(5)}の性能向上手法として、触媒を含む排気系を自己帰帰モデル⁽⁶⁾によってモデル化し、ロバスト安定性の高い適応スライディングモード制御^{(1), (7)}と状態予測スライディングモード制御⁽²⁾を適用した内容を報告した。しかしながら、触媒後 O₂ フィードバックの性能向上には、詳細を後述する以下の課題

- (1) 触媒の非線形応答特性に対する安定性向上
 - (2) 触媒のむだ時間特性に対する安定性向上
 - (3) エンジンの運転条件や触媒の劣化条件に応じた触媒の応答特性の変化に対する適応性
- があるが、前回までに報告したアルゴリズムでは、(3)

の課題を満たすことができなかった。

そこで、本報告では、第二報において述べた状態予測スライディングモード制御を基に、そのアルゴリズムで用いる制御対象モデルのモデルパラメータを逐次的に同定を行うオンボード同定器を加え、前述の全ての課題を解決するオンボード同定型状態予測スライディングモード制御^{(9), (10)}を設計した。

以下に、その設計法と制御性能、エミッション低減効果について述べる。

2. 背景とアプローチ手法

2.1. エミッション低減の着眼点

Fig. 1 に触媒後 O₂ フィードバックが適用されているエ

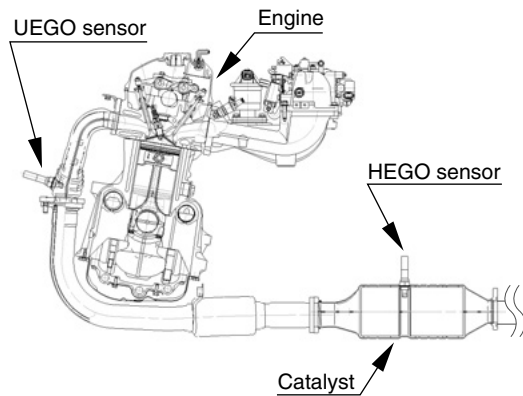


Fig. 1 Layout of sensors and a three-way catalyst

エンジンの一般的な触媒とセンサのレイアウトを示す。この例では、触媒上流にリニア空燃比センサ(図のUniversal Air-Fuel Ratio Heated Exhaust Gas Oxygensensor: UEGO sensor)、下流に触媒後 O_2 センサ(図のHeated Exhaust Gas Oxygen sensor: HEGO sensor)が設置されている。

ここで、図のエンジンにおいて、リニア空燃比センサによる混合気の空燃比に応じた出力を ϕ_{in} 、触媒後 O_2 センサによる触媒後の排ガス成分に応じた出力電圧を V_{out} とする。このとき、排ガスボリュームを所定の条件に設定し、エンジンの運転空燃比を変化させたときの排ガス分析計により求めた触媒前後のCO, HC, NO_xの濃度から触媒浄化率を求め、全成分の浄化率が90%以上となるときの V_{out} の領域を示すとFig. 2のようになる。図では、排ガスボリュームが2000L/h未満の場合は排ガス分析計の精度の影響でその傾向を正確に知ることはできないが、排ガスボリュームの条件に関わらず、 V_{out} が0.6V近傍の最適値(以下、 V_{op})となる場合に、触媒の浄化率が最適となる。

よって、今回の実験に用いたエンジンと触媒の組み合わせ

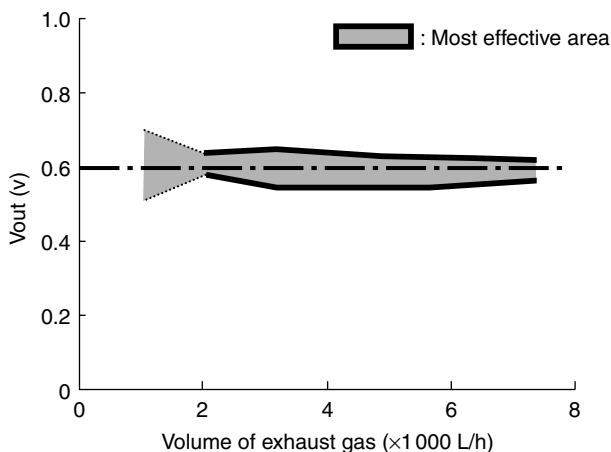


Fig. 2 Relation between most effective area of catalyst conversion rate and exhaust gas volume

せでは、エンジンの運転条件と触媒の劣化条件に関わらず、触媒浄化率を最適化するためには、常に V_{out} をおおよそ一定の目標値 V_{op} へ制御すれば良いことが分かる。そこで、我々は触媒後 O_2 フィードバックの制御性を向上することにより、その実現を試みた。

2.2. 触媒後 O_2 フィードバックの課題

前述の通り、触媒後 O_2 フィードバックの制御性向上のためには、以下に示す触媒の特性に対する安定性を向上する必要がある。

- (1) 非線形応答特性
- (2) むだ時間特性
- (3) エンジンの運転条件や触媒の劣化条件に応じた応答特性の変化

ここでは、これらの特性について述べる。

2.2.1. 触媒の非線形応答特性

Fig. 3 は、50 000mile 走行相当の劣化触媒を用いて ϕ_{in} を周波数0.2Hz、振幅0.2A/Fの正弦波状に加振したときの ϕ_{in} と V_{out} の計測データである。図のデータは、50mile/h クルーズ条件において計測されたものであるが、触媒前の ϕ_{in} が正弦波状に変化しているのに対し、触媒後の V_{out} は、リーンからリッチへ変化する場合と、リッチからリーンへ変化する場合で異なる応答となっている。これが、触媒内部の化学反応が ϕ_{in} の変化方向に応じて変わるために生じる触媒の非線形応答特性である。

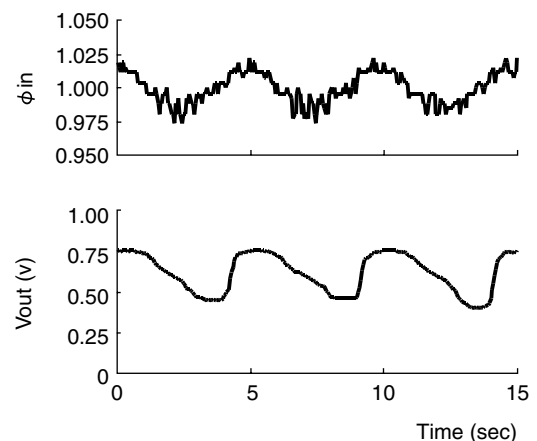


Fig. 3 The nonlinear characteristic of a catalyst

2.2.2. 触媒のむだ時間特性

Fig. 4 は、120 000mile 走行相当の劣化触媒を用いて ϕ_{in} をステップ状に変化させたときの ϕ_{in} と V_{out} の計測データである。図では、 ϕ_{in} のリーンからリッチへの反転に対し、 V_{out} の反転に無効時間がある。これが、主に触媒の酸素吸蔵特性によって生じる触媒のむだ時間特性である。

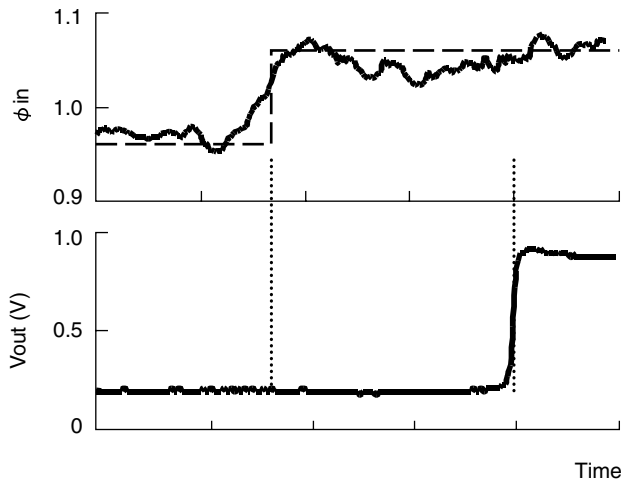


Fig. 4 Dead time characteristic of a catalyst

2.2.3. 触媒の応答特性の変化

Fig. 5 は、50mile クルーズ条件において、50 000mile と 20 000mile 走行相当の劣化触媒をそれぞれ用いたときの V_{out} を計測し、それらをフーリエ変換して求めたパワースペクトルである。図では、劣化が進むにつれて各周波数のパワースペクトルが増大している。この傾向は、周波数が高くなるにつれて大きくなる。これは、触媒のもつ応答特性が劣化に応じて変化することを示している。

また、エンジンの運転条件が変化した場合にも、同様の応答特性変化が見られる。この場合、触媒の応答特性は、エンジン運転条件が高負荷方向へ変化したとき、触媒劣化が進行したときと同様の方向に変化する。

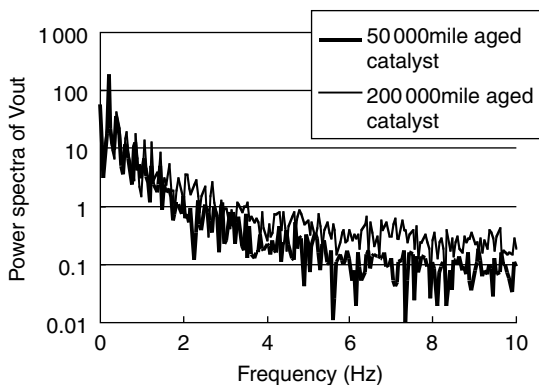


Fig. 5 Frequency characteristics of catalysts

2.3. 解決手法

前に述べた触媒の三つの特性に対する触媒後 O_2 フィードバックの安定性を向上し、エミッション低減効果を最大化するため、新たな制御アルゴリズムであるPRediction and Identification Sliding Mode control (以下、PRISM) を設計した。PRISMは、Fig. 6に示すように以下の三つの要素によって構成される。

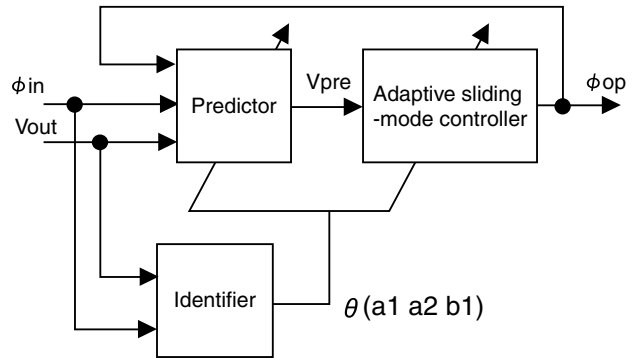


Fig. 6 Prediction and identification sliding mode control (PRISM)

(1) 適応スライディングモードコントローラ (図の Adaptive sliding-mode controller)

(2) 状態予測器 (図の Predictor)

(3) オンボード同定器 (図の Identifier)

ここで、オンボード同定器は、適応スライディングモードコントローラと状態予測器を触媒の動特性変化に適応させるための機能であり、動特性変化の情報を後述する排気系モデルのモデルパラメータ θ (a_1 , a_2 , b_1) として数値化する。

次に、状態予測器は、 θ , V_{out} , ϕ_{in} , ϕ_{in} の目標値 (以下、 ϕ_{op}) を用いて V_{out} の未来値 V_{pre} を算出し、触媒のむだ時間特性を補償する。

適応スライディングモードコントローラは、そのロバスト性により、触媒の非線形特性や後述するモデルのモデル化誤差を補償する機能を担っており、 θ と V_{pre} に基づいて、 V_{out} を V_{op} へ収束させるための ϕ_{in} の目標値 ϕ_{op} を算出する。

このように、PRISMでは、それぞれの機能が触媒の三つの特性に対する補償を行い、高精度な V_{out} の V_{op} への収束を実現する。

さらに、PRISM を適用した制御系の全体構成は、Fig. 7に示すように、 ϕ_{op} を PRISM によって算出し、エンジンの空燃比を制御する STR (Self-tuning Regulator)⁽¹¹⁾ を用いた

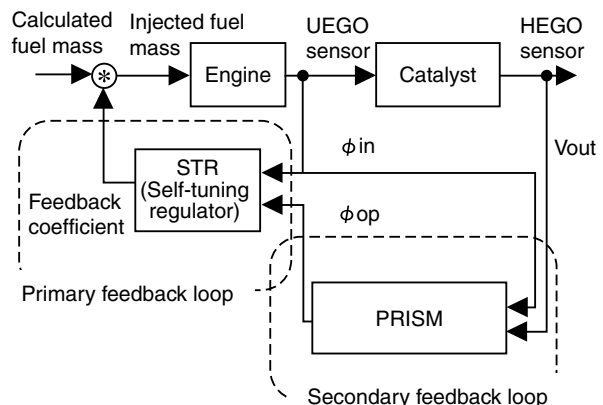


Fig. 7 Overall configuration of double feedback loop

触媒前空燃比制御によって、 ϕ_{in} が ϕ_{op} に一致するように制御を行ない、結果的に V_{out} を V_{op} へ収束させる二重フィードバックループの構成とした。

以下に、これらの詳細について述べる。

3. モデル化

ここで、Fig. 7 の空燃比制御系において、STR による触媒前空燃比制御とエンジン、リニア空燃比センサまでの排気系をエンジンシステムと定義し、リニア空燃比センサから触媒後 O_2 センサまでの触媒を含む排気系を制御対象として、以下にそれぞれのモデル化について述べる。

3.1. エンジンシステムのモデル化

ϕ_{in} を操作することによって V_{out} を制御する Fig. 7 の制御系では、 ϕ_{in} を ϕ_{op} へ高精度に追従させる必要がある。ところが、一般的に、エンジンシステムの入力である ϕ_{op} と出力である ϕ_{in} の間には、主に燃料の輸送遅れや燃焼サイクルに要する時間によって生じる遅れとむだ時間特性がある。よって、これらの動特性を補償する必要があるが、前述のように PRISM を適用した空燃比制御系は、二重フィードバックループの構造となっており、特に、エンジンシステムでは二つのフィードバックループが重なっているため、これらの干渉が生じる。

一方、Fig. 8 は、STR によって制御されている時の矩形波状 ϕ_{op} に対する ϕ_{in} の応答波形であるが、図から分かるように、 ϕ_{in} は、概略、 ϕ_{op} を d 時間分シフトした波形となっている。このことから、エンジンシステムは、STR によって制御されている時、その応答遅れ特性は十分に補償されるため、むだ時間要素として見なせることが分かる。

そこで、二重のフィードバックループの干渉を防止するため、この ϕ_{in} と ϕ_{op} の関係に着目した。Fig. 7 に示したように、STR はエンジンシステムの遅れ特性の補償のみを行う。よって、PRISM がエンジンシステムの遅れ特性の補償を行わないのならば、干渉は発生しない。故に、干渉防止のため、エンジンシステムの遅れ特性の補償を STR の役割

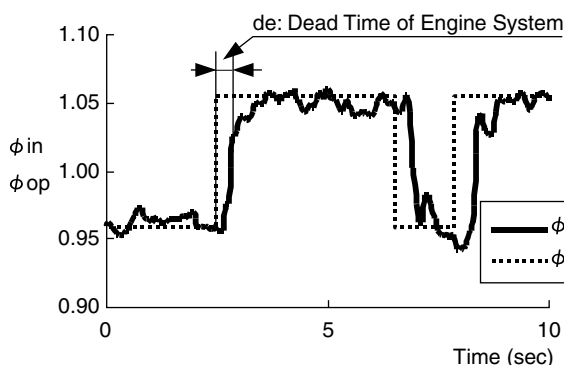


Fig. 8 Time series data of ϕ_{in} controlled by STR

とし、PRISM にとってのそれを制御対象の一部ではなく、 ϕ_{in} の生成手段と見なし、後述する状態予測器にて、そのむだ時間特性のみを考慮することとした。

このとき、PRISM にとってのエンジンシステムは、遅れを持たない以下のようなむだ時間要素としてモデル化される。

$$\phi_{in}(k) = \phi_{op}(k - d_e) \quad (1)$$

k : 制御時間

d_e : エンジンシステムのむだ時間

3.2. 排気系のモデル化

PRISM の制御対象である触媒を含む排気系は、Fig. 4 と Fig. 5 に示されるように、ローパス特性、すなわち、遅れ特性とむだ時間特性を有している。

このこととオンボード同定器によるモデルパラメータの逐次同定の容易さを考慮し、ここでは、以下のような DARX モデル (Delayed Auto-Regressive eXogenous model, 入力にむだ時間を持った自己回帰モデル) を用いて制御対象をモデル化した。

$$VO_2(k+1) = a_1 VO_2(k) + a_2 VO_2(k-1) + b_1 KACT(k-d) \quad (2)$$

$$VO_2(k) = V_{out}(k) - VO_2_TARGET \quad (3)$$

$$KACT(k) = \phi_{in}(k) - KACT_BASE \quad (4)$$

a_1, a_2, b_1 : モデルパラメータ

$VO_2(k)$: V_{out} と V_{op} の偏差

VO_2_TARGET : 目標値 V_{op}

$KACT(k)$: ϕ_{in} の基準値に対する偏差

$KACT_BASE$: ϕ_{in} の基準値

d : 制御対象のむだ時間

4. 制御アルゴリズム

以下において、PRISM を構成するオンボード同定器、状態予測器、適応スライディングモードコントローラの演算式について述べる。

4.1. オンボード同定器

式 (2) のような DARX モデルのモデルパラメータの同定手法として、逐次型重み付き最小二乗法 (以下、WRLS) と呼ばれる同定アルゴリズムが知られている。

このアルゴリズムは、逐次的にモデルパラメータを同定できるため、適応制御におけるモデルパラメータの同定手法として有用である。

ところが、Fig. 9 は、同定アルゴリズムの各周波数における同定重みを示した図であるが、Fig. 5 のようなローパス特性を有した制御対象に対するモデルの同定を行った場合、

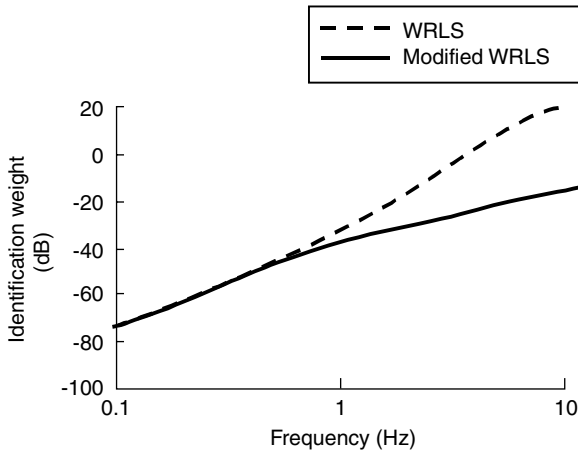


Fig. 9 Identification weight characteristics of basic and modified WRLS algorithms

破線で示したように周波数が高くなるほど同定重みが高くなる。つまり、同定された制御対象モデルは、制御対象の高周波でのゲイン特性が強調されたものとなる⁽¹²⁾。Fig. 10 は、制御対象と制御対象モデルのゲイン特性を示したものであるが、図から分かるように、WRLS によって同定されたモデルのゲインは、実対象のものよりも小さくなる。これは、WRLS の同定重みの特性により、制御対象の高周波数における阻止特性が強調されてモデルが同定されてしまうために起こる。モデルのゲイン特性がこのようになっている場合、それに基づいて制御入力を決めている適応スライディングモードコントローラは過補正を生じ、制御性が低下する。

そこで、WRLSの同定重みの周波数特性を改善するため、ここでは、式(5)～(12)のように同定アルゴリズムを改良した。

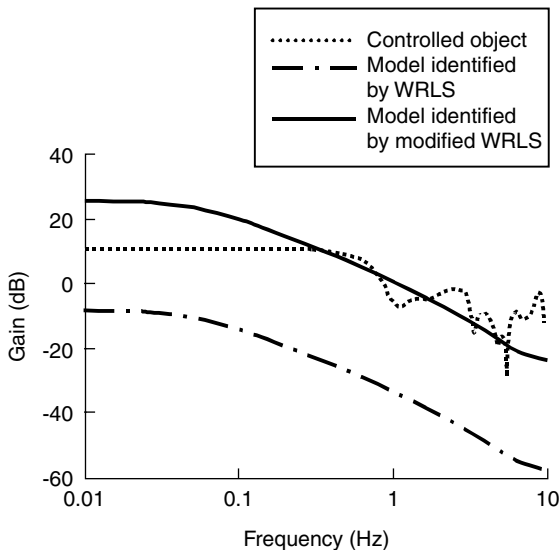


Fig. 10 Frequency characteristic comparison between controlled object and identified models

$$\theta(k+1) = \theta(k) + KP(k) e_{id_f}(k) \quad (5)$$

$$e_{id_f}(k) = \text{Fid}(e_{id}(k)) \quad (6)$$

$$e_{id}(k) = VO2(k) - VO2_hat(k) \quad (7)$$

$$VO2_hat(k) = \theta(k)^T \zeta(k-1) \quad (8)$$

$$KP(k) = \frac{P(k)\zeta(k-1)}{1 + \zeta^T(k-1)P(k)\zeta(k-1)} \quad (9)$$

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} \left(I - \frac{P(k)\zeta(k-1)\zeta^T(k-1)}{\lambda + \zeta^T(k-1)P(k)\zeta(k-1)} \right) P(k) \quad (10)$$

$$\theta^T = [a1 \ a2 \ b1] \quad (11)$$

$$\zeta^T(k) = [VO2(k) \ VO2(k-1) \ KACT(k-d)] \quad (12)$$

Fid() : ローパスフィルタ

I : 単位マトリクス

λ : 重みパラメータ ($0 < \lambda < 1$)

上記のアルゴリズムでは、従来、式(5)の θ の更新式において同定誤差 e_{id} を用いていたものを、 e_{id} にローパスフィルタリングを施した e_{id_f} としている。これにより、同定アルゴリズムの同定重みは、Fig. 9の実線のようになりWRLS のものに比べて高周波数での重みが小さくなる。また、この改良型 WRLS を用いて同定されたモデルのゲイン特性は、Fig. 10の実線のようになり、ローパスフィルタFidによる同定重みの修正によって、制御対象のゲインと一致する。よって、WRLS を用いた時のようなコントローラの過補正の発生も抑制される。

4.2. 状態予測器

状態予測アルゴリズムを説明するため、ここで、 ϕ_{in} の基準値 $KACT_BASE$ に対する ϕ_{op} の偏差量を定義する。

$$KCMD(k) = \phi_{op}(k) - KACT_BASE \quad (13)$$

$KCMD(k)$: ϕ_{op} の基準値に対する偏差

このとき、式(1)のエンジンシステムのモデルは下式のようなになる。

$$KACT(k) = KCMD(k-de) \quad (14)$$

また、3章において、エンジンシステムには遅れ特性とむだ時間特性があるが、STR と PRISM の干渉を防止するため、遅れ特性に関してはSTRが補償するものとし、PRISM は、エンジンシステムをむだ時間要素としてみなすことを述べた。

ここで、エンジンシステムは、PRISMにとっての制御対象ではなく、 ϕ_{in} を生成するための排ガス生成器という位置づけとなる。つまり、マニピュレータの制御に例えると

エンジンシステムはアクチュエータに相当する。ところが、エンジンシステムはむだ時間 de をもっているため、 ϕ_{op} が ϕ_{in} へ反映されるまでにむだ時間がある。また、このむだ時間は、PRISMの安定性と速応性を低下させる。

よって、PRISMでは、状態予測器にて、制御対象のむだ時間 d に加え、エンジンシステム分のむだ時間 de を加えた全むだ時間

$$dt = d + de \quad (15)$$

先の VO_2 を予測することにより、 de の補償を行うこととした。

それを実現する予測アルゴリズム⁽¹³⁾、すなわち、 $VO_2(k+dt)$ の予測値 $VO_{2p}(k)$ の算出式は下式ようになる。

$$VO_{2p}(k) = \alpha_1 VO_2(k) + \alpha_2 VO_2(k-1) + \sum_{i=1}^{dt} \beta_i KACT(k+de-i) \quad (16)$$

$$V_{pre}(k) = VO_{2p}(k) + V_{op} \quad (17)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1(k) & a_2(k) \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1(k) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

α_1 : A^{dt} の 1 行 1 列要素

α_2 : A^{dt} の 1 行 2 列要素

β_j : $A^{dt-1}B$ の 1 行要素

ところが、式(16)は、 ϕ_{in} を意味するKACTの未来値KACT($k+de-1$)～KACT($k+1$)を用いているため、実行不可能である。

そこで、式(14)に着目し、STRによって、 ϕ_{in} が ϕ_{op} に追従制御され、

$$KACT(k+de-1) \doteq KCMD(k-1) \quad (20)$$

となると仮定し、KACTの未来値の代替としてKCMDを用いることによって、実行可能な予測アルゴリズムを下式の構成とした。

$$VO_{2p}(k) = \alpha_1 VO_2(k) + \alpha_2 VO_2(k-1) + \sum_{i=1}^{de-1} \beta_i KCMD(k-i) + \sum_{j=de}^{dt} \beta_j KACT(k+de-j) \quad (21)$$

4.3. 適応スライディングモードコントローラ

前述のように de は、状態予測器による VO_{2p} によって補償され、制御対象の動特性変化は、オンボード同定器によって逐次同定されるモデルパラメータ a_1 , a_2 , b_1 として数値化される。よって、むだ時間や制御対象の動特性変化に対する安定性を維持しつつ、優れた VO_2 の制御性能を発揮するためには、適応スライディングモードコントローラ

は、これらの値を用いて ϕ_{op} を決定すればよい。

故に、適応スライディングモードコントローラの ϕ_{op} の決定条件は、

$$V_{op} = V_{pre}(k) \doteq VO_{2p}(k+dt) \quad (22)$$

すなわち、

$$VO_{2p}(k) = 0 \quad (23)$$

となる。このとき、式(23)を実現するための切換関数 σ は、

$$\sigma(k) = VO_{2p}(k) + S VO_{2p}(k-1) \quad (24)$$

S : 切換関数設定パラメータ

となり、この切換関数に対する適応スライディングモード制御を用いた ϕ_{op} の演算式は以下ようになる。

$$\phi_{op} = U_{eq}(k) + U_{rch}(k) + U_{adp}(k) + KACT_BASE \quad (25)$$

$$U_{eq}(k) = \frac{-1}{b_1} \{ (a_1 - 1) + S \} VO_{2p}(k) + (a_2 - S) VO_{2p}(k-1) \quad (26)$$

$$U_{rch}(k) = \frac{-1}{b_1} F \sigma(k) \quad (27)$$

$$U_{adp}(k) = \frac{-1}{b_1} G \sum_{i=0}^k \sigma(i) \quad (28)$$

5. テスト結果

5.1. 制御性の検証

5.1.1. エンジン運転条件に対するロバスト性検証

エンジン運転条件に対する制御性の安定性を評価するため、I4 2.3L エンジン、50 000mile 走行相当の触媒(600 セル/4.3 ミル)を搭載したプロトタイプ車両を用いて、FTP モードを走行したときのPRISMと従来制御手法による V_{out} の制御結果を比較した。

Fig. 11 と Fig. 12 は、従来手法と PRISM をそれぞれ用いた場合の V_{out} の出現頻度を示したものである。ここで、 V_{out} の $V_{op} \pm 0.1V$ の範囲内への V_{out} の出現頻度は、従来手法で 35.8%であり、PRISM では 74.3%となっている。よって、PRISM は従来手法に対して V_{out} の制御性を約二倍に向上したと言える。

また、Fig. 13は、FTP走行中のモデルパラメータの同定結果を示したものである。図では、モデルパラメータが車速条件、すなわち、エンジンの運転条件に応じて変更されている。これより、オンボード同定器の適応特性によって、PRISM が常に最適化されている様子がわかる。

5.1.2. 触媒劣化条件に対する適応性検証

触媒の劣化条件に対する制御性の安定性を評価するため、さらに前述のプロトタイプ車両の触媒劣化条件を

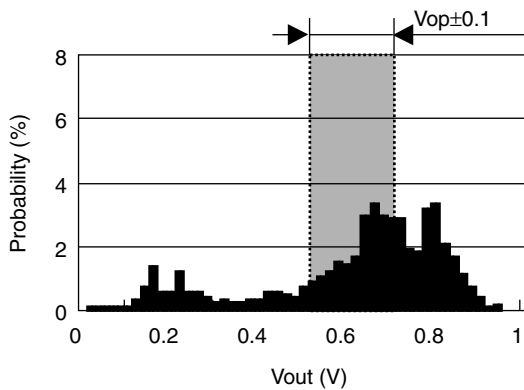


Fig. 11 Histogram of Vout controlled by conventional algorithm

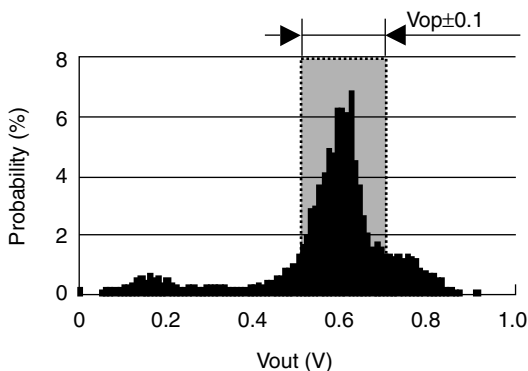


Fig. 12 Histogram of Vout controlled by PRISM

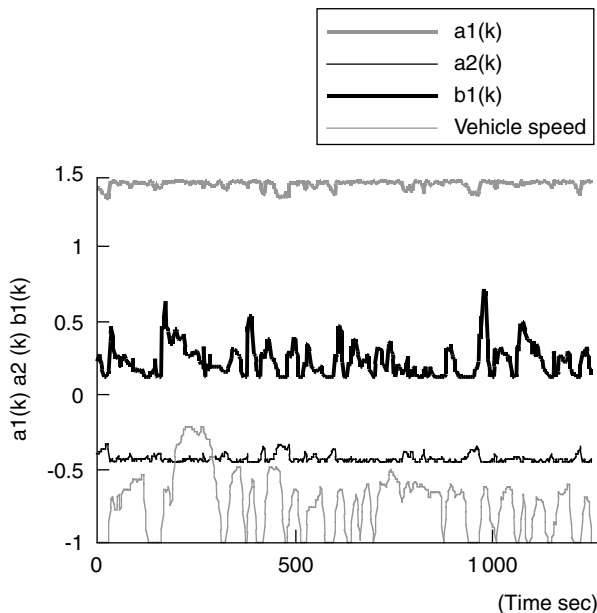


Fig. 13 Identification result of q in FTP mode

0mile, 100 000mile 走行相当とした場合の Vout の測定を行った。Table 1 は、それぞれの触媒劣化条件における $V_{op} \pm 0.1V$ の範囲内への Vout の出現頻度を比較したものである。Table 1 では、Vout の前述の範囲内への出現頻度の変化幅は 5 % 以内となっており、非常に小さくなっている。

Table 1 Probability of Vout within the range of $V_{op} \pm 0.1V$

Equivalent aging condition of catalyst	0	50 000	100 000
Probability	78.9%	74.3%	81.0%

る。このことから、PRISM の触媒劣化に優れた適応特性を確認できる。

5.2. エミッション低減効果

PRISMによるエミッション低減効果を確認するため、前述の 100 000mile 走行相当の触媒を用いたプロトタイプ車両において、PRISMと従来手法を用いた場合のFTPエミッションの測定を行い、その比較結果を Table 2 に示した。

Table 2 では、PRISM は、CO, NMHC, NOx を、それぞれ 34%, 32%, 42% 低減している。これより、PRISM が大幅なエミッション低減効果を持っていることが確認できた。

さらに、触媒劣化条件に対する PRISM のエミッション安定性を評価するため、触媒劣化条件を 50 000mile, 100 000mile, 300 000mile 走行相当としたときの FTP エミッションの測定を行った。Fig. 14 は、100 000mile 時のエミッションを基準値として各触媒劣化条件でのエミッションを正規化して表示した図である。図において、100 000mile と

Table 2 FTP emission comparison between PRISM and conventional control

	CO	NMHC	NOx
Conventional control	0.105	0.022	0.071
PRISM	0.069	0.015	0.041
Improved ratio	34%	32%	42%

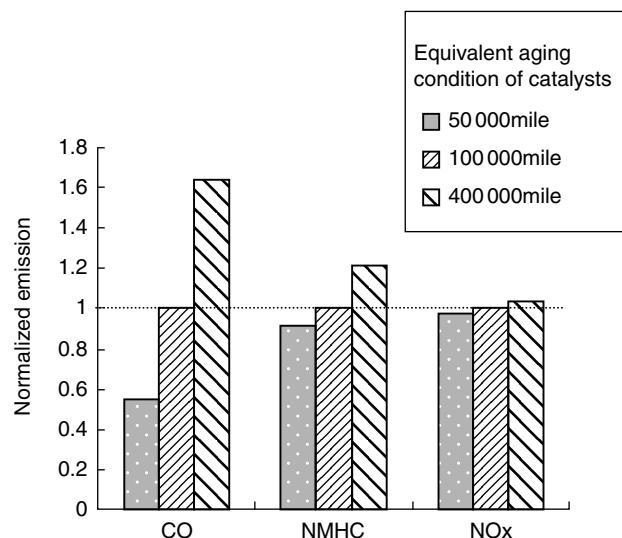


Fig. 14 Emission robustness of PRISM

400 000mile 相当を比較すると、CO は約 60% の増加となっているが、HC に関しては約 20%、NO_x にいたってはわずか 3 % 程度の増加にとどまっております、PRISM の触媒劣化に対する安定性とそのエミッション低減コンセプトの正当性を確認できる。

6. まとめ

オンボード同定器、状態予測器、適応スライディングモードコントローラが一体となった PRISM を触媒後 O₂ フィードバックへ適用することによって、以下に示すような Vout の制御性を実現した。

- (1) 従来手法に対し、Vout の Vop へ制御性を約二倍に向上した。
- (2) 触媒の劣化条件によらず、Vout の Vop $\pm$ 0.1V の範囲内への出現頻度を 74% 以上に維持した。

その結果、下記のようなエミッションに対する効果を得た。

- (1) 従来手法と比較して、FTP モードのエミッションを約 32 ~ 42% 低減した。
- (2) 触媒劣化に対するエミッション安定性を飛躍的に向上した。

参考文献

- (1) 安井, 赤崎, 上野, 岩城: 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, HONDA R&D Technical Review Vol.11 No.1, p.65-71 (1999)
- (2) 安井, 赤崎, 上野, 岩城: 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—第二報, HONDA R&D Technical Review Vol.11 No.2, p.51-56 (1999)
- (3) Ohata,A., Masu,M., and Inoue,T.: Model Based Air-Fuel Control for Reducing Exhaust Gas Emissions, SAE Paper 950075 (1995)
- (4) Yatabe, H., Tai ,H., and Matsuura,M. : Air-to-Fuel Ratio of Gas Engines Using Response Characteristics of Three — Way Catalysts Under Dynamic Operation, SAE Paper 910083 (1991)
- (5) 原田: 自動車の制御技術, 東京, 朝倉書店, 1997
- (6) 片山: システム同定入門, 東京, 朝倉書店, 1994, 196p.
- (7) 野波, 田: スライディングモード制御, 東京, コロナ社, 1994, 263p.
- (8) 片山: システム同定入門, 東京, 朝倉書店, 1994, 196p.
- (9) Yasui,Y., Akazaki,S., Ueno,M., Iwaki,Y. : Secondary O₂ Feedback Using Prediction and Identification Type Sliding Control, SAE Paper 2000-01-0936(2000)
- (10) Yasui,Y., Akazaki,S., Ueno,M., Iwaki,Y. : Secondary O₂ Feedback Using Prediction and Identification Sliding Control — Second Report — , SAE Paper 2001-01-0264 (2001)
- (11) Maki,H., Hasegawa,Y., Akazaki,S., Komoriya,I., Nishimura,Y. and Hirota,T. : Real Time Control Using STR in Feedback System, SAE Paper 950007 (1995)
- (12) 足立: ユーザのためのシステム同定理論, 東京, 計測自動制御学会, 1993, 222p.
- (13) 渡部: むだ時間システムの制御, 東京, 計測制御学会, 1993, 206p.

■ 著 者 ■



安井 裕 司



赤崎 修 介



北川 浩



岩城 喜 久