

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

Adaptive Sliding Mode Control for Secondary O₂ Feedback

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

排気エミッション低減に有効な三元触媒の浄化率向上のため、触媒の下流に設けたO₂センサ出力に基づいてエンジンの運転空燃比の制御を行なう触媒後O₂フィードバックが盛んに研究されている。

我々は、その性能向上には触媒の非線形的な応答特性によって生じるモデル化誤差に対する安定性向上が必要である事を明らかにした。

そこで、触媒をその周波数ゲイン特性に基づいてローパスフィルタとしてモデル化し、高いロバスト安定性を有する適応スライディングモード制御を制御アルゴリズムとして適用することにより、触媒後O₂フィードバックのモデル化誤差に対する安定性を大幅に向上した。

ABSTRACT

Large amount of efforts are put into the research of the secondary O₂ feedback that is the feedback control of air fuel ratio according to O₂ sensor output for increasing catalyst reduction rate.

The robust stability against the modeling error, which is caused by nonlinear characteristics of the catalyst, is necessary for improving the control performance.

Low-pass filter model was developed based on frequency characteristics of the catalyst, and Adaptive Sliding Mode Control was applied to that feedback algorithm. As a result, this secondary O₂ feedback obtained the superior stability against the modeling error.

1. まえがき

近年、環境問題への関心が急速に高まっており、米国を始め、欧州、日本でも自動車の排気エミッションや燃費に対する規制強化が行われている。その流れの中、米国カリフォルニア州において2004年から施行予定のLEV-II規制に代表されるように、特にNO_x排出量の低減が望まれている。これらの動向に対し、各メーカーや研究機関において、排気エミッション低減のための研究が精力的に行われ、その中でも、触媒の研究¹⁾に並び、近年のマイクロプロセッサの能力向上に伴って、触媒浄化性能を有効活用するための空燃比制御の研究^{2)~9)}がめざましい進歩を遂げている。

触媒浄化性能を有効活用するための空燃比制御としては、触媒の下流に設置したO₂センサ(以下、触媒後O₂センサ)の出力に基づきエンジンの運転空燃比を制御する触媒後O₂フィードバック^{5)~9)}がある。

そこで、その性能向上が果たされれば更なる触媒浄化率の向上が期待できることから、触媒を含む排気系をローパスフィルタとしてモデル化し、ロバスト安定性の高い適応スライディングモード制御を適用することにより、モデル化誤差に対する安定性の向上を実現した。

以下にその内容について述べる。

2. 着眼点とアプローチ手法

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UEGO sensor)、下流に触媒後O₂センサ(図のHEGO sensor)が設置されている。また、Table 1に実機テストで用いたプロトタイプの車両の諸元を示す。

Table 1 Specification of experimental vehicle

Vehicle :	'98 Model year ACCORD EX-ULEV
Engine :	L-4, 2.3 liters
ECU :	Prototype
Catalyst :	Tri-metal type (Pt/Rh:Pd=1:1:15) 277.5g/ft ³ , 600cell/in ² , 1.7 liters, 50,000mile aging

Fig.1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} と定義し、Fig.2にトリメタル触媒(Pt/Rh/Pd触媒)の浄化率と2つのセンサ出力の関係を示す。

図より、HCと NO_x の浄化率が最大となる ϕ_{in} は、触媒の劣化と共に減少するが、この浄化率が最大を示す時の V_{out} は0.6V近傍の一定値になることが分かる。この関係に着目すると、触媒後 O_2 フィードバックの安定性を向上し、 V_{out} の0.6V近傍の最適値(以下、 V_{op})への整定を実現すれば、触媒の劣化状態によらず最大触媒浄化率が維持でき、更なる排気エミッションの低減を図れることが分かる。

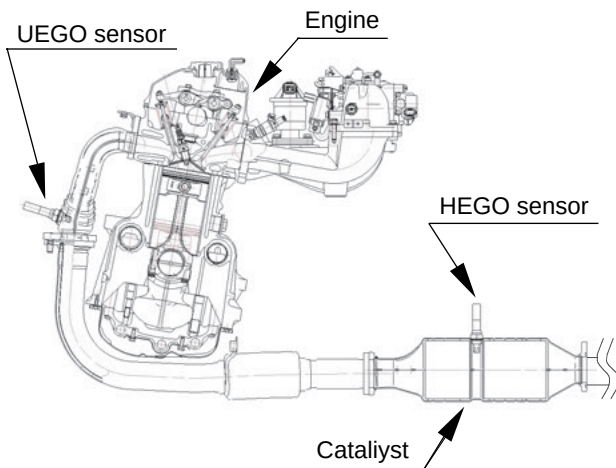


Fig.1 Layout of sensors and three-way catalyst

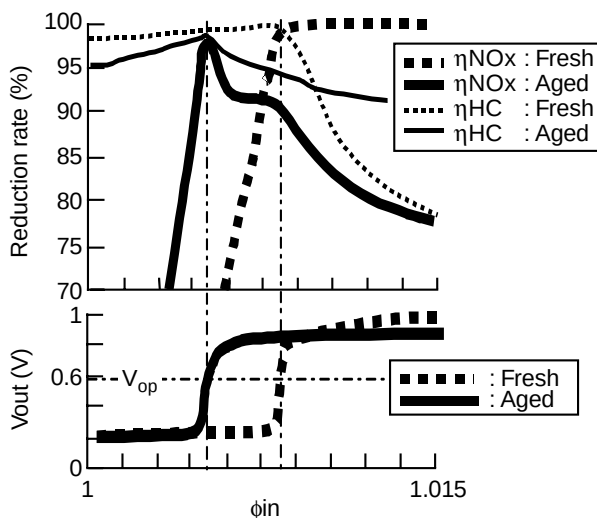
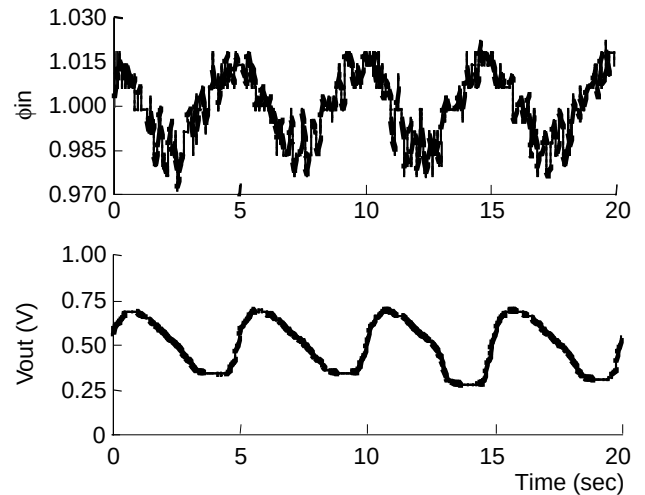


Fig.2 Reduction rate characteristics of three-way catalyst

2. 2. 触媒後 O_2 フィードバックの課題

Fig.3に、50,000mile走行相当のトリメタル触媒を用い、エンジンの空燃比を振幅 ± 0.2 、周期0.2Hzで正弦波状に加振したときの ϕ_{in} と V_{out} を同期サンプリングしたデータを示す。

図より、触媒への入力 ϕ_{in} に対する出力 V_{out} の応答は、 V_{out} の増大時と減少時で応答が異なる非線形な特性となっていることが分かる。このような応答特性により触媒後 O_2 フィードバックはモデル化誤差を生じるため、これに対する安定性向上が不可欠となる。

Fig.3 Frequency response characteristics of V_{out} and ϕ_{in}

2. 3. 解決手法

上記の課題解決のため、制御対象の周波数ゲイン特性に着目して触媒を含む排気系をローパスフィルタとしてモデル化し、そのモデルに基づき適応スライディングモード制御を用いた触媒後 O_2 フィードバックを構成した。制御系の全体構成は、Fig.4に示すように、 V_{out} を最適値 V_{op} へ収束させるための ϕ_{in} の目標値(以下、 ϕ_{op})を適応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)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

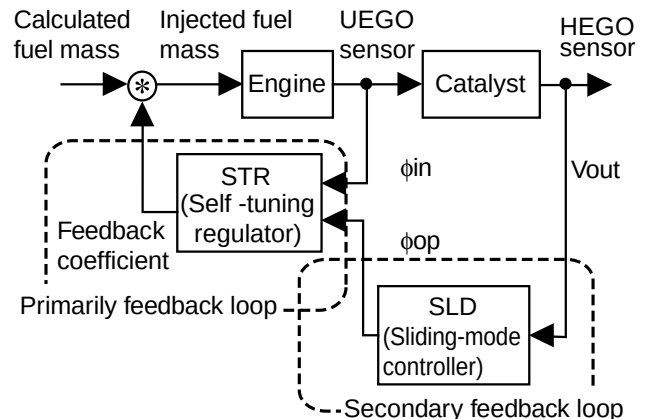


Fig.4 Overall configuration of double feedback loop

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。

3. 排気系のモデル化

触媒後O₂フィードバックの制御アルゴリズムを設計するため、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を解析し、ローパスフィルタとしてのモデル化とモデルパラメータの同定を行なった。

3. 1. 制御対象の周波数特性

Fig.5にFig.3の ϕ_{in} 、Voutをフーリエ変換した結果を示す。図より、制御対象の入力にあたる ϕ_{in} の周波数ゲインが各周波数に対してフラットであるのに対し、出力にあたるVoutの周波数ゲインは周波数の増加とともに減少しており、制御対象の周波数ゲイン特性がローパス特性であることが分かる。

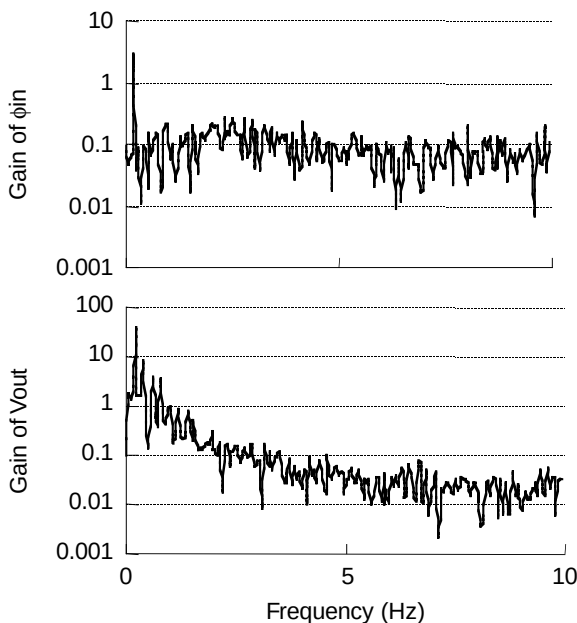


Fig.5 Frequency characteristic of three-way catalyst

3. 2. 制御対象のモデル化

従来、触媒を含む排気系のモデル化手法として、O₂ストレージ反応などの化学反応式に基づいた化学式モデル¹⁰⁾や、触媒の時系列応答の非線形特性に着目した非線形モデル⁶⁾を用いる手法がある。ところが、それらのモデルは非常に複雑なものになり、そのモデルに基づいた高精度な制御の設計は困難であった。

そこで、前節の検討に基づき、制御対象を時系列応答特性ではなく、周波数ゲイン特性に着目し、入力をリニア空燃比センサによる ϕ_{in} 、出力をO₂センサ出力Voutとした線形なローパスフィルタとして扱い、モデルパラメータの同定の容易さと構成次数の低減を考慮し、次の式(1)～(3)で示

される離散時間系のARXモデル(自己回帰モデル)を用いてモデル化した。

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

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

$$KACT(k)=KACT''(k)-KACT_BASE \quad (3)$$

a₁, a₂, b₁ : モデルパラメータ

VO₂(k) : VoutとVopの偏差

VO₂''(k) : Vout

VO₂_TARGET : 目標値Vop

KACT(k) : ϕ_{in} の基準値に対する偏差

KACT''(k) : ϕ_{in}

KACT_BASE : ϕ_{in} の基準値

3. 3. モデルパラメータの同定

Fig.4の ϕ_{in} とVoutのデータを用いて、最小二乗法によりモデルパラメータa₁, a₂, b₁の同定^{11) 12)}を行った。その結果をTable 2に示す。

同定されたモデルパラメータa₁, a₂, b₁とモデルの検証を行なうため、式(1)のモデルの入力にFig.3の ϕ_{in} を入力した時の出力(以下、Vout_m)をフーリエ変換し、Fig.6に示した。図より、モデルの周波数ゲイン特性は制御対象と同様のローパス特性となっており、同定されたモデルパラメー

Table 2 Result of model parameter

a ₁	a ₂	b ₁
1.4320	-0.4218	0.5531

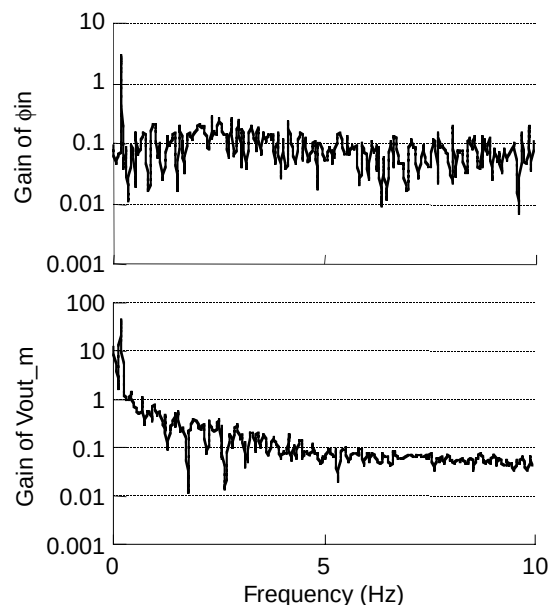


Fig.6 Frequency characteristic of control object model

タ a_1, a_2, b_1 とモデルは制御対象の周波数ゲイン特性を表現できていることが分かる。

4. 制御アルゴリズムの設計

出力 V_{out} を最適値 V_{op} へ収束させるための目標値 ϕ_{op} を算出する適応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. スライディングモード制御の採用

スライディングモード制御とは、Fig.7に示すように、制御対象モデルの状態変数である $VO_2(k)$ 、 $VO_2(k-1)$ をそれぞれ座標軸とする位相平面上に、切換直線と呼ばれる状態変数によって構成される関数(図中のSwitching line)を定義し、状態量(状態変数の組み合わせ)を切換直線に拘束するように制御を行い、さらに切換直線に沿って位相平面の原点(=目標値)へ収束させる制御である。

この状態量の切換直線に沿った収束挙動はスライディングモードと呼ばれるが、このモード中のスライディングモード制御系はモデル化誤差の影響を受けないロバストな状態になることが知られている¹³⁾。

この特徴に着目して、触媒後 O_2 フィードバックのモデル化誤差に対する安定性向上のため適応スライディングモード制御を採用し、目標値 ϕ_{op} を以下に示す三つの制御入力に基づいて算出する新たな構成とした。その詳細について以下に述べる。

等価制御入力 U_{eq} ：状態量を切換直線上に拘束するための入力

到達則入力 U_{rch} ：状態量を切換直線に載せるための入力

適応則入力 U_{adp} ：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入力

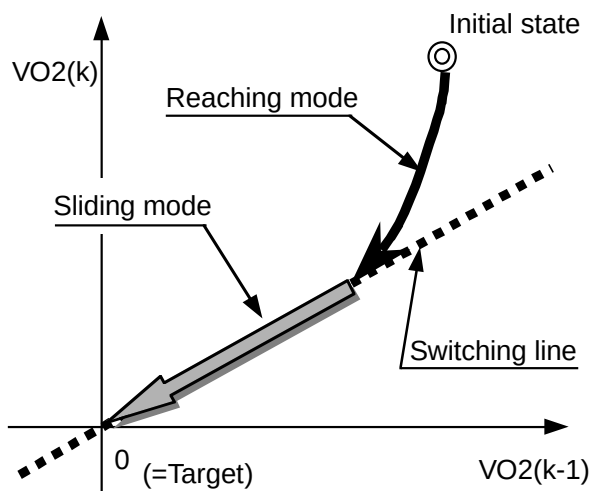


Fig.7 Sliding mode control

4. 2. 切換関数の設定

切換関数 σ を制御対象モデルの状態変数を用いて以下に定義する。

$$\sigma(k) = VO_2(k) + S \cdot VO_2(k-1) \quad (4)$$

S ；切換関数設定パラメータ

この時、切換直線は、

$$\sigma(k) = VO_2(k) + S \cdot VO_2(k-1) = 0 \quad (5)$$

となり、切換直線上に状態量が載った時、制御系の状態方程式は入力の無い一次遅れ系となる。

$$VO_2(k) = -S \cdot VO_2(k-1) \quad (6)$$

したがって、式(6)の S を調整することによって安定化すれば、状態はモデル化誤差の影響を受けることなく、時間の経過と共に原点へ収束する。また、式(6)の安定化は、 S を

$$-1 < S < 1 \quad (7)$$

と選ぶことにより容易に実現できる。

4. 3. 等価制御入力の導出

スライディングモードの発生以後、状態量を切換直線上に拘束し、その状態を持続するために必要な入力である等価制御入力 U_{eq} を導出する。

状態量が切換直線上に拘束され続ける条件は、

$$\sigma(k+1) = \sigma(k) \quad (8)$$

であるから、式(8)を入力 $KACT$ について解くことにより、等価制御入力 U_{eq} が以下のように求められる。

$$U_{eq}(k) = \frac{-1}{b_1} \{ (a_1 - 1) + S \} VO_2(k) + (a_2 - S) VO_2(k-1) \quad (9)$$

4. 4. 到達モードの実現

スライディングモード制御における到達モードとは、状態を切換関数上に載せるためのモードである。ここでは、制御対象の入力と出力が微小ハンチング状態になるチャタリング現象を生じることなく到達モードを実現できる新たな制御入力を導出する。

一般的なスライディングモード制御では、到達モードを実現する入力として、式(10)に示すような到達則入力 U_{rch} を採用し、

$$Urch'(k) = -\left(\frac{F}{b1} \mid \sigma(k) \mid + \Delta\right) \text{sgn}(\sigma(k)) \quad (10)$$

$\text{sgn}()$; 符号関数

F ; 到達則ゲイン

Δ ; モデル化誤差抑制パラメータ

制御入力 U_{sl} を前節の等価制御入力 U_{eq} と合わせて以下のように構成する。

$$U_{sl}(k) = U_{eq}(k) + Urch'(k) \quad (11)$$

式(11)のように制御入力を作成した場合は、到達則入力 $Urch$ の切替特性により、Fig.8に示すようなチャタリング現象を生じる。この現象は、スライディングモード制御特有の現象であるが、触媒後O₂フィードバックによって算出される目標値 ϕ_{op} に基づいてエンジンの運転空燃比が決定されるため、エンジンの燃焼変動によるドライバビリティの悪化を招く恐れがある。

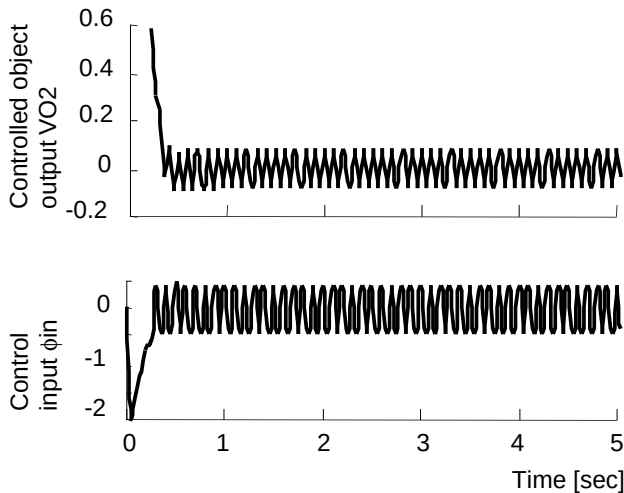


Fig.8 Chattering phenomena

そこでチャタリング現象を防止するため、その原因となる式(10)のモデル化誤差抑制パラメータ Δ を使用しない新たな制御入力を以下のように導出した。

まず、モデル化誤差を定常から低周波数域の成分(以下、 E_L)とそれ以外の高周波成分(以下、 E_H)に分離する。次に、3. 1. 節の検討による制御対象の周波数ゲイン特性に着目すると、 E_H は制御対象のローパス特性により、積極的な抑制を行なわなくても時間と共に減衰するため、 E_L のみを積極的に抑制すれば良い^{13)~16)}ことが分かる。さらに、 E_L の影響がFig.9に示すような切替関数 $\sigma(k)$ の偏差となって現れることに着目すると、式(12)の $\sigma(k)$ の積分値をフィードバックする適応則入力 U_{adp} により、モデル化誤差を抑制できる。

$$U_{adp}(k) = \frac{-1}{b1} G \cdot \sum_{i=0}^k \sigma(i) \quad (12)$$

G ; 適応則ゲイン

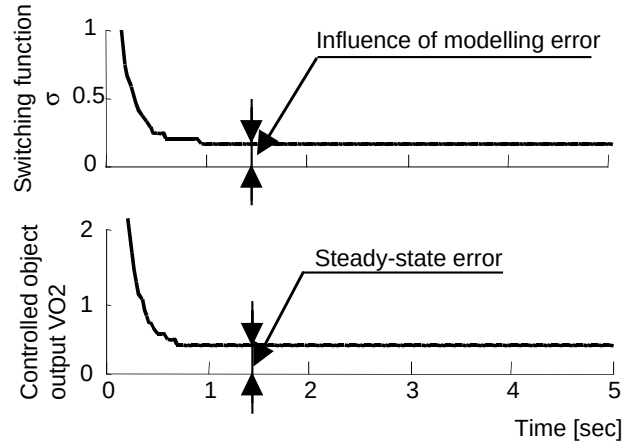


Fig.9 Influence of modeling error

よって、式(10)よりモデル化誤差抑制パラメータ Δ を取り除いた以下に示す到達則入力 $Urch$

$$\begin{aligned} Urch(k) &= -\left(\frac{F}{b1} \mid \sigma(k) \mid\right) \text{sgn}(\sigma(k)) \\ &= \frac{-1}{b1} F \cdot \sigma(k) \end{aligned} \quad (13)$$

と適応則入力 U_{adp} を併用することにより、到達モードを実現し、適応スライディングモード制御の入力 U_{sl} を式(9)、(12)、(13)を用いた下式によって構成した。

$$U_{sl}(k) = U_{eq}(k) + Urch(k) + U_{adp}(k) \quad (14)$$

4. 5. 目標値 ϕ_{op} の算出

式(14)による制御入力 U_{sl} は、制御対象モデルとして偏差系のモデルを採用したため、式(3)の基準値 $KACT_BASE$ に対する偏差として算出されている。よって、目標値 ϕ_{op} は、下式によって求められる。

$$\phi_{op} = U_{sl}(k) + KACT_BASE \quad (15)$$

5. シミュレーションによる安定性検証

シミュレーションにより、適応スライディングモード制御のモデル化誤差に対するロバスト安定性の検証を行った。

5. 1. シミュレーション方法

シミュレーションによる適応スライディングモード制御の安定性検証を行うためには、制御対象の非線形特性を含めたシミュレーションモデルを構築し、それに対する制御系の安定性検証を行わなくてはならない。ところが、制御対象は、触媒の化学反応過程を含んでおり、その非線形特性をモデル化することは困難である。現状では式(1)による線形モデルを用いているが、これをシミュレーションモデルとしたのでは、制御対象の非線形特性を含めた動特性を表現することはできない。

そこで、Fig.10に示すように制御対象を線形要素と非線形要素に分離し、線形要素の動特性のみを式(1)に基づいた式(16)に置き換え、式(17)に示すように線形出力(以下、 $VO2_l(k)$)に非線形要素成分の出力(以下、 $VO2_nl(k)$)を出力外乱として加えることにより出力(以下、 $VO2_m(k)$)を得るシミュレーションモデルを構成した。

$$VO2_l(k+1) = a1 \cdot VO2_l(k) + a2 \cdot VO2_l(k-1) + b1 \cdot KACT(k) \quad (16)$$

$$VO2_m(k) = VO2_l(k) + VO2_nl(k) \quad (17)$$

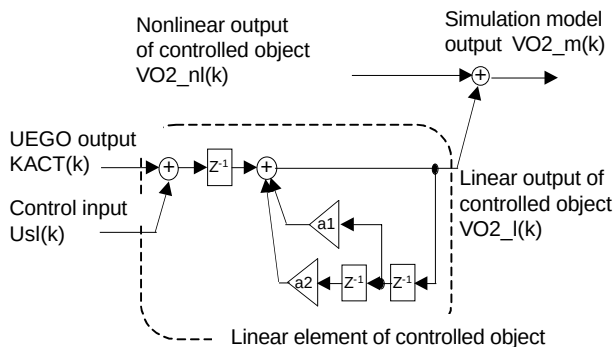


Fig.10 Simulation model of controlled object

5. 2. シミュレーション結果

Fig.10のシミュレーションモデルを用いて安定性を検証し、Fig.11の結果を得た。

図より、適応スライディングモード制御により制御系の安定性が確保され、 $VO2_m$ の $0 \pm 0.05V$ 内への整定と切換関数 $\sigma(k)$ のゼロ近傍への整定が実現されていることから、目的としたモデル化誤差の周波数成分 E_L を抑制できていることが確認できた。

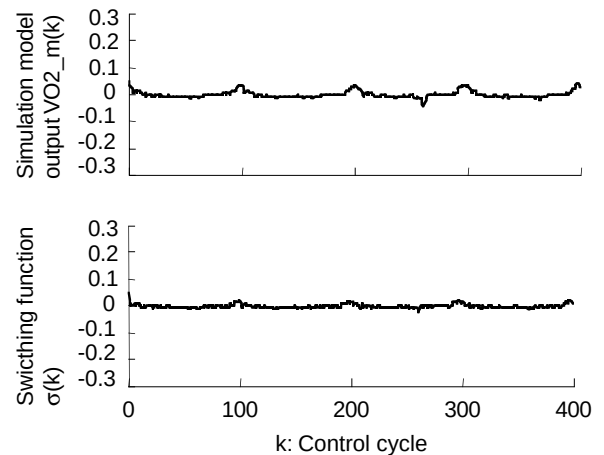


Fig.11 Simulation result of regulation by Adaptive Sliding Mode Control

6. 実機による安定性検証

適応スライディングモード制御の実機における安定性検証を行なうため、プロトタイプ車両を用いて、50mile/hのクルーズ運転条件におけるPID制御と適応スライディングモード制御の制御性能比較を行なった。その結果をそれぞれFig.12と13に示す。

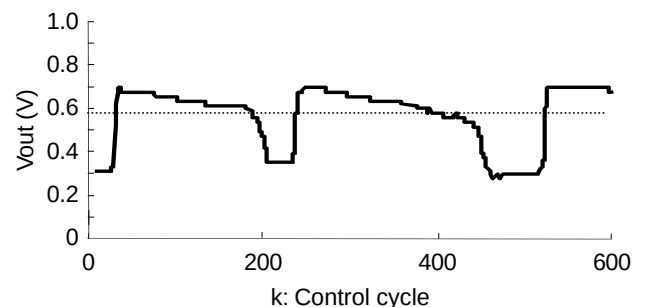


Fig.12 Steady operation test using PID controller

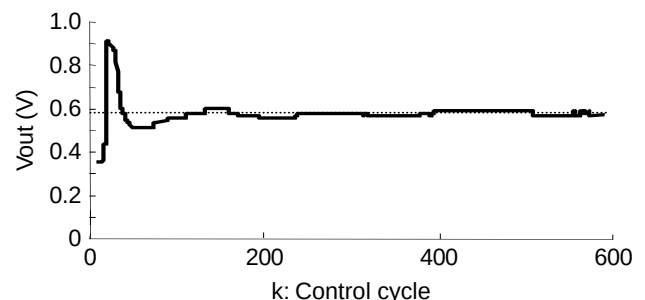


Fig.13 Steady operation test using Adaptive Sliding-mode controller

PID制御では、触媒後 O_2 センサ出力 V_{out} を目標値 V_{op} へ整定できないが、適応スライディングモード制御の場合は、目標値 V_{op} に対する $\pm 0.025V$ の範囲への高精度な整定を実現している。

また、スライディングモード制御特有の位相平面上にFig.13の V_{out} の V_{op} に対する偏差 VO_2 の軌跡を示すとFig.14のようになり、状態量が切換直線に拘束されながら原点へ収束するスライディングモードの発生も確認できた。

以上の結果より、実機における適応スライディングモード制御の安定性を検証できた。

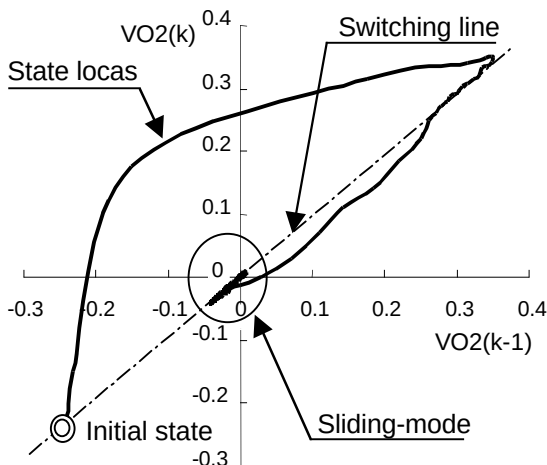


Fig.14 State locus on a phase plane

7. まとめ

以下に示すアプローチによって、触媒後 O_2 フィードバックの触媒の非線形的な応答特性によって生じるモデル化誤差に対する安定性を大幅に向上させた。

- (1) 制御対象であるリニア空燃比センサから触媒後 O_2 センサまでの排気系を、その周波数ゲイン特性に着目し、ローパスフィルタとしてモデル化した。
- (2) ロバスト制御である適応スライディングモード制御を適用した。

また、50mile/hクルーズにおける実機テストにおいて、触媒後 O_2 センサ出力 V_{out} の目標値 V_{op} に対する $\pm 0.025V$ の範囲への高精度な整定を確認した。

参考文献

- 1) 平本, 森田, 関場, 松下: 三元触媒システムによる排気超クリーン化技術, 自動車技術会 学術講演会前刷り集, NO.101-98, p.1-4 (1998)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 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) Anderson, M.J.: A Feedback A/F Control System for Low Emission Vehicles, SAE Paper 930388 (1993)
- 8) Ohata, A., Masu, M., and Inoue, T.: Model Based Air-Fuel Control for Reducing Exhaust Gas Emissions, SAE Paper 950075 (1995)
- 9) 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)
- 10) 馬場, 松永, 小島, 大澤, 伊藤: 自動車用排気触媒の過渡時における浄化率予測, 第14回内燃機関シンポジウム講演会論文集, p.205-210 (1997)
- 11) 片山: システム同定入門, 東京, 朝倉書店, 1994, p.196
- 12) 寺尾, 金井: ロバスト適応制御入門, 東京, オーム社, 1989, p.187
- 13) 野波, 田: スライディングモード制御, 東京, コロナ社, 1994, p.263
- 14) 木田, 池田, 山口: 広域遮断特性を持たせた最適レギュレータとその大型宇宙構造物制御への応用, 計測自動制御学会論文集25-4, 448-454 (1989)
- 15) Gupta, N.K.: Frequency-shaped cost functionals: Extension of linear quadratic-Gaussian design method, J. Guidance and Control 3-6, p.529-535 (1980)
- 16) Anderson, B.D.O. and Mingori, D.L.: Use of frequency dependence in linear quadratic control problems to frequency-shape robustness, J. Guidance Control and Dynamics 8-3, p.397-401 (1985)

■著 者■



安井 裕 司



赤崎 修 介



上野 将 樹



岩城 喜 久