

連続可変動弁機構付ガソリンエンジンのための 高精度アイドル制御

Accurate Idle Speed Control for Gasoline Engines with Continuously Variable Valve Actuation

東 谷 幸 祐*

Kosuke HIGASHITANI

安 井 裕 司*

Yuji YASUI

佐 藤 正 浩*

Masahiro SATOH

要 旨

連続可変動弁機構付ガソリンエンジンは、スロットルがなく、バルブで吸入空気量を制御しているため、ポンピングロスを軽減できる。一方、バルブリフトに対する吸入空気量の感度が高く、従来のアイドル制御では、アイドル回転数を高精度に制御することは困難である。

そこで本研究では、新しいアイドル回転数制御を提案する。この新しいアイドル回転数制御の特徴は、それぞれ2自由度スライディングモードアルゴリズムを用いた吸入空気量制御と点火時期制御を協調させている点である。大きな偏差には空気量制御で対応し、小さな偏差には点火時期制御で対応することにより、アイドル回転数低下に必要とする微小なエンジン回転数の制御を実現している。

その結果、連続可変動弁機構付ガソリンエンジンにおいてアイドル回転数低下を実現し、アイドル回転数の安定性を向上させることができた。

ABSTRACT

A gasoline engine with continuously variable valve actuation uses the valves instead of the throttle to control the suction air amount, thus reducing pumping loss. However, just a slight change in valve lift causes the suction air amount to vary greatly, which makes it difficult to accurately control idle speed when using conventional idle speed control.

Accordingly, in this research a new method of controlling the idle speed was proposed. This new idle speed control features coordination between suction air flow control and ignition timing control, each of which uses a two-degree-of-freedom sliding mode algorithm. Large deviations are corrected by air flow control, while small deviations are corrected by ignition timing control, thus realizing fine control of engine speed, which is necessary for reducing the idle speed.

As a result, it was possible to reduce the idle speed of a gasoline engine equipped with a continuously variable valve actuation, as well as increase the idle speed stability.

1. まえがき

近年、地球温暖化問題への関心が高まり、CO₂の削減が社会的に要請されている。それにともない、自動車においても燃費向上の重要性が増している。そこで、燃費向上技術の一つとして、連続可変動弁機構付ガソリンエンジンが注目されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

連続可変動弁機構付ガソリンエンジンは、スロットルがなく、バルブで吸入空気量を制御している。これにより、ポンピングロスを軽減している。その反面、従来のスロットル付ガソリンエンジンと比べ、バルブリフト量に対する吸入空気量の感度が高く、アイドル制御のような、吸入空気量に

よる高精度なエンジン回転数制御の実現が困難である。

従来のアイドル制御は、点火時期と吸入空気量による独立したPI制御で構成されている。そのため、点火時期制御と吸入空気量制御が干渉し目標値変化に対してオーバーシュートを生じてしまう。

この問題を解決するために、従来のアイドル制御では、下方への目標値変化が生じた場合やエンジン回転数の下降中は、フィードバックを停止し、あらかじめ設定したオープン処理を施す手法が採用されている。しかしながら、このような手法は、経年変化等に対するロバスト性(安定性)に課題がある。

故に、目標値変化が生じた場合や、何らかの原因で偏差

*四輪開発センター

が生じ、その後、目標アイドル回転数に復帰する場合に、オーバシュートを生じることのない、クローズドループアイドル制御を構築する必要がある。

一方、近年、ロバスト制御の一つであるスライディングモード制御⁽⁴⁾のエンジン⁽⁵⁾、⁽⁶⁾やデバイス⁽⁷⁾への適用がおこなわれている。

そこで、本研究では、連続可変動弁機構付ガソリンエンジンのアイドル回転数の低下を実現するために、二つのスライディングモード制御を協調させた新しいアイドル制御を設計した。

2. 2入力協調型アイドル制御

連続可変動弁機構付ガソリンエンジンのアイドル回転数低下を実現するために、2入力協調型アイドル制御 (Accurately Cooperative Two-input Idle speed Control : ACTIC) を考案した。

ACTICでは、高精度にエンジン回転数を制御するために、吸入空気量制御および点火時期制御に2自由度スライディングモード制御を適用した。さらに、吸入空気量制御と点火時期制御の干渉を防ぐため、吸入空気量と点火時期の協調制御を実現している。以下に、2自由度スライディングモード制御および協調制御の概要を示す。

2.1. 2自由度スライディングモード制御

2自由度スライディングモード制御は、目標値応答速度と偏差収束速度を個別に指定できるスライディングモード制御である。目標値応答速度を目標値フィルタで指定し、偏差収束速度を切替関数によって指定している。

エンジン回転数を N_E 、目標アイドル回転数を N_r とした時、スライディングモード制御で用いる目標値 N_f は、式(1)に示す目標値フィルタにより算出される。

$$N_f(k) = -Pole_f N_f(k-1) + (1 + Pole_f) N_r(k) \quad (1)$$

目標値フィルタのフィルタ係数 $Pole_f$ により、 N_f の挙動を指定することができる。よって、この N_f を制御目標値にすることにより、スライディングモード制御の目標値応答挙動も指定することができる。

スライディングモード制御では、目標値 $N_f(k-1)$ とエンジン回転数 $N_E(k)$ の偏差 $E_{NE}(k)$ を式(2)で求め、式(3)に示す切替関数 $\sigma_{NE}(k)$ を定義する。

$$E_{NE}(k) = N_E(k) - N_f(k-1) \quad (2)$$

$$\sigma_{NE}(k) = E_{NE}(k) + Pole E_{NE}(k-1) \quad (3)$$

$E_{NE}(k)$ と $E_{NE}(k-1)$ をそれぞれ座標軸とする位相平面をFig. 1に示す。この位相平面上で切替関数 σ_{NE} をゼロとするような直線を切換直線 (Fig. 1 の Switching line) と呼ぶ。

スライディングモード制御は、 $E_{NE}(k)$ および $E_{NE}(k-1)$ の

組み合わせ (以下、偏差状態量と呼ぶ) を、切換直線上に拘束するように制御し、切換直線に沿って偏差状態量を位相平面の原点、すなわち偏差 $E_{NE}(k)$ をゼロに収束させる。ここで切換直線は、 $E_{NE}(k)$ と $E_{NE}(k-1)$ の関係から、式(4)で表される。また、 $Pole$ は式(5)の範囲で設定される。

$$E_{NE}(k) = -Pole E_{NE}(k-1) \quad (4)$$

$$-1 < Pole < 0 \quad (5)$$

よって、偏差収束挙動速度は、切換直線の傾きである $Pole$ によって指定することができる。

2.2. 協調制御

ACTICでは、吸入空気量制御と点火時期制御を協調させるために、目標値応答速度を指定する目標値フィルタと偏差収束挙動速度を規定する切換関数を吸入空気量制御と点火時期制御で共通としている。さらに、点火時期制御と吸入空気量制御の以下の特徴を利用して、協調制御を構築した。

点火時期制御

- ・無駄時間がなく応答遅れが小さい。
- ・ N_E の変更幅が小さい。
- ・ N_E 制御分解能が高い。

吸入空気量制御

- ・無駄時間を有し、応答遅れが大きい。
- ・ N_E の変更幅が大きい。
- ・ N_E 制御分解能が低い。

この特徴を利用し以下のように、主導で動作する制御を切り替えることによって、二つの制御を協調させる。

- ・大きな目標変化への追従／偏差の抑制
⇒ 吸入空気量制御主導
- ・小さい目標値変化への追従／偏差の抑制
⇒ 点火時期制御主導

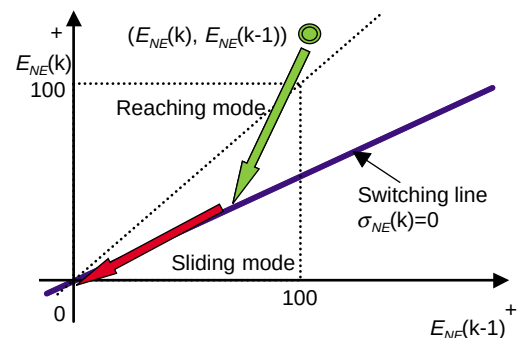


Fig. 1 Sliding mode control

3. 制御設計

Fig. 2 は, ACTIC のシステム概要図である. 以下に点火時期制御, 吸入空気量制御, 協調制御の詳細を示す.

3.1. 点火時期制御

点火時期制御は, 到達則入力 $U_{rch_ig}(k)$ と適応則入力 $U_{adp_ig}(k)$ からなるスライディングモードコントローラで構成されている. 適応則入力 $U_{adp_ig}(k)$ に忘却係数 λ を導入することで, 目標値収束後に基準アイドル点火時期へ徐々に戻るようになっている. これにより, 点火時期が過度に遅角した状態を維持する事を回避し, 燃費低下を抑制している. 以下に演算式を示す.

$$U_{sl_ig}(k) = U_{rch_ig}(k) + U_{adp_ig}(k) \quad (6)$$

$$U_{rch_ig}(k) = K_{rch_ig} \sigma_{NE}(k) \quad (7)$$

$$U_{adp_ig}(k) = K_{adp_ig} \sigma_{NE}(k) + \lambda U_{adp_ig}(k-1) \quad (8)$$

K_{rch_ig}, K_{adp_ig} : フィードバックゲイン

λ : 忘却係数 ($0 < \lambda < 1$)

3.2. 吸入空気量制御

吸入空気量制御は, 入出力関係を表す制御対象モデルを基に算出されるスライディングモードコントローラと, 入出力関係を表す制御対象モデルを修正する適応外乱オブザーバから構成されている. 以下に制御対象モデル, スライディングモードコントローラ, 適応外乱オブザーバの詳細を示す.

3.2.1. 制御対象モデル

エンジン回転数 $N_E(k)$ と制御入力 $U_{sl_ar}(k)$ の関係を表した制御対象モデルを式(9)のように定義する.

$$N_E(k+1) = \quad (9)$$

$$a_1 N_E(k) + a_2 N_E(k-1) + b_1 U_{sl_ar}(k) + b_2 U_{sl_ar}(k-1) + c_1(k)$$

a_1, a_2, b_1, b_2 : モデルパラメータ

$c_1(k)$: 外乱推定値

モデルパラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 は, システム同定によりあらかじめ決定する. また, 外乱推定値 c_1 は, 適応外乱オブザーバによって逐次算出される.

3.2.2. 適応外乱オブザーバ

適応外乱オブザーバは, 式(9)で規定された制御対象モデルから算出された $N_{E_hat}(k)$ と実際の $N_E(k)$ との偏差 $E_{dov_ar}(k)$ から算出される. つまり, N_{E_hat} と N_E の差が最小となるように, 適応制御で用いられる固定ゲイン法により c_{1_ar} を推定する. 以下に演算式を示す.

$$N_{E_hat}(k) =$$

$$a_1 N_E(k-1) + a_2 N_E(k-2) + b_1 U_{sl_ar}(k-1)$$

$$+ b_2 U_{sl_ar}(k-2) + c_{1_ar}(k-1) \quad (10)$$

$$E_{dov_ar}(k) = N_E(k) - N_{E_hat}(k) \quad (11)$$

$$c_{1_ar}(k) = c_{1_ar}(k-1) + \frac{P_{ar}}{1 + P_{ar}} E_{dov_ar}(k) \quad (12)$$

P_{ar} : 同定ゲイン

適応外乱オブザーバが外乱要素 c_{1_ar} を推定することにより, 式(9)で規定された制御モデルのモデル誤差を吸収している. その結果, 外乱や経年劣化に対して高いロバスト性を実現している.

3.2.3. スライディングモードコントローラ

吸入空気量制御で用いるスライディングモードコントローラは, 到達則入力 $U_{rch_ar}(k)$ と等価則入力 $U_{eq_ar}(k)$ か

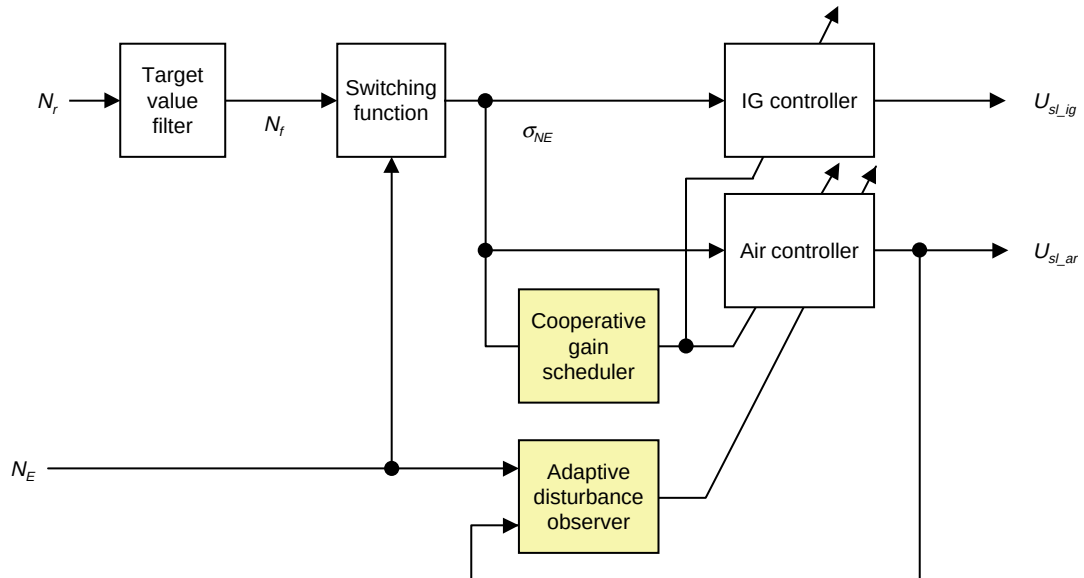


Fig. 2 System diagram of ACTIC

ら構成されている。演算式を以下に示す。

$$U_{sl_ar}(k) = U_{rch_ar}(k) + U_{eq_ar}(k) \quad (13)$$

$$U_{rch_ar}(k) = K_{rch_ar} \sigma_{NE}(k) \quad (14)$$

$$U_{eq_ar}(k) = \frac{1}{b_1} \{ (1 - a_1 - Pole) N_E(k) + (Pole - a_2) N_E(k-1) + N_f(k) + (Pole - 1) N_f(k-1) - Pole N_f(k-2) - b_2 U_{sl_ar}(k-1) - c_1(k) \} \quad (15)$$

K_{rch_ar} : フィードバックゲイン

$U_{eq_ar}(k)$ は、偏差状態量を切替関数で規定された切替直線上に拘束する機能をもつ。この $U_{eq_ar}(k)$ に外乱補償の機能を付加するために外乱推定値 c_{1_ar} を挿入している。

点火時期制御では外乱補償を切替関数の積分値に基づく $U_{adp_ig}(k)$ でおこなっているのに対して、吸入空気量制御では、適応外乱オブザーバで推定した c_{1_ar} を用いた $U_{eq_ar}(k)$ でおこなっている。 c_{1_ar} は前述の固定ゲイン法により外乱の推定をおこなうため、積分器により外乱補償をおこなう $U_{adp_ig}(k)$ よりも外乱補償の応答性がよい。

3.3. 協調ゲインスケジューラ

ACTICでは、協調制御を協調ゲインスケジューラで主導となる制御を判定し切り替えることにより実現している。

Fig. 3 に示すように、切替関数値 σ_{NE} が小さい領域は点火時期制御、切替関数値 σ_{NE} が大きい領域は吸入空気量制御が主導となる制御と判定する。

さらに、点火時期制御主導領域では、吸入空気量制御の制御ゲインを低くし、吸入空気量制御主導領域では、点火時期制御の制御ゲインを低く設定している。この制御ゲインの変更により、主導となる制御を切り替えている。Fig. 4, Fig. 5に、点火時期制御および吸入空気量制御の制御ゲインの関係を示す。

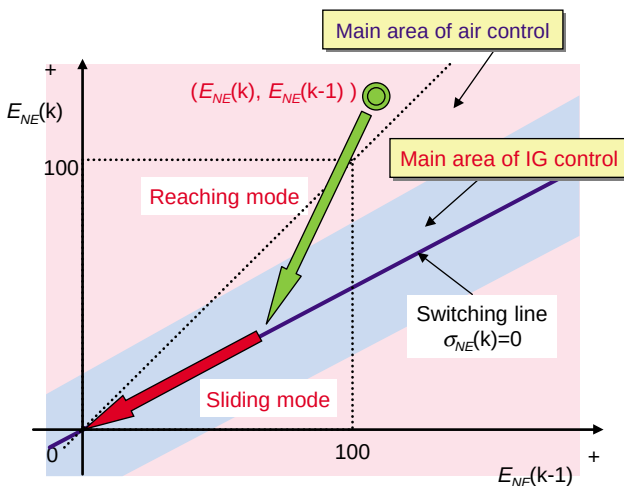


Fig. 3 Main controller switching

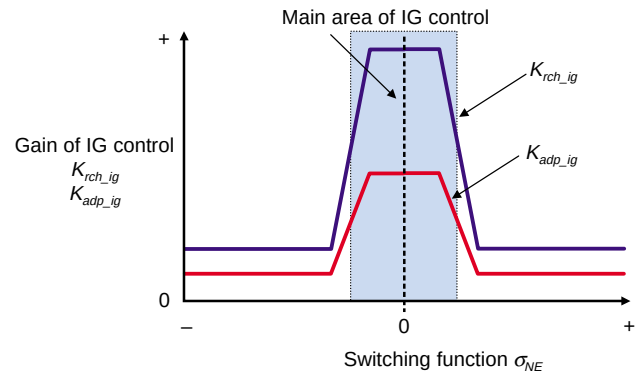


Fig. 4 Gain scheduling of ignition timing control

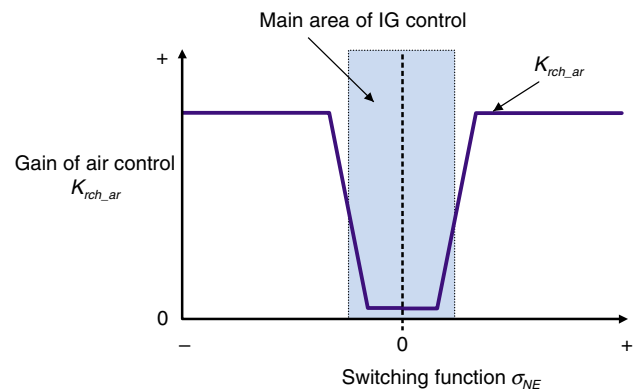


Fig. 5 Gain scheduling of suction air control

4. テスト結果

ACTICと従来のアイドル制御の安定性、応答性、外乱安定性の比較をおこなった。さらに、ACTICの忘却積分機能の効果を示すために、忘却積分機能の有無によるエンジン始動後の挙動および消費燃料の比較をおこなった。その結果を以下に示す。

4.1. 安定性

目標アイドル回転数 600rpm、無負荷状態で、ACTIC と従来のアイドル制御の安定性を Fig. 6 に示す。この結果より、ACTICの方が従来のアイドル制御よりも安定性が高い。

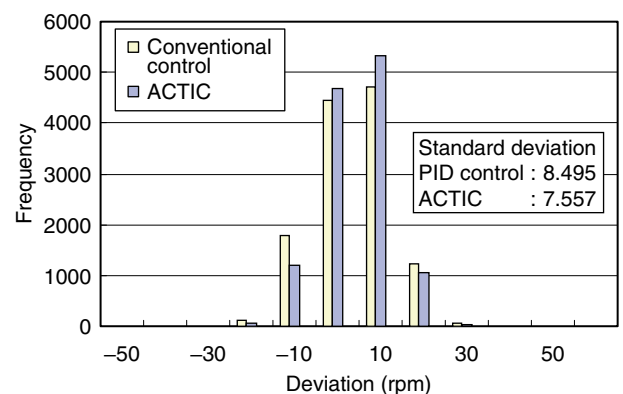


Fig. 6 Comparison of stability with idle speed control

4.2. 応答性および外乱安定性

応答性および外乱安定性を比較するために、負荷入力(エアコン負荷)と同時に目標アイドル回転数を 600rpm から 720rpm に変更した際のエンジン回転数の挙動を計測した。その結果を Fig. 7 に示す。

従来のアイドル制御では、エアコン負荷(外乱)によるエンジン回転数の落ち込みは抑制できていない。しかし、目標アイドル回転数に対してエンジン回転数がオーバーシュートし、無駄な吹け上がりが発生している。これは、点火時期制御と吸入空気量制御の干渉によるオーバーシュートである。

一方、ACTICでは、従来のアイドル制御同様にエアコン負荷(外乱)によるエンジン回転数の落ち込みを抑制している。さらに、従来のアイドル制御と比べ、オーバーシュートによるエンジン回転数の吹け上がりも低減している。

これらの結果から、ACTICは吸入空気量制御と点火時期制御の干渉を協調制御により抑制し、従来のアイドル制御より高い目標値応答性と外乱安定性を実現している。

4.3. 忘却積分機能

忘却積分機能の効果を確認するために、忘却積分機能の有無で、エンジン始動後の挙動を計測した。エンジン始動後から目標アイドル回転数 600rpm に落ち着くまでのエンジン回転数、点火時期、バルブリフト量の挙動をFig. 8 に示す。

忘却積分機能によって点火時期が基準点火時期に復帰している。それにともなってリフト量も、より低リフトに動作している。

次に、Fig. 9 に忘却積分機能の有無で、目標アイドル回転数 600rpm に収束した後のエンジン回転数の標準偏差の比較を示す。

忘却積分機能なしでは、アイドル回転数の安定性に低下がみられた。これは点火時期が過度に遅角しているため、トルク変動が大きくなり、アイドル制御の安定性が低下したと考えられる。

さらに、Fig. 10に忘却積分機能の有無で、目標アイドル回転数 600rpm に収束した後の、燃料消費量の比較を示す。

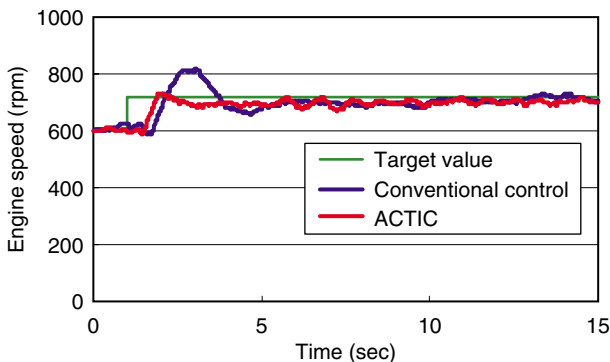


Fig. 7 Idle speed control response when disturbance is input

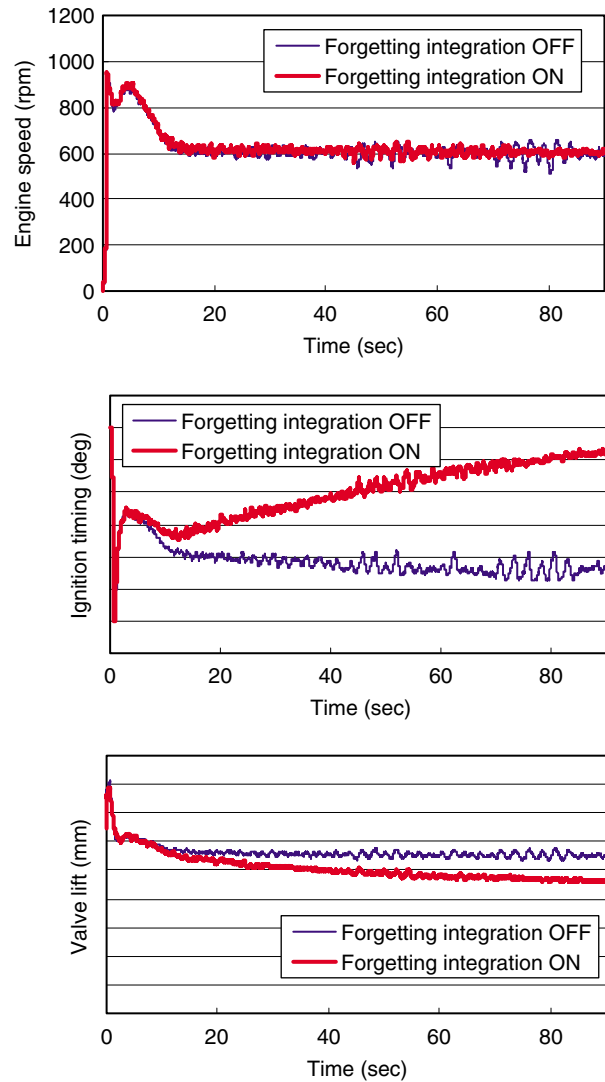


Fig. 8 Influence of forgetting integration on ignition timing and inlet valve lift behavior

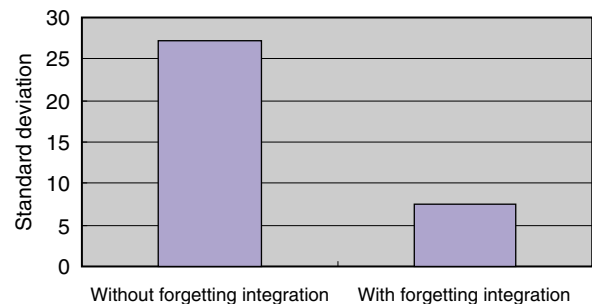


Fig. 9 Influence of forgetting integration on idle speed stability

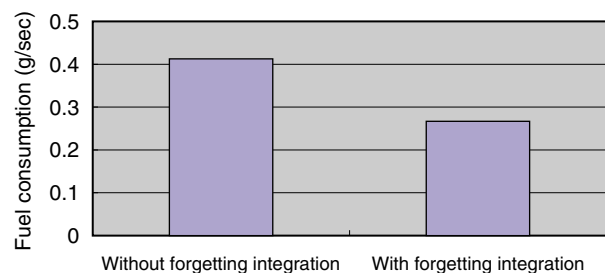


Fig. 10 Influence of forgetting integration on fuel consumption

忘却積分機能ありに対して忘却積分機能なしの場合、燃料消費量が増加していた。これも点火時期の過度な遅角が原因である。

以上の結果より忘却積分機能導入によって、過度な点火時期の遅角による安定性低下およびアイドル時の燃費低下を抑制することができる。

5. まとめ

連続可変動弁機構付ガソリンエンジンにおけるアイドル回転数低下を実現するために、点火時期と吸入空気量を協調制御する新しいアイドル制御(ACTIC)を導入し、実車テストの結果から以下の知見を得た。

- (1) アイドル回転数 600rpm での安定性が向上する。
- (2) 点火時期制御と吸入空気量制御の干渉が生じないため、外乱発生時の応答性および安定性が向上する。
- (3) 点火時期制御の忘却機能により、点火時期の過度な遅角を抑制でき、アイドル回転数の安定性と燃費性能が向上する。

参考文献

- (1) 山根健:BMWのフル可変動弁システムVALVETRONIC, ENGINE TECHNOLOGY, Vol.5(2003)
- (2) Arinaga, T.: A Study of Friction Characteristics of Continuously Variable Valve Event & Lift (VEL) System, SAE Paper 2006-01-0222(2006)
- (3) Himself, F.: INA EcoValve A Continuously Variable Valve Lift (CVVL) System, SAE Paper 2004-01-1391
- (4) 野波健蔵, 田宏奇:スライディングモード制御, コロナ社, 263p.(1994)
- (5) Yasui, Y., Akazaki, S., Ueno, M., Iwaki, Y.: Secondary O2 Feedback Using Prediction and Identification Type Sliding Mode Control, SAE Paper 2000-01-0936(2000)
- (6) Yasui, Y., Shimojo, K., Saito, M., Tamagawa, Y.: Rapid Engine Speed Control for AMT Using Two-Degree-of-Freedom Sliding Mode Algorithm, SAE Paper 2005-01-1592(2005)
- (7) Hashimoto, E., Ishiguro, T., Yasui, Y., Akazaki, S.: High Reliability Electronic Throttle System Design, SAE Paper 2003-01-0708(2003)

■ 著 者 ■



東 谷 幸 祐



安 井 裕 司



佐 藤 正 浩