

適応制御を用いた電子制御スロットルの開発

Development of Electronic Throttle Control Utilizing Adaptive Control Method

橋 本 英 史*
Eiji HASHIMOTO
安 井 裕 司*
Yuji YASUI

石 黒 哲 矢*
Tetsuya ISHIGURO
赤 崎 修 介*
Shusuke AKAZAKI

要 旨

近年、電子制御スロットルはアイドル時の高精度な吸入空気量制御や排気エミッション低減を実現するデバイスとして注目されている。このため、その動特性の個体ばらつきや経年変化に対する制御性能や制御分解能のロバスト性が要求されるようになってきた。ところが、これまで多く用いられてきた PID 制御のような古典制御による制御方式は、これらの動特性のばらつきや変化、制御系におけるさまざまな外乱を観測する機能を有しないため、ロバスト性と制御性能の両立が困難になっていた。そこで、ロバスト性と制御性能を両立するため、本研究では、電子制御スロットルの動特性変化やそれに関わる外乱を逐次的に推定する同定器と、スライディングモードコントローラを用いた適応制御を設計し、これを電子制御スロットルの駆動制御へ適用した。その結果、高いロバスト性と制御性能を有する高精度かつ高応答な電子制御スロットルを実現した。

ABSTRACT

Electronic throttle control has been focused in recent year as a measure to provide high accuracy for idling air control and improve emissions. For this reason, it is necessary to achieve greater robustness in control performance, to cope with variations in individual units and degradation of parts over time. Up to the present, it has been difficult for PID control systems to recognize unspecified disturbances, and this has been an impediment to the achievement of a balance between robustness and responsiveness. To perform robustness, an adaptive control system has been constructed which utilizes sliding mode control and is provided with an identifier to perform sequential calculations. This technology has realized previously unavailable levels of robustness and highly accurate and responsive electronic throttle control.

1. まえがき

近年の電子制御スロットルは、車両のトラクション制御や、オートマチックトランスミッションとの協調制御など、車両の安全性や乗り心地の向上といった目的で用いられてきた。しかし、燃費性能や排気エミッションの低減など環境への対応が求められ、例えば、直噴エンジン車やハイブリッド車、超低エミッション車などの新しいエンジンの制御システムにおいて広く採用されるようになってきている⁽¹⁾。

こうした数多くの制御システムと密接に、あるいは複雑に絡み合った電子制御スロットルは、スロットル開度センサや、駆動ギヤ、駆動用 DC モータといった構成部品のばらつきによる動特性のばらつきや、温度など使用環境の変化、経年劣化等といった動特性変化のために、制御系の安定

性を維持することが困難であった。このため、制御性能を落とすことによって制御系の安定性を確保していた。

例えば、スロットル開度の駆動制御として PID 制御を用いた場合は、スロットル開度に応じて変化する動特性変化や外乱に対しては、スロットル開度に対してフィードバックゲインをスケジュールすることによって対応することが可能である。しかしながら、構成部品のばらつきや経年劣化によって生じる動特性のばらつきや変化が生じると、PID 制御では、これらを観測することが困難なため、フィードバックゲインを適切な値に変更することができず、スロットル開度の目標値に対する追従性と安定性の低下につながっていた。これを解決する手法の一つとして、動特性のばらつきや変化、外乱を逐次的に推定を行うオンボード同定器を用いた適応制御⁽²⁾の適用が考えられる。

*栃木研究所

ゆえに、本研究では、スロットル開度の急変等によって生じる動特性変化にも適応可能な新たな適応制御を電子制御スロットルへ適用し、高いロバスト性と制御性能を実現したので、その内容について報告する。

2. システムコンセプト

Fig. 1 に示す通り、本技術は性能、信頼性、スマートさを高次元でバランスさせた電子制御スロットルシステムを目標としている。

性能面では、運転する楽しさをより強調でき、安全、環境における要求性能を満たすことのできる応答性と制御分解能の実現を目指した。

信頼性においては、機械式スロットルとアイドルエアコントロールバルブを組み合わせたシステムと同等以上の耐久性を有したハードウェアを設計した。また、適応制御を用いたスロットル開度制御を行うことにより、ハードウェアの各特性のばらつきと経年変化を補償し、さらに、ハードウェアが故障状態に至ったような特性変化が生じた場合にお

いても制御系の安定性を維持することによって、機械式スロットルと同等の信頼性を実現した。

スマートさとして、適応制御の適用による応答性と信頼性向上によって、モータの最大トルクの低減や故障時にモータをスロットルから切り離すためのクラッチ機構を用いない事で小型軽量化とコスト低減を実現している。

2.1. システムレイアウト

Fig. 2 に電子制御スロットルが適用されているエンジンのスロットルボディ、アクセルペダル、及び駆動ドライバの車載レイアウトを示す。

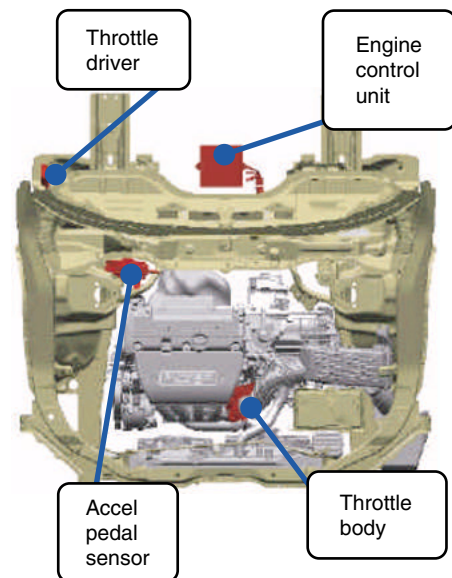


Fig. 2 Layout of electronic throttle control system

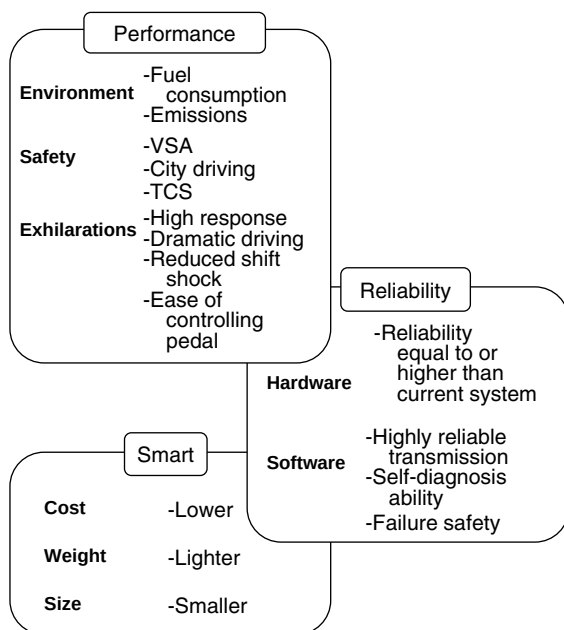


Fig. 1 Electronic throttle control system concept

Fig. 3 のように本システムは、エンジンコントロールユニットと電子制御スロットルの間がマスタスレーブ方式で接続された機能分散型システムとなっている。これにより、電子制御スロットル用ドライバが、エンジンコントロールユニットと分離しているため、ハードウェアの変更をすることなく多機種のエンジンコントロールユニットへ組み合わせられるようになっている。

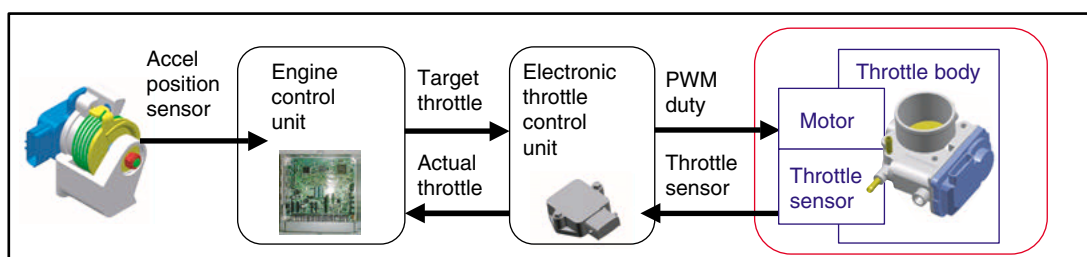


Fig. 3 Electronic throttle control system outline

2.2. デフォルト開度

あるデバイスが故障した場合、通常の走行は実現できないながらも、サービス工場への車両の移動等ができるようにするリンプホームという考え方がある。

この考えを電子制御スロットルシステムにおいて実現するために、Fig. 4のようにモータに駆動力が発生していない場合、ばね力のみによって、スロットル開度が一定開度(以下、デフォルト開度)へ保持されるようにしている。このため、デフォルト開度の近傍では Fig. 5 のようにスロットルバルブにかかるばね力の方向が反転する。これによって、スロットル開度は、モータの駆動力に対して非線形な挙動を示すため、デフォルト開度近傍での制御性能の低下の原因となっている。

3. 適応制御アルゴリズム

エンジン始動時や低大気温時など、電源電圧が低くなる場合や Fig. 4 と Fig. 5 に示すようなデフォルト開度近傍でのスプリング張力が一定でないスロットル開度位置では、

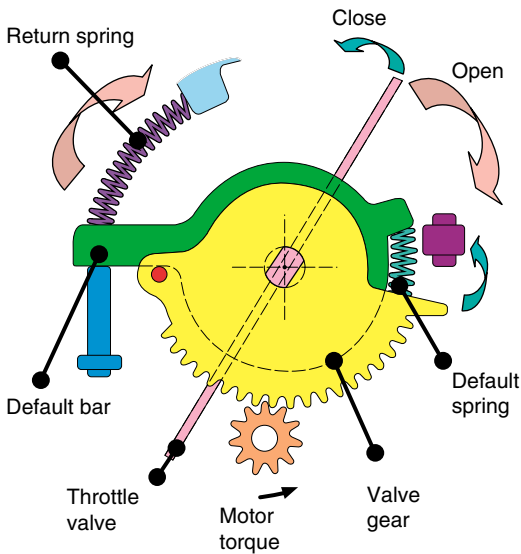


Fig. 4 Outline of default mechanism for electronic throttle

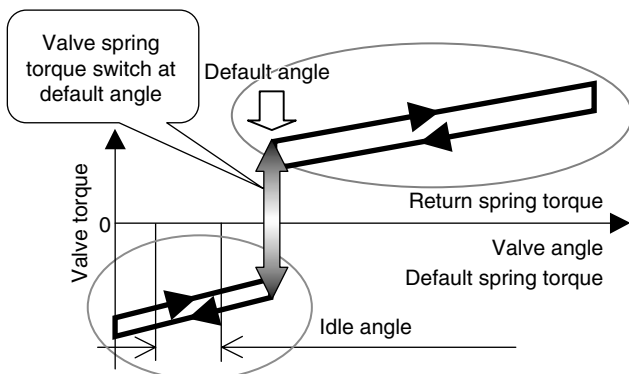


Fig. 5 Valve spring torque characteristic

モータ駆動制御のフィードバックゲインをハイゲイン化する必要がある。しかしながら、この設定が不適切である場合、スロットル開度が振動的な挙動を示すことがある。

ゆえに、PID制御によってモータ駆動制御を行う場合は、フィードバックゲインを予め低めに設定することによって、制御性能を抑えて安定性を確保しなくてはならなかった。

また、車両のスロットルには、エンジンオイルや浮遊カーボン、EGRなどの多様な異物が通過するため、それらの異物がシャフトやベアリング、バルブへ付着し、構成部品の摩擦も生じるため、予測困難なフリクション変化、つまり、動特性変化が起こる。

ところが、PID制御では、この観測できない動特性変化に対してフィードバックゲインを予め設定することができないことから、さらなる制御性能の低下を生じる⁽³⁾。その対応手法として、外乱オブザーバを加えたPID制御⁽⁴⁾やI-PD制御システムを構築して対応しているものがある⁽⁵⁾。しかしながら、これらも動特性変化の変化量が大きくなると制御性能の低下を生じる。

そこで、本研究ではスロットル開度に応じた急速な動特性変化を補償するモデルパラメータスケジューラ、動特性の経年変化やばらつきに対して適応するためのオンボード同定器、スロットル開度も目標値への応答性やデフォルト開度近傍での高い制御性能を実現するためのスライディングモードコントローラを組み合わせた新たな適応制御を構築し、モータ駆動制御に適用した(Fig. 6)。これにより、外乱オブザーバを備えたPID制御等の制御性能が低下するような動特性変化が生じた場合にも、最適な制御パラメータを逐次的に同定し、それに基づいて適切なフィードバックゲインを算出するため、電子制御スロットルの制御性能を高く維持しつつ、動特性変化に対する安定性を確保することができた。以下に、この制御アルゴリズムの詳細を述べる。

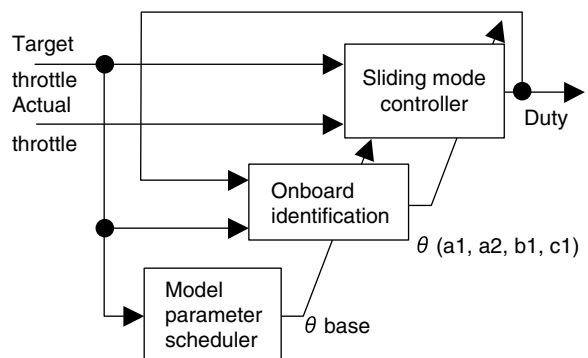


Fig. 6 Block diagram of electronic throttle control

3.1. モデル化

電子制御スロットルの動特性とその変化、それに関わる外乱の情報を数値化し、それをコントローラのフィードバックゲインの算出に用いるため、電子制御スロットルを、

式(1)と式(2)に示したARXモデル(自己回帰モデル)を用いてモデル化した。このモデルでは、モデルパラメータとして、制御対象の出力 DTH に関わる a_1 , a_2 , 入力 DUT に関わる b_1 , 外乱やモデル化誤差が反映される c_1 が設定されており、これらのモデルパラメータは後述するオンボード同定器によって逐次的に算出される。

$$DTH(n+1)=a_1 DTH(n)+a_2 DTH(n-1) + b_1 'DUT(n-d)*Vbat+c_1 ' \quad (1)$$

$$DTH(n)=TH(n) - TH_DEF \quad (2)$$

DTH(n) : スロットル開度とデフォルト位置との偏差量

TH(n) : スロットル開度

TH_DEF : スロットルデフォルト開度

DUT : PWM 駆動デューティ

Vbat : 電源電圧

d : むだ時間

a_1, a_2, b_1, c_1 : モデルパラメータ

Fig. 7 は、このモデルと制御対象である電子制御スロットルの周波数特性を比較した図である。図から分かるように、モデルは制御対象の周波数特性を表現できている。このことから、このモデルのモデルパラメータに基づいて、フィードバックゲインを逐次的に算出すれば、制御対象の動特性変化や外乱に応じた適切な制御入力を決定できることが分かる。

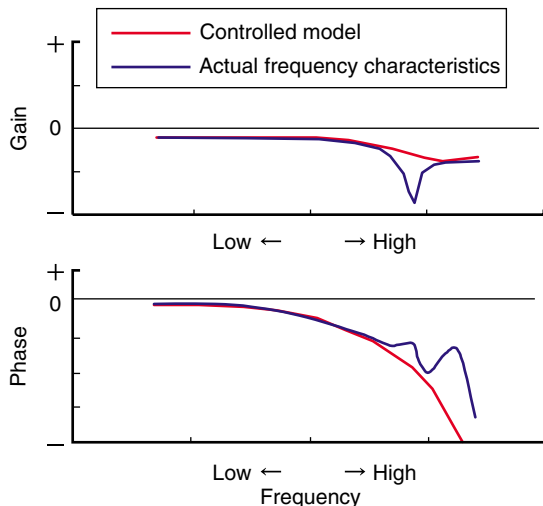


Fig. 7 Frequency characteristics

3.2. オンボード同定器

オンボード同定器は、式(3)から式(7)に示した同定アルゴリズムを用いて上述のモデルパラメータの同定を行う。このアルゴリズムは、後述するパラメータスケジューラによって算出される基準モデルパラメータにモデルの出力

DTHHAT と制御対象の出力 DTH の誤差 eid に基づいて算出されたモデルパラメータの更新成分を加算することにより、モデルパラメータを算出する。このとき、基準モデルパラメータは、制御対象の動特性変化と相関のあるスロットル開度に応じて設定される。これによって、一般的な適応制御では、制御対象の動特性が急速に変化する場合、すなわち、スロットル開度が急速に変化した場合に、モデルパラメータの同定に遅れが発生するという課題があったが⁽³⁾、これが解決される。

さらに、パラメータ c_1 は制御対象の非線形特性と外乱を意味するモデルパラメータであり、これが定常的な外乱と定常偏差を吸収する。これにより電源電圧変動や経年劣化等による制御対象の動特性変化に対する高いロバスト性を確保している。

$$DTHHAT(n+1)=a_1 DTH(n)+a_2 DTH(n-1)+ b_1 DUT(n-d) * Vbat+c_1 \quad (3)$$

$$\theta(n) = \theta \text{ base}(n)+d \theta(n) \quad (4)$$

$$d \theta(n) =d \theta(n)+ KQ(n) * eid(n) \quad (5)$$

$$eid(n) =DTH(n) - DTHHAT(n) \quad (6)$$

$$KQ(n) =P \zeta(n)/1 + \zeta^T(n) P \zeta(n) \quad (7)$$

$\theta \text{ base}$: モデルパラメータスケジューラにより、スロットル開度に応じて決定されるモデルパラメータ基準値

$$\zeta(k) : [DTH(n-1) DTH(n-2) DUT(n-1) 1]^T$$

a_1, a_2, b_1, c_1 : モデルパラメータ同定値

3.3. モデルパラメータスケジューラ

モデルパラメータスケジューラは、制御対象の出力DTHに応じて基準モデルパラメータ $a_1\text{base}$, $a_2\text{base}$, $b_1\text{base}$ を算出する。この基準モデルパラメータは、各 DTH 近傍での電子制御スロットルの動特性を表すモデルパラメータ a_1 , a_2 , b_1 の値として設定されている。このため、オンボード同定器は、電子制御スロットルの動特性にばらつきや経年変化が生じた場合には、その動特性が変化によって生じた基準モデルパラメータとモデルパラメータの誤差のみを修正を行う。よって、各 DTH におけるパラメータの修正量を小さくできるため、モデルパラメータの同定遅れは最小となる

3.4. スライディングモードコントローラ

スライディングモードコントローラ⁽⁶⁾は、オンボード同定器によって同定されたモデルパラメータを用いて、制御対象への入力 DUT を算出する。ここで、 n をコントローラの制御時刻とすると、Fig. 8に示すようにスロットル開度の目標値と実開度の偏差の今回値 $e(n)$ と前回値 $e(n-1)$ をそれぞれ軸に持つ位相平面上に、切換直線と呼ばれる比例関数 $\sigma(n)=0$ が定義される。このとき、このコントローラは、 $e(n)$ と $e(n-1)$ の組み合わせ(以下、状態量)を切換直線上に拘

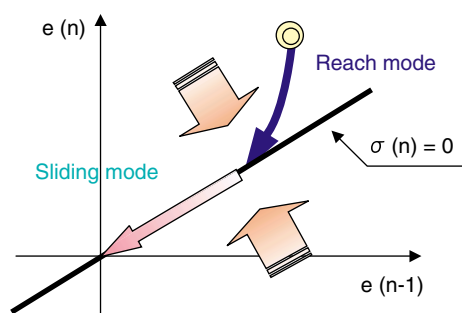


Fig. 8 Sliding mode control outline

束するように制御を行い、状態量を外乱や制御対象のモデル化誤差の影響を受けずに位相平面の原点に収束させる。また、制御入力 DUT は、以下に示した三つの制御入力の総和として算出される。

- 等価制御入力 $U_{eq}(n)$: 状態量を切換直線上に拘束するための入力。
- 到達則入力 $U_{rch}(n)$: 状態量を切換直線へ載せるための入力。
- ダンピング入力 $U_{dump}(n)$: スロットル開度の目標値に対するオーバーシュートの防止

上記オンボード同定器によるモデルパラメータの演算とこのスライディングモードの組み合わせにより、速応性、高い制御精度、モデル化誤差、ギアのバックラッシュ、そして電源電圧変化に対してのロバスト性を実現した。

4. 単体試験機によるテスト結果

4.1. 電源電圧変動時応答ばらつき

電子制御スロットルの通常制御域である電源電圧 10.5V ~ 16V の条件において、スロットル目標値をステップ状としたときの応答時間のばらつきを PID 制御と比較し、その結果を Fig. 9 に示した。

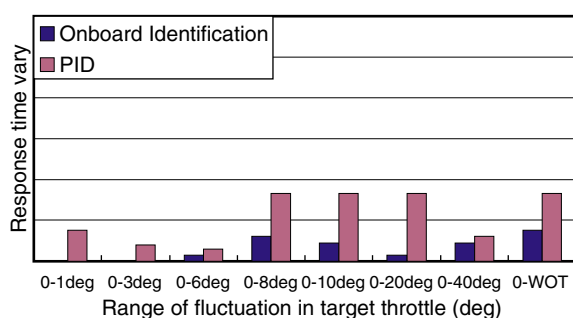


Fig. 9 PID and onboard identification method response time Max – Min varies between 10.5V – 16V input voltages.

図より、全ての目標値変化量において、適応制御を用いた場合の応答時間のばらつきは PID 制御に比べて小さくなっていることが分かる。これにより、大気温の変化やバッテリーの劣化等による電源電圧変動に対する制御性能の安定性が確認された。

4.2. 電圧変動時応答性

Fig. 10 は、スロットル目標値をステップ状としたときの応答時間の PID 制御との比較結果である。図から分かるように、振動的挙動の発生を懸念してフィードバックゲインを低めている PID 制御よりも、適応制御の応答時間の方が短くなっていることが分かる。

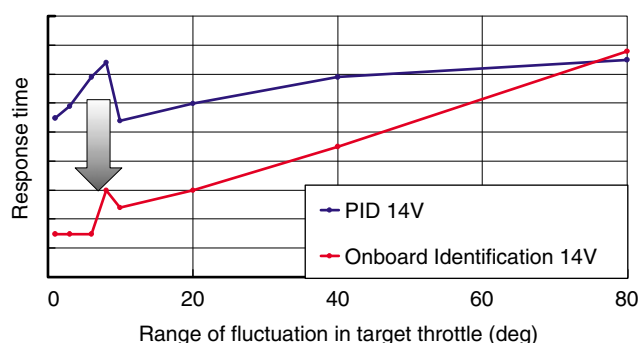


Fig. 10 Difference in response time for PID and onboard identification method.

4.3. スロットル駆動系物理的要素のばらつきによる応答性変化

Fig. 11 と Fig. 12 に、機構的なバラツキをもつ四種の電子制御スロットルを用いたときのステップ状目標値に対する応答時間のばらつきと応答波形を示す。図から分かるように、フリクションの変動が起きた場合でも、適応制御の応答時間の変動量は PID 制御よりも小さく、応答挙動の変化も小さい。

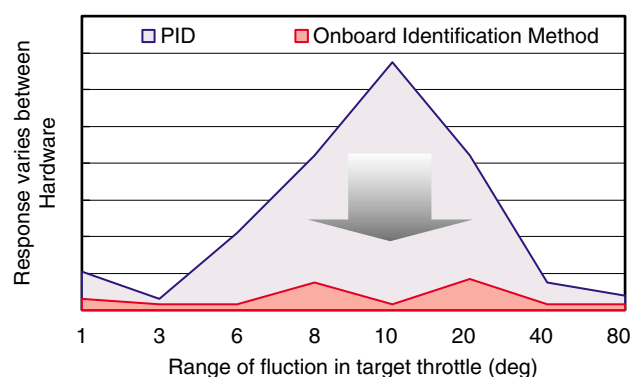


Fig. 11 Difference in response time for PID and onboard identification system with different throttle body characteristics.

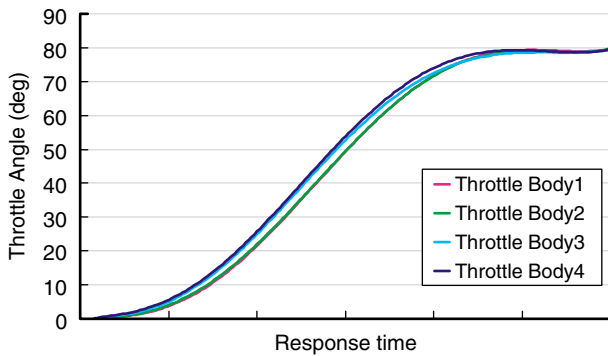


Fig. 12 Response chart graph of different throttle body characteristics.

- (3) 寺尾, 金井: ロバスト適応制御入門, 東京, オーム社, 1989, p.9-11
- (4) 國府田, 中村, 松山: 電子制御スロットルロバストシステム開発, 自動車技術, Vol.52, No.9, p.37-42 (1998)
- (5) 小郷, 美多: システム制御理論入門, 東京, 実教出版, 1979, p.121-132
- (6) 野波, 田: スライディングモード技術, 東京, コロナ社, 1994, p.41-54

5. 車両によるテスト結果

高速走行, 低速走行, あるいは通常走行時や渋滞路を想定した試験車両でのテストコースによる実走テストにおいて, スロットル開度の目標開度 $\pm 0.2\text{deg}$ 内に頻度が80%以上に確保されていることが確認され, 車両制御のデバイスとして十分な性能を有していることが分かった。また, アイドル制御性能は, 従来のアイドルエアコントロールバルブデバイスによるエンジン回転数制御性能と同等以上であった。

6. まとめ

オンボード同定器, パラメータスケジューラ, スライディングモードコントローラからなる適応制御を電子制御スロットルシステムに適用することにより, 以下の効果を得た。

- (1) PID 制御において難しかった, 高い応答性とロバスト性の両立を実現した。
- (2) 環境変化や経年劣化, 部品のばらつきに対してだけでなく, 電源電圧変動などの外乱に対しても安定した制御性能を確保することができた。
- (3) 実機を用いた確認試験の結果, アイドル制御や走行時のスロットル制御において, スロットル開度の目標開度 $\pm 0.2\text{deg}$ 内頻度を80%以上確保した。

参考文献

- (1) McKay, D., et.al.: Delphi Electronic Throttle Control Systems for Model Year 2000; Driver Features, System Security, and OEM Benefits. ETC for the Mass Market, SAE 2000-01-0556 (2000)
- (2) 安井, 赤崎, 上野, 岩城: 触媒後 O_2 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, Honda R&D Technical Review Vol.13 No.2, p.59-66 (2001)

■ 著 者 ■



橋本 英史



石黒 哲矢



安井 裕司



赤崎 修介