

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

－ 状態予測スライディングモード制御による制御性能の向上 －

Adaptive Sliding Mode Control for Secondary O₂ Feedback, A Second Report
－ Improving Control Performance Using Prediction Type Sliding Mode Control －

安井 裕 司*	赤崎 修 介*
Yuji YASUI	Shusuke AKAZAKI
上野 将 樹*	岩城 喜 久*
Masaki UENO	Yoshihisa IWAKI

要 旨

第一報では、排気エミッション低減のため触媒後O₂フィードバックの性能向上を目指し、適応スライディングモード制御を適用した結果を報告した。

第二報では、触媒のむだ時間特性に着目して制御対象である排気系をモデル化し、そのむだ時間補償のため前回報告した適応スライディングモード制御に状態予測器を追加した状態予測スライディングモード制御を新たに設計した。これにより、LA-4モードの全運転領域において触媒後O₂フィードバックの最適値に対する制御性能の大幅な向上を実現した。この効果により33～44%の排気エミッションの低減効果を得た。

ABSTRACT

The secondary O₂ feedback using adaptive sliding mode control, which was one of the effective method to reduce emission of vehicles, was mentioned on the first report.

This report placed its focus on compensation for dead-time characteristic of a catalyst. Prediction type sliding mode control combining adaptive sliding-mode controller and predictor, which compensated the characteristic, was designed and it was applied to the feedback system. As the result, the performance of the feedback system on transient condition was improved, and The LA-4 mode emission was reduced by 33~44%.

1. まえがき

前報¹⁾で、触媒後O₂フィードバック^{2)～6)}の性能向上のための一手法として、触媒を含む排気系をARXモデル(自己回帰モデル)を用いてモデル化し、ロバスト安定性の高い適応スライディングモード制御⁷⁾を適用した内容を報告した。しかしながら、この手法では、クルーズのような定常運転では制御性、安定性ともに良好であるものの、通常の運転領域のほとんどは過渡状態であり、このような条件下において良好な制御性、安定性を得るまでには至っていなかった。

そこで、過渡状態を含む通常運転領域での制御性向上のため、触媒を含む排気系の動特性を解析したところ、予想以上に大きいむだ時間特性がある事を確認した。このため、それをDARXモデル(入力にむだ時間を持った自己回帰モデル)⁸⁾を用いてモデル化し、従来の適応スライディング

モード制御に対し、今回はむだ時間に対する安定性を向上させた状態予測スライディングモード制御を設計した。

以下に、その性能向上と排気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. 排気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ンジンの触媒とセンサの一般的なレイアウトを示す。この例では、触媒上流にリニア空燃比センサ(UEGO sensor: Universal air-fuel ratio heated Exhaust Gas Oxygen sensor)、下流に触媒後O₂センサ(HEGO sensor: Heated Exhaust Gas Oxygen 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O₂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。Fig.2は、エンジン回転数と負荷条件、すなわち、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排ガス分析装置(HORIBA MEXA-9400H)により計測した触媒前後の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} の領域を示した図である。排ガスボリュームが2000L/hr未満の場合は排ガス分析計の精度の影響が大きいため計測値が安定せず傾向を正確に得ることができなかったが、排ガスボリュームが2000L/Hr以上の場合は安定して計測することができた。この結果から、排ガスボリュームの条件にあまり影響されず V_{out} が0.6V近傍の最適値(以下、 V_{op})のとき触媒の浄化率が最適となることがわかった。したがって、今回の実験に用いたエンジンと触媒の組み合わせでは、エンジンの回転数と負荷条件に関わらず、おおよそ一定の目標値 V_{op} (0.6V)に対して V_{out} を制御すればよい。

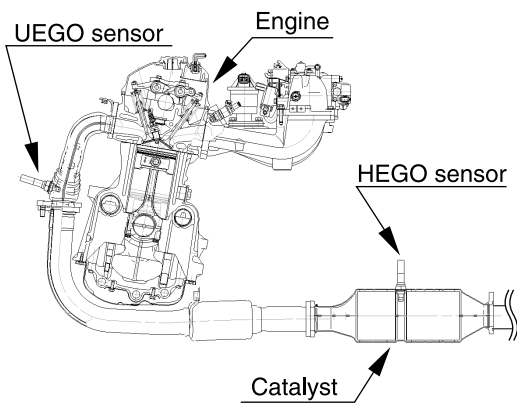


Fig.1 Layout of sensors and three-way catalyst

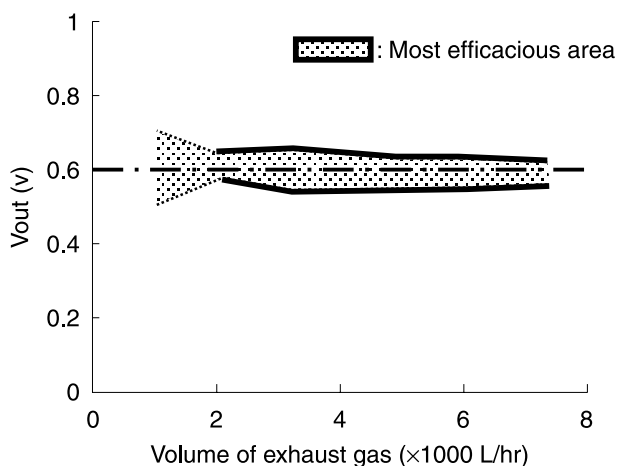


Fig.2 Relation between most efficacious area of catalyst reduction rate and exhaust gas volume

2.2. 触媒後O₂フィードバックの課題

これまでの適応スライディングモード制御のみを用いた触媒後O₂フィードバックでは、クルーズ運転条件において V_{out} の V_{op} への整定を実現している¹⁾。Fig.3は、LA-4モー

ド走行中の V_{out} の制御結果と指標として設定した $V_{op} \pm 0.1$ V範囲内への V_{out} の出現頻度分布であるが、過渡状態を含む運転条件では V_{out} の V_{op} への整定が実現できず、出現頻度は65.6%となっている。また、従来手法による制御を用いた場合^{4)~6), 9)~11)}は35.8%であった。この時の出現頻度とLA-4モードの排気エミッションの相関をFig.4に示す。同図では、出現頻度の増加に伴い排気エミッションが低減されており、特にCOとNO_xの低減効果が大きく、HCもわずかなではあるが同じ傾向を示している。これにより、過渡を含む運転条件において、 V_{out} の V_{op} への出現頻度の向上が必要不可欠であることが分かった。

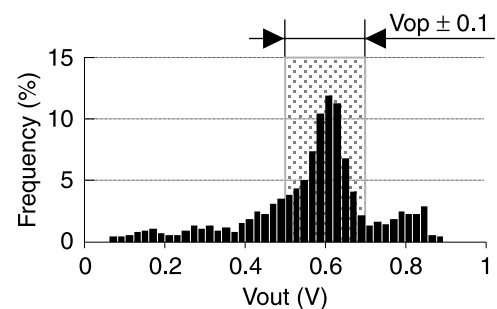


Fig.3 Histogram of V_{out} by using adaptive sliding mode control

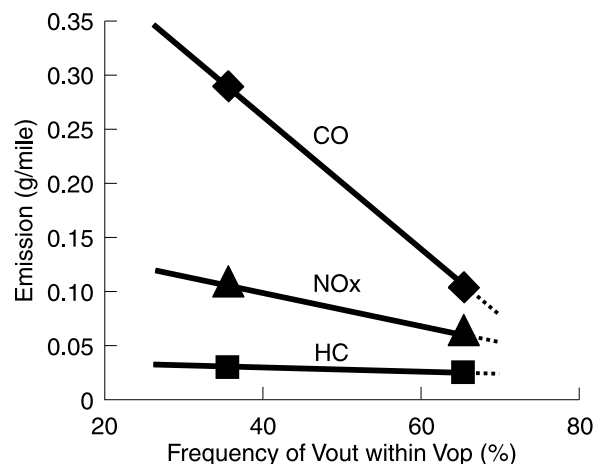


Fig.4 Relation between LA-4 mode emission and frequency of V_{out} within V_{op}

2.3. 解決手法

詳細は後述するが、制御対象である触媒を含む排気系の動特性解析を行なったところ、これまで考慮していなかったむだ時間特性があることが分かった。これが制御性悪化の要因と考えられたため¹²⁾、このむだ時間特性に対する補償器を持った状態予測スライディングモード制御を設計し、それを用いて新たな触媒後O₂フィードバックを構成することにした。Fig.5に示すように、状態予測スライディングモード制御は、むだ時間特性の補償器(以下、状態予測器)により、 ϕ_{in} と V_{out} に基づいて V_{out} のむだ時間分先の未来値に相当する推定値 V_{pre} を算出し、その V_{pre} に基づき適応

スライディングモードコントローラによりVoutをVopに収束させるための ϕ_{in} の目標値(以下、 ϕ_{op})を算出する制御である。制御系の全体構成は、Fig.6に示すように、Voutを最適値Vopへ収束させるための目標値 ϕ_{op} を状態予測スライディングモード制御によって算出し、エンジンの空燃比を制御するSTR(Self-Tuning Regulator)⁹⁾を用いた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VoutをVopへ収束させる二重フィードバックループの構成となっている。

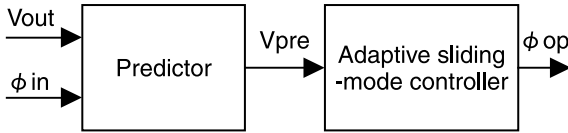


Fig.5 Prediction type sliding mode control

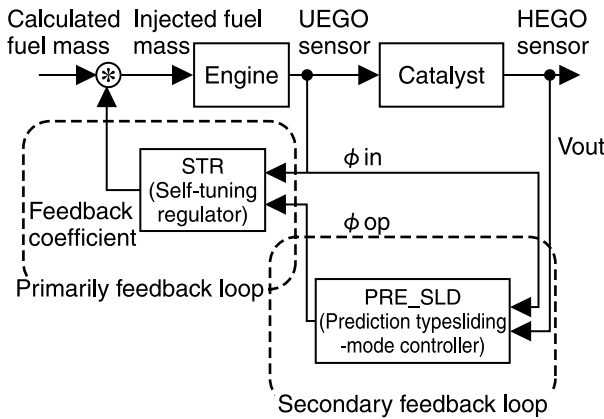


Fig.6 Overall configuration of double feedback loop

3. 触媒のむだ時間特性の解析

リニア空燃比センサから触媒後O₂センサまでの排気系を制御対象と考え、その周波数ゲイン特性に着目し、入力としてリニア空燃比センサによる ϕ_{in} 、出力をO₂センサ出力VoutとしたARXモデル(自己回帰モデル)⁸⁾を用いてモデル化する手法が報告されている¹⁾。

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

$$VO_2(k) = Vout(k) - VO_2_TARGET \quad (2)$$

$$KACT(k) = \phi_{op}(k) - KACT_BASE \quad (3)$$

a_1, a_2, b_1 : モデルパラメータ
 $VO_2(k)$: VoutとVopの偏差
 VO_2_TARGET : 目標値Vop
 $KACT(k)$: ϕ_{in} の基準値に対する偏差
 $KACT_BASE$: ϕ_{in} の基準値
 k : 制御時間

ここで、制御対象のむだ時間特性の解析を行なうため、以下に示すような式(1)の入力にむだ時間dを挿入したモデルを設定する。

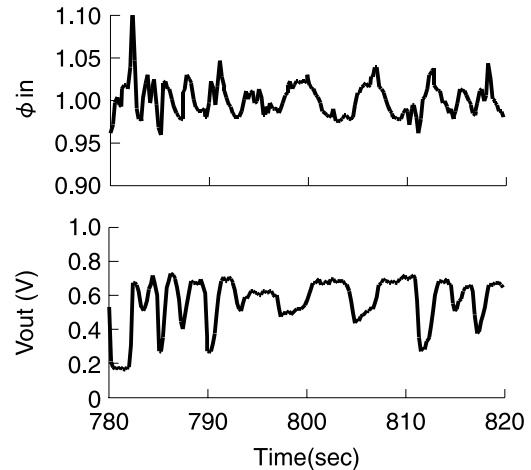
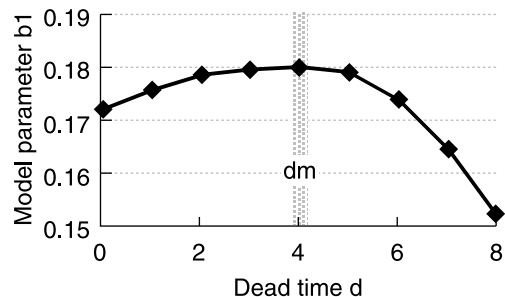
$$VO_2(k+1) = a_1 \cdot VO_2(k) + a_2 \cdot VO_2(k-1) + b_1 \cdot KACT(k-d) \quad (4)$$

d : むだ時間

このモデルは、DARXモデル(入力にむだ時間を持った自己回帰モデル)である。

Fig.7は、エンジンが低負荷の過渡条件となり、これまでの適応スライディングモード制御では安定性の確保が困難であったLA-4モードの780~820秒におけるプロトタイプ車両の ϕ_{in} 、Voutを測定した結果である。

このデータを用いて式(4)のむだ時間dを順次変更しながらモデルパラメータの同定を行なった。このように同定を行なった場合、入力であるKACT(k-d)と出力であるVO₂(k)の相関は、モデルパラメータb₁の大きさとなって表れ、b₁が最も大きくなったときのむだ時間dがその制御対象のむだ時間であることが一般的に知られている¹³⁾。Fig.8はモデルパラメータb₁と同定の際に設定したむだ時間dの関係である。図では、b₁はむだ時間dに対して上に凸の関係となっており、b₁が極大となる時のむだ時間dはdm(=4制御周期)となっている。これより、制御対象にむだ時間dmが存在していることが分かる。

Fig.7 Sampling data of ϕ_{in} and Vout in LA-4 modeFig.8 Identification result of model parameter b₁

4. 制御アルゴリズムの概要

制御対象のモデル化と出力Voutを最適値Vopへ収束させるための目標値 ϕ_{op} を算出する状態予測スライディングモード制御を用いた制御アルゴリズムの設計について述べる。

4. 1. 制御対象のモデル化

Fig.8の結果に基づき、制御対象を以下に示すような入力のむだ時間を $dm(=4$ 制御周期)としたDARXモデルを用いてモデル化した。

$$VO2(k+1)=a1 \cdot VO2(k)+a2 \cdot VO2(k-1) + b1 \cdot KACT(k-dm) \quad (5)$$

4. 2. 適応スライディングモードコントローラの演算式
式(5)の制御対象モデルに対する ϕ_{op} を算出するための適応スライディングモードコントローラは、以下に示すような演算式により実現される。

$$\phi_{op}=Usl(k)+KACT_BASE \quad (6)$$

$$Usl(k)=Ueq(k)+Urch(k)+Uadp(k) \quad (7)$$

$$\sigma(k+dm)=VO2(k+dm)+S \cdot VO2(k+dm-1) \quad (8)$$

$$Ueq(k)=\frac{-1}{b1} \{ (a1-1) + S \} VO2(k+dm) + (a2-S) VO2(k+dm-1) \quad (9)$$

$$Urch(k)=\frac{-1}{b1} F \cdot \sigma(k+dm) \quad (10)$$

$$Uadp(k)=\frac{-1}{b1} G \cdot \sum_{i=0}^{k+dm} \sigma(i) \quad (11)$$

Usl : 適応スライディングモード制御の制御入力

Ueq : 状態量を切換直線上に拘束するための制御入力 (等価制御入力)

Urch : 状態量を切換直線に載せるための制御入力(到達則入力)

Uadp : モデル化誤差や外乱を抑制して状態量を切換直線に載せるための制御入力(適応則入力)

S : 切換関数設定パラメータ

F : 到達則ゲイン

G : 適応則ゲイン

ここで、式(9)～(11)に着目すると、それぞれの式にはVO2の未来値 $VO2(k+dm)$ が使用されており、この値は現時点では未知であるため、上記の制御入力は実行できない。そこで、状態予測器によるVoutの推定未来値Vpreを用いて、式(9)～(11)を以下に示す実行可能な演算式(12)～(16)へ変更した。

$$VO2p(k)=Vpre(k)-VO2_TARGET \quad (12)$$

$$\sigma p(k)=VO2p(k)+S \cdot VO2p(k-1) \quad (13)$$

$$Ueq(k)=\frac{-1}{b1} \{ (a1-1) + S \} VO2p(k) + (a2-S) VO2p(k-1) \quad (14)$$

$$Urch(k)=\frac{-1}{b1} F \cdot \sigma p(k) \quad (15)$$

$$Uadp(k)=\frac{-1}{b1} G \cdot \sum_{i=0}^k \sigma p(i) \quad (16)$$

4. 3. 状態予測器の演算式

推定未来値Vpreを算出するための状態予測器について述べる。

まず、以下に示すようなベクトルA、Bを定義する。

$$A=\begin{bmatrix} a1 & a2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B=\begin{bmatrix} b1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

このとき、式(5)の制御対象モデルに対するVpreの予測式は以下に示すような式となる。

$$Vpre(k)=VO2p(k)+VO2_TARGET \quad (19)$$

$$VO2p(k)=\alpha 1 \cdot VO2(k)+\alpha 2 \cdot VO2(k-1) + \sum_{j=0}^{dm} \beta j \cdot KACT(k-j) \quad (20)$$

$\alpha 1$: A^{dm} の1行1列成分

$\alpha 2$: A^{dm} の1行2列成分

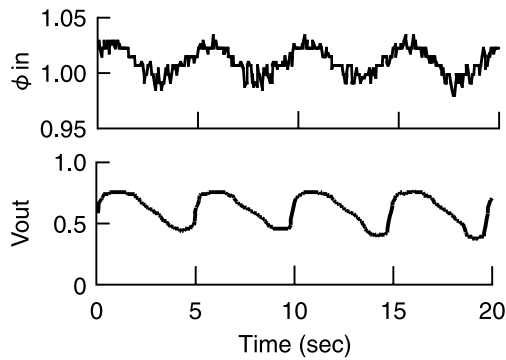
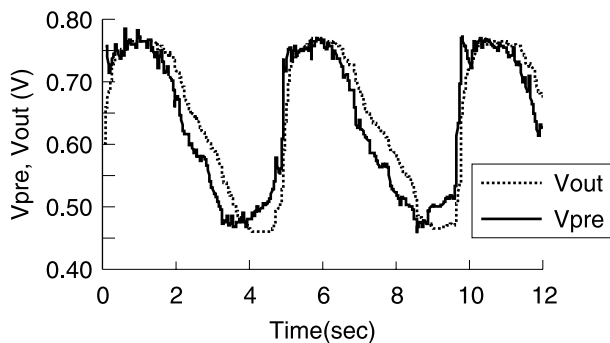
βj : $A^{dm-1}B$ の1行成分

5. シミュレーションによる予測性能の検証

Fig.9に、エンジンの運転空燃比A/Fを振幅 ± 0.2 、周波数0.2Hzで正弦波状に加振した時の ϕ_{in} とVoutを同期サンプリングした実機データを示す。このデータを用いて状態予測器のシミュレーションによる予測性能の検証を行なった。Fig.10に設定むだ時間を $dm(=4$ 制御周期)、モデルパラメータをTable 1の値とした時のVpreとVoutの比較結果を示す。図よりVpreがVoutに対して時間の進み方向にシフトしていることから、状態予測器によってVoutの予測が可能である事が検証できた。

Table 1 Model parameter of controlled object

a1	a2	b1
1.555	-0.560	0.418

Fig.9 Sampling data of ϕ_{in} and V_{out} Fig.10 Simulation result of V_{pre}

6. 実機によるテスト結果

6. 1. 制御性能の検証

状態予測スライディングモード制御を用いた触媒後O₂フィードバックの実機における制御性能の検証を行なうため、プロトタイプの車両を用いてLA-4モードにおける適応スライディングモード制御との制御性能比較を行った。Fig.11はLA-4モード走行中のVoutの制御結果であるが、これにより、状態予測スライディングモード制御を用いた方が、車両の発進等の過渡運転条件における制御性が向上していることが分かる。Fig.12とTable 2はVoutの $V_{op} \pm 0.1V$ 範囲内への出現頻度の比較であるが、過渡運転条件における制御性の向上により、状態予測スライディングモード制御における出現頻度は74.2%となっており、適応スライディングモード制御の65.6%に比べて13.1%の向上となった。以上より、状態予測スライディングモード制御による触媒後O₂フィードバックの制御性能の大幅な向上を確認できた。

6. 2. 排気エミッション低減効果の確認

Fig.13は、状態予測スライディングモード制御の過渡条件におけるVoutの制御性向上による効果の確認のため、従来制御手法^{4)~6), 9)~11)}とのHC排出量の比較を行なった結果である。同図によると、LA-4モード中の最も大きく運転条件が変化するCT2山目において、Voutの制御性向上により排気エミッションの大幅な低減が実現できている。また、

モード全域においても同様の結果となった。Table 3に示す通り、適応スライディングモード制御の場合は、従来制御手法に対する低減率が、CO、HC、NO_xのそれぞれに対して、7.6%、17.1%、12.5%であったのに対し、状態予測スライディングモード制御の場合は、それぞれ、33.1%、41.6%、43.7%という大幅な低減率となっている。これにより、状態予測スライディングモード制御が、従来制御手法や適応スライディングモード制御に対して大きな排気エミッション低減効果を持っていることを確認できた。

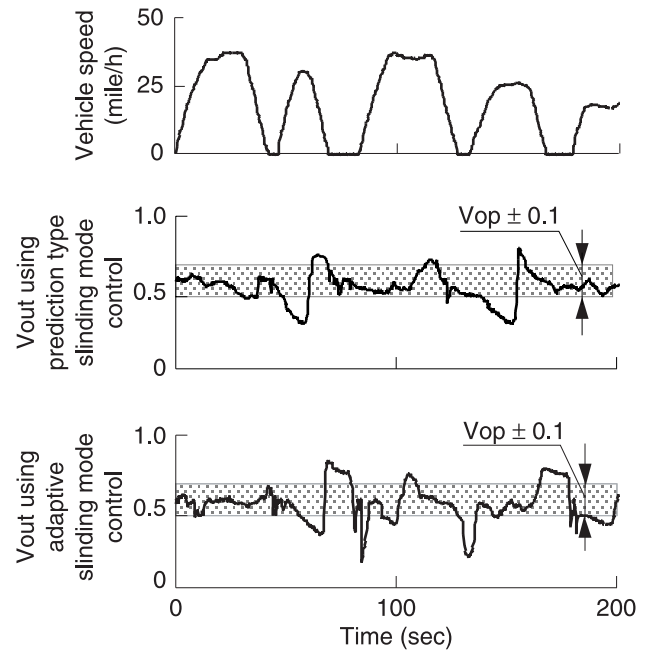
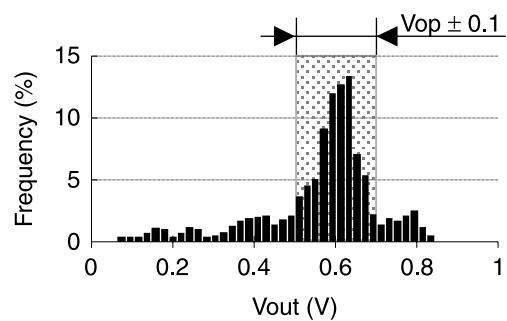


Fig.11 Comparison between adaptive sliding mode control and prediction type sliding mode control

Fig.12 Histogram of V_{out} by using prediction type sliding mode controlTable 2 Frequency of V_{out} within $V_{op} \pm 0.1V$

	Adaptive sliding mode	Prediction type sliding mode
Frequency	65.6 (%)	74.2 (%)
Changed rate	—	+13.1 (%)

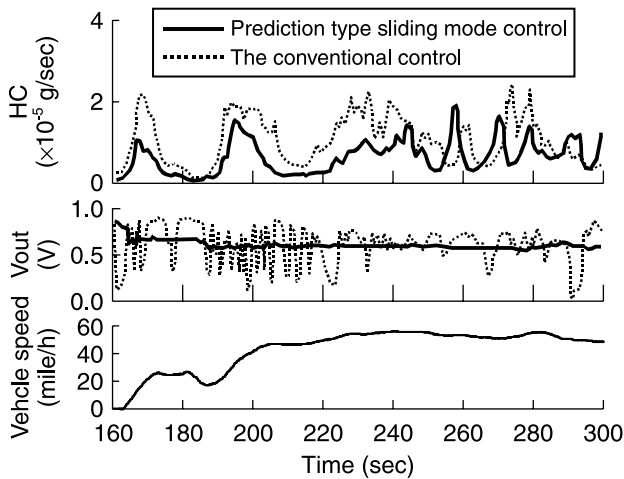


Fig.13 Comparison of emission between the conventional control and prediction type sliding mode control

Table 3 Improved ratio of emission between adaptive sliding mode control/prediction type sliding mode control and the conventional control (LA-4 mode)

	(%)		
	CO	HC	NOx
Adaptive sliding mode control	7.6	17.1	12.5
Prediction type sliding mode control	33.1	41.6	43.7

7. まとめ

以下に示すアプローチによって、触媒後O₂フィードバックの過渡を含む運転条件におけるVoutの目標値Vopへの収束頻度の向上と大幅なエミッション低減を実現した。

- 1) 制御対象であるリニア空燃比センサから触媒後O₂センサまでの排気系を、そのむだ時間特性に着目し、DARXモデル(入力にむだ時間を持った自己回帰モデル)としてモデル化した。
- 2) むだ時間補償のための状態予測器を適応スライディングモード制御に追加した状態予測スライディングモード制御を新たに設計し、その適用を行なった。
- 3) LA-4モードにおける実機テストでは触媒後O₂センサ出力Voutの目標値Vop $\pm$ 0.1V範囲内の収束頻度74.2%を実現し、適応スライディングモード制御を用いた場合に比べて13.1%向上した。
- 4) LA-4モードにおけるCO, HC, NOxの排気エミッションを従来制御手法に比べ、33~44%低減できた。

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) Anderson, M. J.: A Feedback A/F Control System for Low Emission Vehicles, SAE Paper 930388 (1993)
- 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) 岸, 菊池, 鈴木, 林: ガソリンエンジンの超低エミッション化技術, 自動車技術 Vol.52, p.11-17 (1998)
- 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) 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)
- 10) Hasegawa, Y., Akazaki, S., Komoriya, I., Maki, H., Nishimura, Y. and Hirota, T.: Individual Cylinder Air-Fuel Ratio Using an Observer, SAE Paper 940376 (1994)
- 11) Komoriya, I., Hasegawa, Y., Akazaki, S., Maki, H., Nishimura, Y. and Hirota, T.: Application of Fluid Dynamics Model to Estimate Cylinder Intake Volume, SAE Paper 960075 (1996)
- 12) 渡部: むだ時間システムの制御, 東京, 計測制御学会, 1993, 206p.
- 13) 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, 106p.

■ 著 者 ■



安井 裕司



赤崎 修介



上野 将樹



岩城 喜久