Extended Summary 本文は pp.251–258

Two-Step Design Method of Engine Control System Based on Generalized Predictive Control

Seiji Hashimoto Member (Gunma University, seijiha@el.gunma-u.ac.jp)

Hiroyuki Okuda Non-member (Utsunomiya University)

Yasushi Okada Non-member (Utsunomiya University)

Shuichi Adachi Member (Keio University, adachi@appi.keio.ac.jp)

Shinji Niwa Non-member (Daihatsu Motor Co., Ltd., Shinji_Niwa@mail.daihatsu.co.jp)

Mitsunobu Kajitani Non-member (Daihatsu Motor Co., Ltd., Mitsunobu_Kajitani@mail.daihatsu.co.jp)

Keywords: low emission vehicle, system identification, air-fuel ratio control, generalized predictive control

An exhaust gas purification system that simultaneously oxidizes excess levels of exhaust carbon monoxide (CO) and unburned HCs and reduces excess levels of nitrogen oxides (NO_x) has been designed by combining an electric fuel-injection system and a three-way catalytic converter. This catalyst is ineffective when the ratio of the air to fuel flowing into the engine (A/F) differs more than $\pm 1\%$ from the stoichiometric level of 14.5:1. Therefore, a feedback control system is required in order to maintain the A/F within $\pm 1\%$ of the desired level. Conventional A/F control is performed by using two A/F sensors, which are placed on the pre- and post-catalysts. In this case, the emission performance of the conventional system is strongly affected by the deterioration of the catalyst, the durability of the emission control components and improper maintenance.

In the present paper, in order to meet the requirements for a lowemissions vehicle, a novel construction method of the A/F control system is proposed. The newly constructed A/F control system is illustrated in Fig. 1. $\xi(k)$ is the quantity for the basic injection, which changes in accordance with the engine revolution and the intake pressure, and u(k) and z(k) are the air-fuel ratio as the input and output signals of the catalyst. Both x(k) and y(k) are obtained signals by the nonlinear oxygen sensor. $\eta(k)$, which is the output of the front F.B. controller, is the additional quantity of $\xi(k)$ to correct the fuel injection for the accurate A/F ratio control. The controller design is based on a promising two-step procedure. The first step is to design the A/F control system for the engine based on an open loop design. The engine system controller performs feedforward control of the engine system from r(k) to x(k). In other words, the controller derives the reference values r(k) in order to track x(k) to $x^{o}(k)$.

The second step is to design the A/F control system for the catalyst system. The design method is based on the generalized predictive control (GPC) in order to satisfy the robustness to open loop control as well as model uncertainty. The controller for the catalyst system calculates $x^{o}(k)$ in order to track y(k) to its reference $y^{*}(k)$ by constructing the feedback loop. Therefore, these two controllers connected in series can be considered to be a new rear F.B. controller. In addition to the high control performance, the further advantage of the two-step design procedure is that the complex A/F control system can be systematically designed with good prospect.

As a means of obtaining high A/F control performance, regardless of the deterioration level of the catalyst, the system identification approach is adopted in order to derive a mathematical model for both systems.

In order to verify the proposed control strategy, experiments with a full-scale automobile were carried out. The experiments were performed using the deteriorated catalyst under steady-state conditions with a rate of revolution of the engine of $3,600\,\mathrm{min^{-1}}$ and an intake pressure of $602\,\mathrm{mmHg}$. Fig. 2 shows the analytical results of the components of the exhaust gas emission for both the conventional and proposed control systems. As a result of the precise A/F control by the GPC-based proposed control method, the significant reduction ratios of 48.5%, 24.3% and 14.9% were achieved in CO, HC and NO_x emissions, respectively.

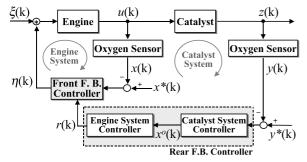


Fig. 1. Configuration of the proposed A/F control system

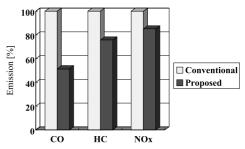


Fig. 2. Comparison of the emissions of CO, HC and NO_{X}

一般化予測制御に基づくエンジン制御系の二段階設計法

正 員 橋本 誠司* 非会員 奥田 裕之** 非会員 岡田 康志** 正 員 足立 修一*** 非会員 丹羽 伸二**** 非会員 梶谷 満信****

Two-Step Design Method of Engine Control System Based on Generalized Predictive Control

Seiji Hashimoto*, Member, Hiroyuki Okuda**, Non-member, Yasushi Okada**, Non-member, Shuichi Adachi***, Member, Shinji Niwa****, Non-member, Mitsunobu Kajitani****, Non-member

Conservation of the environment has become critical to the automotive industry. Recently, requirements for on-board diagnostic and engine control systems have been strictly enforced. In the present paper, in order to meet the requirements for a low-emissions vehicle, a novel construction method of the air-fuel ratio (A/F) control system is proposed. The construction method of the system is divided into two steps. The first step is to design the A/F control system for the engine based on an open loop design. The second step is to design the A/F control system for the catalyst system. The design method is based on the generalized predictive control in order to satisfy the robustness to open loop control as well as model uncertainty. The effectiveness of the proposed A/F control system is verified through experiments using full-scale products.

キーワード:低排出ガス自動車,システム同定,空燃比制御,一般化予測制御

Keywords: low emission vehicle, system identification, air-fuel ratio control, generalized predictive control

1. まえがき

近年、地球上の自然環境を守るためにさまざまな環境保全に関する取り組みが行われている。自動車が関わる環境保全への対応技術の一つに、排出ガスの抑制がある。自動車の排出ガスに対する規制は年々強化されており、このような動向に対応するため自動車メーカは触媒の性能改善や、エンジン始動直後の有害成分排出抑制のための燃焼改善、触媒・排気センサの早期活性化など、対応技術の研究開発に積極的に取り組んでいる。

* 群馬大学

〒 376-8515 桐生市天神町 1-5-1 Gunma University

1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu 376-8515

** 宇都宮大学

〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 Utsunomiya University

7-1-2. Yoto, Utsunomiya 321-8585

*** 慶應義塾大学

〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

Keio University

3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

**** ダイハツ工業

〒 520-2593 滋賀県蒲生郡竜王町山之上 3000

Daihatsu Motor Co., Ltd.

3000, Yamanoue, Ryuo-cho, Gamo-gun, Shiga 520-2593

現在の排出ガス浄化システムの主流は、電子燃料噴射に よる空燃比制御と排出ガス中の有害成分である一酸化炭素 (CO), 炭化水素 (HC), 窒素酸化物 (NO_x) を同時に浄化 する三元触媒により構成されるシステムである(1)(2)。三元 触媒はエンジン内に流入する空気と噴射する燃料の比であ る空燃比によって有害成分の浄化率が変化する。触媒の浄 化能力が最大になるのは,空燃比が理論空燃比近傍に保た れるときである。ここで、理論空燃比とはガソリンが完全 燃焼するときの理論値であり、14.5 近傍の値をとる。した がって、触媒浄化性能の有効活用のためには、空燃比を常 に理論空燃比近傍に制御する必要がある。そのために, 現 在は触媒の前後に排気センサを設け、2重のフィードバッ ク制御を行っている。しかしながら現在の制御法では,劣 化に起因する触媒の特性変化に対応できず,空燃比制御性 能が低下するといった問題がある。そこで、われわれは可 変忘却要素を用いた逐次最小二乗法による触媒の同定法と 劣化診断法を提案してきた③。

本論文では、実使用条件下での空燃比制御性能の向上を実現するため、制御対象をエンジンとその周辺の制御機器からなるシステムと、触媒とその前後の酸素センサからなるシステムの2つに分割し、それぞれのシステムに対して独立にコントローラを設計する二段階の設計法を提案する。エンジン系に対しては、対象が共振特性を有するためその共振特性

を改善する低域通過フィルタを、また触媒系に対しては、その非線形時変特性を考慮した一般化予測制御(Generalized Predictive Control:GPC)に基づく設計法を導入する。定常状態に対するフルスケール実機実験により、提案手法では従来手法と比較し良好な空燃比制御性能がえられることを検証したので報告する。

2. 従来の空燃比制御システム

現在主流の排出ガス浄化システムの構成を図1に示す。 エンジンから排出された直後の有害成分を多量に含むガス は、触媒内での化学反応によって浄化され大気中に放出さ れる。なお, 現在の空燃比制御システムは, 触媒浄化性能 の有効活用のために、触媒の前後に設置された排気センサ の出力を用い、2重のフィードバック制御を行っている。排 気センサには、空燃比に対して出力が線形となる A/F セン サと、出力が非線形となる酸素センサがある。本論文では 排気センサとして、より低コストな酸素センサ(4)を使用す るが、線形 A/F センサを用いたシステムに対しても、本論 文で提案する制御手法は適用可能であり,後述するシステ ム同定の条件が改善される分,制御性能の向上が見込める。 酸素センサは空燃比に対して図2に示すような非線形な出 力特性を有する。図2は線形空燃比センサで計測した空燃 比に対する酸素センサの出力電圧特性を示す。このように 酸素センサの出力電圧は、理論空燃比近傍で急峻な傾きを もち,前後の領域で飽和するような特性を有するが,空燃 比がリッチ(空燃比 < 14.5) かリーン(空燃比 > 14.5) か という情報は検出できる。また、触媒の浄化能力が最大と なるのもこの理論空燃比近傍であるため,空燃比制御の目 標値は通常,理論空燃比の14.5,もしくはそれに対応する 酸素センサの出力電圧 0.6 V に設定される場合が多い。

現在の空燃比制御システムの代表的な構成例を図3に示す。図中、 $\xi(k)$ は基本燃料噴射量であり、これはエンジン回転数や吸気管圧によって変化する。また u(k) と z(k) はそれぞれ触媒の入力と出力となる空燃比であるが、線形空燃比センサを用いなければ計測することはできない。したがって、フィードバック制御には触媒の前後に設置された酸素センサの出力電圧である x(k) と y(k) を用いる。またr(k) はリアフィードバック(F.B.)コントローラの出力であり、この信号によりフロント F.B. コントローラの制御誤差を補正している。そしてフロント F.B. コントローラはx(k) からえられる空燃比がリッチかリーンかという情報とr(k) によって、 $\xi(k)$ を何%補正するかを決める燃料噴射補正量 $\eta(k)$ を出力する。そのため燃料噴射量は $\eta(k)$ と $\xi(k)$ の偏差ではなく、積を算出することによって決定され、インジェクタを通電駆動する。

次に、現在の空燃比制御システムの問題点を示す。現在の空燃比制御システムの制御アルゴリズムは、おもにヒューリスティックな方法で構築されており、設計パラメータの数が多く、その調整が困難である。また、触媒はエンジン近くに装着され、エンジン高負荷時には触媒の温度が耐熱

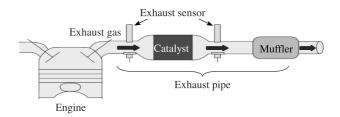


図1 排出ガス浄化システムの構成

Fig. 1. Configuration of the exhaust gas purification system.

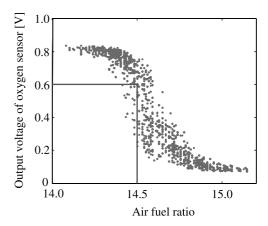


図2 空燃比センサの出力電圧特性

Fig. 2. Characteristics of the oxygen sensor output voltage.

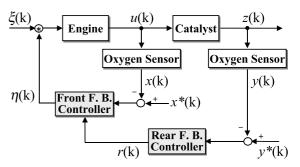


図3 従来の空燃比制御システムの構成

Fig. 3. Configuration of the conventional A/F control system.

温度を上回るため、熱による経年劣化が進行する。しかしながら、リア F. B. コントローラは時不変であるため、この経年劣化に対し制御性能は低下していく。さらに、現状のリア F. B. コントローラは y(k) がリッチ(もしくはリーン)のときに徐々に制御中心をリーン(リッチ)側に移行させるような制御を行っている。しかし、どの程度リッチ(リーン)なのかがわからないため、目標値への追従が遅くなってしまうという問題もある。

次節では,これらの問題点を解決するために,新たな空 燃比制御システムの構築を行う。

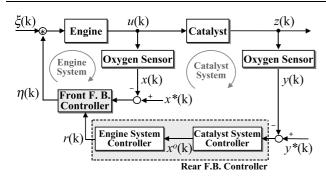


図 4 新しい空燃比制御システムの構成 Fig. 4. Configuration of the proposed A/F control system.

3. 新しい空燃比制御システムの構築

〈3・1〉 空燃比制御システムの構築 ここでは実用性 を考慮し、その構成は現状を大幅に変更することなく、ま た,設計指針が明確で劣化触媒に対しても十分な制御性能 がえられることを目標とする。提案する空燃比制御システ ムを図4に示す。システムをフロント F.B. コントローラ とエンジンからなるエンジン系と、触媒と触媒前後に設置 された酸素センサからなる触媒系とに分割して考える。こ こで、エンジン系および触媒系に対する各コントローラを 直列に接続したものを新たなリア F.B. コントローラとす る。エンジン系コントローラはr(k)からx(k)までのエンジ ン系に対してフィードフォワード制御を行う役割をしてお り, x(k) を $x^{o}(k)$ に追従させるような r(k) を算出する。ま た, 触媒系コントローラは x(k) から y(k) までの触媒系に対 してフィードバック制御を行い, y(k) を $y^*(k)$ に追従させ るような x(k) の目標値 $x^{o}(k)$ を算出する。従来制御では主 として触媒上流のセンサ信号x(k)で空燃比制御を行い、触 媒下流の信号 y(k) でそれを補正するという手法を用いてい る。これに対して、提案手法では、次節で示すようにエンジ ン系及び触媒系両方のモデル化を行うため, エンジン系の 出力である x(k) に対してエンジン系コントローラでフィー ドフォワード制御を行うとともに、触媒系においてもその 動特性を利用し、下流の出力 y(k) に対し触媒系コントロー ラで直接 GPC による制御を行うことが可能である。これ により空燃比を14.5 近傍に制御する。

〈3・2〉 エンジン系と触媒系のモデル化 次に,実験的モデル化手法であるシステム同定法に基づき,エンジン系と触媒系のモデル化を行う。システム同定法によるモデル化の利点は,エンジンや触媒の複雑な伝達特性を入出力信号から同定できること,また次節で導入する GPC と整合性が良いこと,文献(3) で提案した触媒の劣化診断に応用可能であること,などがあげられる。エンジン系のモデル化では入出力信号はそれぞれ r(k), x(k) である。また,触媒系の同定では入出力信号はx(k), y(k) であり,酸素センサの特性もその同定モデルに含まれる。同定実験ではリアF.B. コントローラを切り離して行うため,閉ループ同定問

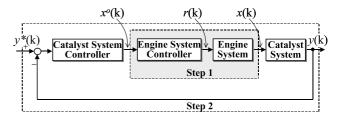


図 **5** 簡単化した空燃比制御システムの ブロック図

Fig. 5. Block diagram of the simplified A/F control system.

題とはならない。また、GPCとの整合性を考慮し同定モデルは ARX モデルとする。

〈3・3〉 空燃比制御系の設計法 図4の空燃比制御システムは図5のように簡略化して表すことができる。システム同定法により導出されるエンジン系と触媒系のモデルを用いて、エンジン系と触媒系からなるリア F.B. コントローラを構築する。提案する設計法は、以下に示すようにエンジン系コントローラの設計と触媒系コントローラの設計の2段階設計により構成される。

Step: 1 エンジン系コントローラの設計

まず、エンジン系とエンジン系コントローラを直列接続した後のシステムが近似的に全域通過フィルタ、すなわち、ある帯域までは平坦な周波数特性をもつ低域通過フィルタとなるようにエンジン系コントローラを設計する。これにより、次に設計する触媒系コントローラは触媒系に対してのみ設計すればよいことになる。エンジン系コントローラの設計指針は、エンジンが有する固有周波数特性の改善、すなわち共振ピークの低減と定常ゲインの補正である。

このようなフィードフォワード補償では、特にモデル化 誤差に対する特性劣化が考えられるが、次に設計する触媒 系コントローラに GPC を導入することにより、このモデ ル化誤差は補償可能である⁽⁵⁾。

Step: 2 触媒系コントローラの設計

次に、同定した触媒系のモデルを用いて、フィードバック制御用の触媒系コントローラを設計する。触媒系コントローラの設計には GPC を導入する。GPC を導入する理由は、モデルの記述に伝達関数モデルを用いるためシステム同定法に適すること、多段先予測と後退ホライズン方策に基づき最適入力を算出するため触媒の特性変化に対応可能であること、設計パラメータの調整が直感的に行えるため現場調整が容易であることなどである。

GPC では、制御対象のモデルとして次式の CARIMA モデルを用いる。

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})x(k-1) + \frac{C(z^{-1})}{\Lambda}w(k) \cdot \dots (1)$$

ここで、y(k) は出力、x(k) は入力、w(k) は平均値が零の白色確率雑音を表す。また z^{-1} は 1 ステップ遅れ演算子を表し、 $\Delta=1-z^{-1}$ とする。さらに $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ は

以下で定義される z^{-1} の多項式である。

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_l z^{-l}$$

そして,(1)式の制御対象に対して,つぎの評価関数を最小にする制御入力を求める。

$$J = E \left[\sum_{j=H_w}^{H_p} [\hat{y}(k+j|k) - y^*(k+j|k)]^2 + \sum_{j=1}^{H_u} \lambda(j) [\Delta x(k+j-1|k)^2] \right] \dots (2)$$

ここで,E は期待値, $\hat{y}(k+j|k)$ は時刻 k における時刻 k+j での予測出力, y^* は目標値, Δx は入力変化の予測値を表す。なお, H_p は予測ホライズン, H_u は制御ホライズン, H_w はむだ時間を表す窓パラメータ, $\lambda(j)$ は入力の変化量に対する重みであり,これらが GPC の設計パラメータである。

なお、設計にあたってはエンジン系とエンジン系コントローラを無視したことによって生じるモデル化誤差や、触媒系の非線形特性によって生じるモデル化誤差に対応するため、独立モデル方策のを導入する。独立モデル方策では、最新の制御対象出力と最新のモデル出力の差を測定し、この差を参照軌道から減算するだけで、定常ゲインの誤差の影響を受けないようにすることができる。これにより、GPCに積分器を持たせることができ、ステップ状の指令に対して定常偏差なしの追従が可能となる。

4. 実験結果

〈4・1〉 実験装置の構成 提案する空燃比制御系設計法の有効性を検証するために、実車を用いた制御実験を行った。図6に実験のシステム構成を示す。本論文では、新しい空燃比制御手法の提案を第1の目的とし、以下のように制御条件の良い状態で実験を行った。エンジン回転数を3600 min⁻¹、吸気管圧を80.3 kPaの定常状態とした。

用いた触媒は、非線形性の弱い劣化触媒(6万 km 走行相当の 10 倍の劣化)である。また、サンプリング時間は 0.1 秒とした。

〈4・2〉 システム同定実験 同定実験によりえられたエンジン系および触媒系に対する入出力信号の一部を図7に示す。ここでエンジン系への入力信号 r(k) には $N(50,20^2)$ の正規性白色雑音を用いた。その出力信号 x(k) が触媒系への入力信号となるが,触媒系同定に対する PE 性条件 (0,0) は満たされている。したがって,一回の同定実験により両方のシステムのモデル化が可能である。

モデル化にあたっては、雑音モデルが含まれないように 入出力信号からトレンド成分を除去している。また、クロ スバリデーションよりエンジン系と触媒系のむだ時間は、と もに1とした。エンジン系と触媒系のモデル次数は、それ

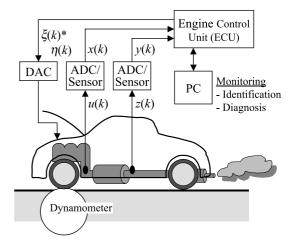


図6 空燃比制御システムの実験構成

Fig. 6. Experimental setup for the A/F control system.

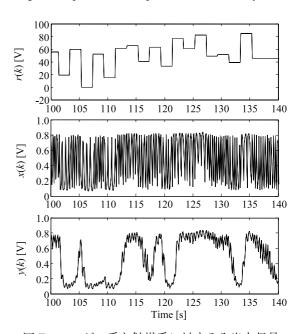


図 7 エンジン系と触媒系に対する入出力信号 Fig. 7. Input-output signal for the engine and catalyst control systems.

ぞれ補助変数法と最小二乗法により導出した 20 次の ARX モデルをスペクトル解析法と比較し,低次元化することによりどちらも 5 次とした。その結果,導出されたエンジン系 $P_{eng}(z^{-1})$ と触媒系 $P_{cat}(z^{-1})$ の伝達関数は,

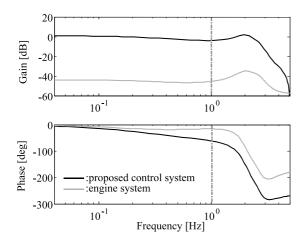


図8 同定されたエンジン系のボード線図

Fig. 8. Bode plot of the identified engine system.

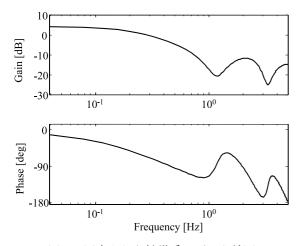


図9 同定された触媒系のボード線図

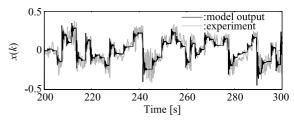
Fig. 9. Bode plot of the identified catalyst system.

各同定モデルの周波数特性を図8および図9に示す。また、同一入力信号に対する実験出力とモデル出力の比較を図10に示す。いずれのシステムも精度良い同定が達成できていることが確認できる。

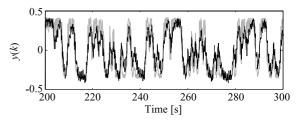
〈4・3〉 制御系設計 以下では、前述した 2 段階設計 手順に基づき、各制御系の設計を行う。設計目的は前述の通り、ヒューリスティックな設計法である従来手法に対し、システマティックに設計を行い、かつ良好な空燃比制御特性をえることである。制御帯域は従来法同様に触媒系に対して 1 Hz とした。したがって、本論文ではまずはじめに定常特性の改善・解析に着目した。

Step: 1 エンジン系コントローラの設計

同定したエンジン系モデルに対してエンジン系コントローラを設計する。設計においては、(3)式で示されるエンジン系モデルに対しエンジン系コントローラをフィードフォワード接続したときの特性が、近似的に全域通過フィルタとなるようにする。同定したエンジン系モデルの定常ゲインがー44.0 dB、バンド幅が3.15 Hz、ピークゲインはー34.9 dBでピーク周波数が2.03 Hzであった。したがって、定常ゲイン



(a) Output signal x(k) for engine system



(b) Output signal y(k) for catalyst system

図 10 エンジン系と触媒系に対するモデル出力と実験出力の比較

Fig. 10. Comparison of model output and experimental output for the engine and catalyst systems.

を $0\,dB$ とする "補正ゲイン" とピーク周波数を改善する "1 次の低域通過フィルタ" によりエンジン系コントローラを構成する。エンジン系の制御帯域幅を考慮しそのカットオフ周波数を $1\,Hz$ に,またエンジン系の定常ゲイン($-44.0\,dB$ xe)と制御帯域となる $1\,Hz$ でのゲイン($-45.5\,dB$)の平均から,フィルタゲインを $44.75\,dB$ とした。したがって,エンジン系コントローラ $C_{eng}(z^{-1})$ は,

$$C_{eng}(z^{-1}) = \frac{41.07 + 41.07z^{-1}}{1 - 0.5219z^{-1}}...$$
 (5)

となる。 $x^0(k)$ から x(k) までのボード線図を図 8 に重ねて示す。ピークゲインが抑制され,触媒系の制御帯域である 1 Hz に対し,2.5 Hz 程度まではゲイン 0 dB が確保でき,また,1 Hz 以下ではほぼ全域通過特性がえられていることが確認できる。

Step: 2 触媒系コントローラの設計

次に、同定した触媒系モデルに対して GPC に基づく触媒系コントローラを設計する。同定モデルは (4) 式の ARX モデルで与えられるため、(1) 式の GPC 設計用 CARIMA モデルにおいては、整合性を考え $C(z^{-1})=1-z^{-1}$ とした。GPC の設計パラメータである H_p 、 H_u は特に安定性、速応性により決定される。また H_w はむだ時間相当のサンプル数である。 λ は入力変化抑制因子である。これらの設計パラメータは、特に実装の容易性と制御性能を考慮し試行錯誤的に $H_p=5$, $H_u=1$, $H_w=1$, $\lambda=1$ と決定した。これにより図 11 に示される GPC に基づく触媒系制御器が導出される。同図において、コントローラ C_{GPC} は、

$$C_{GPC} = [1,0,\ldots,0][\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G} + \boldsymbol{\Lambda}]^{-1}\boldsymbol{G}^T$$
 · · · · · · · · · (6) で与えられる。ここで、

 $G = [0.188, 0.304, 0.421, 0.487, 0.638]^T$

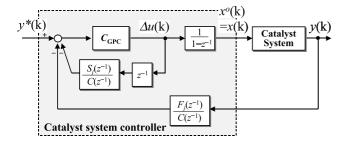


図 11 GPC による触媒制御系のブロック図 Fig. 11. Block diagram of the catalyst control system by GPC.

$\Lambda = 1$.

また, $F_j(z^{-1})$ と $S_j(z^{-1})$ は Diophantine 方程式を解くこと により、次式となった。

$$F_{j} = \begin{bmatrix} 1.11, & -1.60, 0.771, & -0.341, 0.0661, & -0.00852 \\ 0.748, & -1.01, 0.516, & -0.313, 0.0650, & -0.00947 \\ 0.573, & -0.681, 0.264, & -0.190, 0.0400, & -0.00638 \\ 0.530, & -0.653, 0.252, & -0.156, 0.0315, & -0.00488 \\ 0.466, & -0.596, 0.253, & -0.149, 0.0301, & -0.00451 \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} 1, z^{-1}, z^{-2}, z^{-3}, z^{-4}, z^{-5} \end{bmatrix}^{T} \\ S_{j} = \begin{bmatrix} 0.0943, 0.0813, & -0.0623, & 0.113 \\ 0.280, 0.0280, & 0.0438, & 0.126 \\ 0.379, & 0.105, & 0.0791, 0.0846 \\ 0.538, & 0.126, & 0.0489, 0.0648 \\ 0.713, 0.0920, & 0.0318, 0.0599 \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} 1, z^{-1}, z^{-2}, z^{-3} \end{bmatrix}^{T}. \end{bmatrix}$$

《4・4》 制御実験 実験に先立ち,前述したモデル化誤差に対する検討を行う。本設計では,エンジン系に対してエンジン系コントローラによりフィードフォワード補償を行い,近似的にその開ループ特性を全域通過フィルタと仮定し,触媒系の設計を行っている。このような開ループ補償では,実験におけるモデル化誤差は無視できない。ここでは,全域通過フィルタの定常ゲインに,触媒系モデルの定常ゲイン換算で±20%誤差が存在した場合のシミュレーション結果を示す。図12にステップ指令に対する入出力波形を示す。同図より,モデル化誤差が存在する場合にも,過渡特性の著しい劣化もなく目標値に追従していることが確認できる。

次に、実車により空燃比制御実験を行った。運転条件は同定実験と同様で、前述した通りである。時間応答に対する実験結果を図 13 に示す。図 13 には、目標値 $y^*(k) = 0.6$ V に対する従来法と提案法の出力結果を重ねて示す。従来法では、劣化触媒の特性変化に対応できておらず、そのため目標値である 0.6 V の近傍には収束していない。これに対して、リア F. B. コントローラに GPC を適用した新しい空燃比制御システムでは目標値近傍にほぼ収束していることが確認できる。また、このときの目標値 ± 0.1 V 範囲内への y(k) の

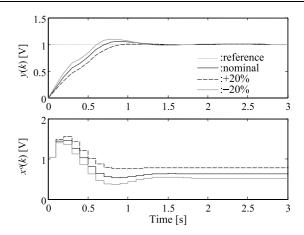


図 **12** モデル化誤差が存在する場合のステップ 応答波形

Fig. 12. Step responses for gain perturbation.

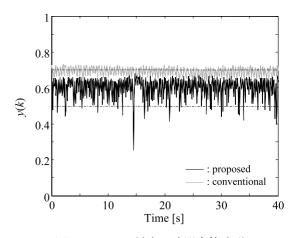


図 13 y(k) に対する時間応答波形 Fig. 13. Time responses of y(k).

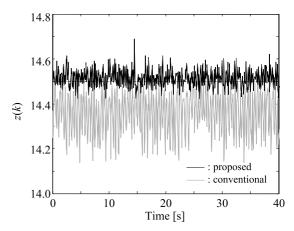


図 14 z(k) に対する時間応答波形 Fig. 14. Time responses of z(k).

出現率を比較すると、従来のシステムでは 53.8%であるのに対し、提案する新たな空燃比制御システムでは 93.1%と大幅に制御性能が向上している。図 14 に観測用に設置した線形空燃比センサの出力信号 z(k) を示すが、y(k) を 0.6 V 近傍に収束させることができたことにより、z(k) の値も理

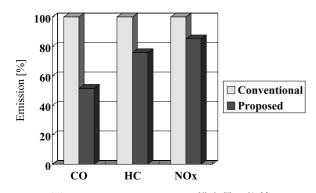


図 15 CO, HC, NO_x の排出量の比較

Fig. 15. Comparison of the emission of CO, HC and NO_X .

論空燃比(14.5)近傍に収束していることが確認できる。

また、図 15 に排出ガスの成分分析結果を示す。従来法 と比較し、提案法では CO, HC, NO_x をそれぞれ 48.5%, 24.3%, 14.9%低減可能となった。

5. おわりに

本論文では、排出ガス浄化性能を向上させるため、2段階 設計に基づく新たな空燃比制御システムを提案した。ここ では,空燃比制御システムをエンジン系と触媒系に分離し, それぞれに対してシステム同定法によるモデル化を行った。 また,コントローラにはフィードフォワード補償とGPCを 導入することによって空燃比制御システムを構築した。提 案設計法は、ヒューリスティックな従来法に比べ触媒の劣 化に対しても適応性が高く、2段階の設計手順により構成 されるため設計指針が明確で, 実用化に対しても見通しが よい。提案するシステムを用いて定常状態に対する実機実 験を行い、排出ガスの浄化性能が向上することを定量的に

今回は比較的制御条件の良い定常状態で実験を行ったが, 今後の課題は、導出したコントローラを適応化させること により、非線形性の強い新品触媒、またエンジン回転数が 変化する過渡状態でも定常状態と同等の制御性能を保証す ることである。

(平成18年11月20日受付,平成19年9月4日再受付)

文 献

- (1) H.S. Gandhi, A.G. Piken, M. Shelef, and R.G. Delosh: "Laboratory Evaluation of Three-way Catalysts", SAE Paper, No.760201 (1976)
- (2) G.F. Franklin, J.D. Powell, and A. Emami-Naeini: "Feedback Control of Dynamic Systems: 4th Ed.", Prentice Hall (2002)
- (3) Y. Okada, H. Okuda, S. Adachi, S. Niwa, M. Kajitani, and S. Hashimoto: "Modeling and Deterioration Diagnosis of Catalyst for Automobile Exhaust Gas by On-Line Identification Method With Variable Forgetting Factor", IEEJ Trans. IA, Vol.126, No.12, pp.1637–1644 (2006-12) (in Japanese) 岡田康志‧奥田裕之‧足立修一‧丹羽伸二‧梶谷満信‧橋本誠司:「可 変忘却要素を用いたオンライン同定法による自動車排出ガス用触媒 のモデリングと劣化診断」、電学論 D, 126, 12, pp.1637-1644 (2006-12)
- (4) H. Yakabe: "A/F Control of a Gas Engine Using Response Characteristics of Three-Way Catalysts under Dynamic Operation", T. of JSME, Vol.57, No.539, pp.268-275 (1991) (in Japanese)

- 矢加部久孝: 「三元触媒の動特性を利用したガスエンジン空燃比制 御の研究」,日本機械学会論文集(B編), **57**, 539, pp.268–275 (1991)
- (5) Jan M. Maciejowski 著, 足立修一・管野政明訳: 「モデル予測制御—制 約のもとでの最適制御--」,東京電機大学出版局 (2005)
- (6) 足立修一:「MATLAB による制御のためのシステム同定」,東京電機 大学出版局 (1996)
- (7) D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.S. Tuffs: "Generalized Predictive Control", Automatica, Vol.23, No.2, pp.137-160 (1987)
- (8) D.W. Clarke and C. Mohtadi: "Properties of Generalized Predictive Control", Automatica, Vol.25, No.6, pp.859-875 (1989)
- H. Maki, S. Akazaki, Y. Hasegawa, I. Komoriya, Y. Nishimura, and T. Hirota: "Real Time Engine Control Using STR in Feedback System", SAE Paper, No.950007 (1995)
- (10) G. Fiengo, L. Glielmo, and S. Santini: "On-board Diagnosis for Three-Way Catalytic Converters", Int. J. Robust Nonlinear Control, Vol.11, pp.1073-1094 (2001)
- (11) G.F. Trecate, M. Muselli, D. Liberati, and M. Morari: "A Clustering Technique for the Identification of Piecewise Affine Systems", Automatica, Vol.39, No.2, pp.205-217 (2003)

橋 本 誠 司 (正員) 1971年12月19日生。1999年宇都宮



大学大学院工学研究科博士課程修了。1996年~ 1999 年日本学術振興会特別研究員。2000 年より 小山工業高等専門学校機械工学科助手, 2002 年よ り群馬大学工学部助手, 2005 年同助教授, 現在に 至る。博士 (工学)。主にシステム同定・制御理 論の産業分野への応用に関する研究に従事。2001 年, 2003 年 IEEE IES Best Presentation Award 受

賞。計測自動制御学会, IEEE 会員。



奥 田 裕 之 (非会員) 1983 年 2 月 15 生。2007 年宇都宮大 学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年4月 本田技研工業(株)入社,現在に至る。在学中, 主として制御理論の自動車への応用に関する研究 に従事。

岡 田 康 志 (非会員) 1980年4月23日生。2005年宇都宮



大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月(株)日立製作所入社,現在に至る。在学中, 主として制御理論の自動車への応用に関する研究 に従事。



足 立 修 - (正員) 1957年10月19日生。1986年慶應義塾 大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。 同年(株)東芝入社,総合研究所に勤務。1990年 宇都宮大学工学部電気電子工学科助教授, 2002 年 同教授, 2003 年から 2004 年ケンブリッジ大学客 員研究員。2006年慶應義塾大学理工学部物理情 報工学科教授、現在に至る。工学博士。システム 同定理論・制御理論と, それらの産業応用に関す

る研究に従事。1993 年 SICE 創立 30 周年記念著述賞 1 等受賞。1998 年日本機械学会賞(論文)受賞。計測自動制御学会,日本機械学会, IEEE などの会員。

丹 羽 伸 二 (非会員) 1971 年 4 月 25 日生。1994 年三重大 学工学部電子工学科卒業。同年ダイハツ工業(株) 入社, 現在に至る。エンジン制御の研究・開発に 従事。自動車技術会会員。



梶 谷 満 信 (非会員) 1953年3月20日生。1975年大阪市 立大学工学部機械工学科卒業。同年(株)日産自 動車入社,機関設計部に勤務。1884年ダイハツ工 業入社, エンジン部に勤務。2002 年千葉大学自然 科学研究科人工システム科学専攻博士課程修了。 現在に至る。工学博士。主として環境対応エンジ ンおよびシステムの研究・開発に従事。計測自動 制御学会, 自動車技術会会員。