

むだ時間補償によるエンジン吸気制御の応答改善

栗原伸夫*・張

揚**

Intake Air Control of SI Engine Using Dead-Time Compensation

Nobuo KURIHARA* and Yang ZHANG**

Abstract

Fuel economy can be improved by adopting the method of lean burning and reducing idle speed. And to achieve it, it is required to improve the performance of engine speed control. The dead time in the process of intake air control is one of the reasons, which cause the worse response and poor stability of engine speed control. The problem of the dead time compensation for intake air control is investigated in this paper. The Smith predictor and compensators are discussed in it. A new compensation method is presented in this paper, which is adopting a Smith predictor combining with disturbance compensator to improve the engine speed control system's response to the disturbance at the front or rear part of the dead time. The simulation of engine speed control with the dead time compensation confirmed that the modified intake air control system is efficient.

Keywords: Dead time compensation, Intake air control, Engine

1. はじめに

地球温暖化と大気汚染の解決に向けて、自動車の分野では燃費低減や排気抑制に関する規制が一段と厳しさを増している。こうした背景から、ガソリンエンジンではリーンバーン燃焼技術を中心にして様々な検討が進められている。とりわけ市街地走行などでの低速運転やアイドル運転においては、リーンバーン燃焼をより安定化する技術が必要とされている。

本研究ではアイドル運転時の低回転数化を想定して、吸気制御の応答改善をはかる。アイドル回転数を 100 [rpm] 低下することが可能となれば、燃費が 2~5% 改善されると言われている。しかし、4 サイクルエンジンには間欠プロセスであることに起因するむだ時間の存在があ

る。このむだ時間はエンジン回転数が低速であるほど大きくなる訳であるから、アイドル回転数を下げるためには、むだ時間の補償がより必要となる。またエンジン回転数が低くなると外乱により失火しやすくなりストールを招くことがあるため、この外乱に対する応答改善が重要となる。

むだ時間補償の制御理論に関しては、有名なスミス制御方式がある⁽¹⁾。しかし、モデル誤差の影響が大きいことからこれまで普及されにくい面があった。エンジンの回転数制御においては、むだ時間は回転数の関数として一義的に計測される。とくに最近ではマイクロコンピュータの性能が向上して、クランク角度に応じて瞬時のむだ時間を正確に把握できるようになってきた。従ってエンジン制御システムを設計する際に、回転数信号をもとにむだ時間を推定して積極的に補償する制御方式の実現が期待できる。

ただしここで、スミス制御方式は目標入力の変化に対し良好な制御特性をもつが、外乱に対

平成 20 年 12 月 15 日受理

* システム情報工学科・教授

** 大学院工学研究科機械システム専攻博士後期課程・1 年

してロバストではないという問題がある。エンジン制御では燃料パージやエアコン投入、パワステによる据え切りといった大きな負荷変動が外乱として存在する。本論文では、こうしたスミス制御方式の外乱に対する制御特性の問題を解決する。すなわち、スミス制御方式に外乱補償器を付加した制御方式を検討し、応答性とロバスト安定性を独立に設定できる2自由度系の外乱補償器を適用する方式を提案する。アイドル回転数制御において、応答性とロバスト安定性の改善をはかる。エンジンの物理モデル用いたシミュレーションでアイドル回転数制御の応答改善の効果を確認する。

2. スミス制御の外乱補償

2.1 フィードバック系の外乱補償

むだ時間の前後に外乱を持つ系に、スミス制御方式を適用した制御系を図1に示す。スミス制御方式はむだ時間経過後に現れる目標入力の効果予測しながら目標入力を修正するものである。

この系では制御出力は次の式で与えられる。

$$Y(s) = \frac{Gc(s)G(s)e^{-Ls}}{1 + Gc(s)G(s)}R(s) + \frac{1 + Gc(s)G(s)(1 - e^{-Ls})}{1 + Gc(s)G(s)}[d_1(s)G(s)e^{-Ls} + d_2(s)] \quad (1)$$

式(1)の右辺第1項は目標入力と制御出力との関係を示し、第2項は、外乱と制御出力との

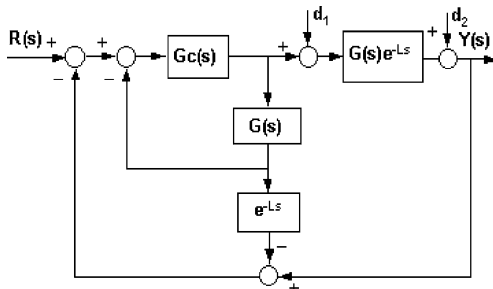


Fig. 1 Control system applied smith predictor

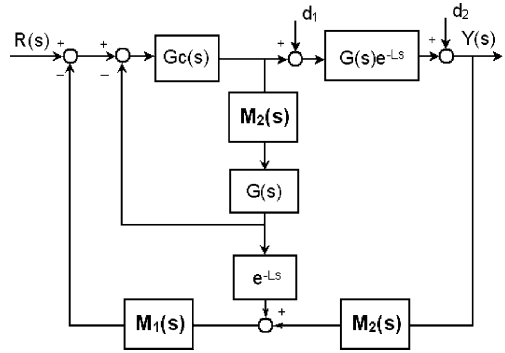


Fig. 2 Control system with smith predictor and disturbance compensator $M_1(s)$, $M_2(s)$

関係を示している。特性方程式 $1 + Gc(s)G(s) = 0$ にはむだ時間が含まれないから、通常的设计法たとえばPI制御などがそのまま適用できる。制御器 $Gc(s)$ を設計する場合、むだ時間がないものとして目標入力に対する応答を調整する⁽¹⁾。スミス制御方式は、目標入力に対して考案されたもので、外乱に対しては問題がある。

本研究の主眼となる外乱に対するロバスト性の改善については、フィードバック系に外乱補償器を付加する方式が報告されている⁽²⁾。これに筆者等がさらに改良を加えた方式を図2で示す。ここで、制御対象の極を相殺するために外乱補償器 $M_1(s)$ を導入するのが従来のものであるが、これに制御対象の極を再配置することを目的として外乱補償器 $M_2(s)$ を組み込んでいる⁽³⁾。外乱補償器を付加したので、この系では制御出力は次の式で与えられる。

$$Y(s) = \frac{Gc(s)G(s)e^{-Ls}}{1 + Gc(s)G(s)M_2(s)}R(s) + \frac{1 + Gc(s)G(s)M_2(s)(1 - M_1(s)e^{-Ls})}{1 + Gc(s)G(s)M_2(s)} * [d_1(s)G(s)e^{-Ls} + d_2(s)] \quad (2)$$

設計手順は下記の通りである。

(1) 外乱 $d_1(s)$ に対する応答性改善のため、外乱補償器 $M_1(s)$ を設定する。 $(1 - M_1(s)e^{-Ls})$ の零点で $G(s)$ の極を相殺させることで外乱に対する応答性を改善する⁽²⁾。(2) 外乱 $d_2(s)$ に

対する応答性改善のため、外乱補償器 $M_2(s)$ を設定する。 $M_2(s)$ により制御対象 $G(s)$ の極を虚軸から遠ざけることができる。すなわち制御対象 $G(s)$ の極を複素左半平面で十分に左側とすることで、外乱に対する応答性を向上させることができる。

以上のように、フィードバック系に外乱補償器 $M_1(s)$ と $M_2(s)$ を組み込むことで、外乱に対する制御応答を改善して安定化はかることができる。しかし、外乱補償器 $M_1(s)$ と $M_2(s)$ の設計には、自由度が制限されることで、所望の制御性能を得るまでの調整に手間取ることが課題となる。

2.2 2自由度系の外乱補償

2自由度系は、制御対象と予測モデルとの出力偏差を除去するもので、目標入力と外乱とを独立に調整できる⁽⁴⁾。図3でスミス制御方式に2自由度系の外乱補償器 $M_s(s)$ を適用する方式を提案する。

この系では制御出力は次の式で与えられる。

$$Y(s) = \frac{Gc(s)G(s)e^{-Ls}}{1+Gc(s)G(s)}R(s) + \frac{1+Gc(s)G(s)\left(1-\left(1+\frac{M_3(s)}{Gc(s)}\right)e^{-Ls}\right)}{1+Gc(s)G(s)} * [d_1(s)G(s)e^{-Ls} + d_2(s)] \quad (3)$$

式 (3) の右辺第 1 項には外乱補償器 $M_3(s)$ が

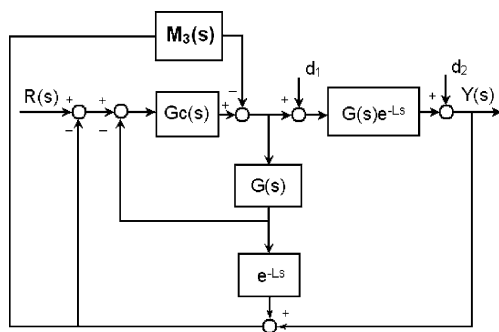


Fig. 3 Control system with smith predictor and disturbance compensator $M_2(s)$

存在しない。従って外乱補償器 $M_3(s)$ の調整は目標入力に対する制御出力に影響を及ぼさないことがわかる。そして式(3)の右辺第2項にて、外乱に対する制御出力が外乱補償器 $M_3(s)$ によって調整できることがわかる。

外乱補償器 $M_3(s)$ として、本論文では式(4)、(5)で示す制御対象の逆モデルと平滑モデルで構成する。

$$M_3(s) = G^{-1}(s)F(s) \quad (4)$$

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (5)$$

ここで、 λ は制御出力の応答に応じて調整され、また n はモデル $G(s)$ の次数に応じて定められる。

2.3 数値比較の例

次の制御対象を考える。

$$G(s)e^{-Ls} = \frac{0.4}{(s+0.2)(s+0.8)}e^{-0.5s} \quad (6)$$

制御器 $G_c(s)$ を式 (6) の PI 制御とする。

$$G_C(s) = 1 + \frac{0.25}{s} \quad (7)$$

外乱補償器は次のように設定される。

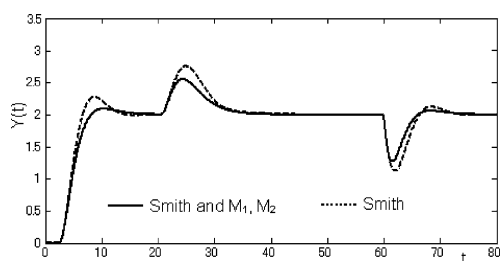
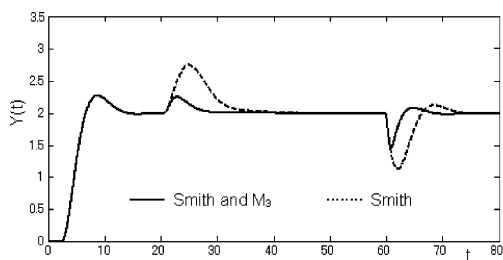
$$M_1(s) = 1.85 - \frac{1.275}{s + 1.5} \quad (8)$$

$$M_2(s) = \frac{4s+5}{s+5} \quad (9)$$

$$M_3(s) = \frac{(s+0.2)(s+0.8)}{0.4(0.2s+1)(0.2s+1)} \quad (10)$$

ここで、 $\lambda=0.2$ とする。

図4は、スミス制御方式と外乱補償器 $M_1(s)$, $M_2(s)$ を付加した方式との応答を比較する。立ち上りは目標入力、途中では外乱 $d_1(s)$ および外乱 $d_2(s)$ のステップ変化に対する応答をそれぞれ示す。 $M_1(s)$ と $M_2(s)$ の配置により、外乱に対する応答性の向上が得られていることがわかる。図5は、スミス制御方式と外乱補償器 $M_3(s)$ を付加した方式との応答を比較する。立ち上りは目標入力、途中では外乱 $d_1(s)$ および外乱


 Fig. 4 Unit step response of smith predictor and disturbance compensator M_1, M_2

 Fig. 5 Unit step response of smith predictor and disturbance compensator M_3

$d_2(s)$ のステップ変化に対する応答をそれぞれ示す。 $M_3(s)$ の設定により、スミス制御の入力—出力伝達特性を損なわないことがわかる。外乱に対する応答性さらに向上が得られていることがわかる。スミス制御方式に2自由度系の外乱補償器 $M_3(s)$ を適用する方式において、制御系の低感度化、ロバスト安定性などが容易に実現できることを明らかにした。

3. モデル誤差の検討

制御系設計で用いる伝達関数や状態方程式などの数式モデルは、必ずしも実システムの特性を正確に表しているわけではなく、実際には両者の間には小さくない誤差が存在する。制御対象のモデル化で不確かさが避けられないものとする、設計段階においても不確かさの存在を前提にした設計法を考えることが重要である。したがって、外乱補償器を付けたときのモデル誤差に起因するロバスト安定性を検討しておく必

要がある。

制御対象 $G(s)e^{-Ls}$ が次式のようなとする。

$$Gm(s)e^{-Lms} = (1 + \delta(s))G(s)e^{-Ls} \quad (11)$$

ここで、 $\delta(s)$ はモデル誤差である。まず、安定性について、モデル誤差の影響を考察する。図3の系で目標入力から制御出力までの伝達関数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{R(s)} &= T_m(s) \\ &= \frac{(1 + \delta(s))Gc(s)G(s)e^{-Ls}}{1 + Gc(s)G(s) + \delta(s)\left(1 + \frac{M_3(s)}{Gc(s)}\right)Gc(s)G(s)e^{-Ls}} \\ &= \frac{\frac{Gc(s)G(s)}{1 + Gc(s)G(s)}(1 + \delta(s))e^{-Ls}}{1 + \frac{Gc(s)G(s)}{1 + Gc(s)G(s)}\delta(s)\left(1 + \frac{M_3(s)}{Gc(s)}\right)e^{-Ls}} \end{aligned} \quad (12)$$

一巡伝達関数を次式とおく

$$\begin{aligned} &\frac{Gc(s)G(s)}{1 + Gc(s)G(s)}\delta(s)\left(1 + \frac{M_3(s)}{Gc(s)}\right)e^{-Ls} \\ &= Q(s)\Delta(s)e^{-Ls} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{ただし, } Q(s) = \frac{Gc(s)G(s)}{1 + Gc(s)G(s)} \quad (14)$$

$$\Delta(s) = \delta(s)\left(1 + \frac{M_3(s)}{Gc(s)}\right) \quad (15)$$

ここで、 $\Delta(s)$ はこの系のモデル誤差を表す。図3の系で、 $M_3(s)=0$ の場合、式(15)は次のようになる。

$$\Delta(s) = \delta(s) \quad (16)$$

これはモデル誤差がある場合のスミス制御方式である。 $\delta(s)$ の大きさの上限が何らかの方法で評価できているものと仮定する。これを式で

$$|\delta(j\omega)| \leq |W(j\omega)| \quad \omega \in [0, \infty] \quad (17)$$

と表す。 $|W(j\omega)|$ はモデル誤差の度合を示す上限関数である。スミス制御のモデル誤差に対するロバスト安定の必要十分条件は、ナイキストの安定判別から、次の式である。

$$|Q(j\omega)\exp(-j\omega L)W(j\omega)| \leq 1 \quad \omega \in [0, \infty] \quad (18)$$

図3の系では、 $\Delta(s)$ 次の式を満たすと、

$$|\Delta(j\omega)| \leq |W(j\omega)| \quad \omega \in [0, \infty] \quad (19)$$

モデル誤差に対してロバスト安定の必要十分条件も、スミス制御と同様にして、式(18)である。

外乱補償器の調整によって、式(19)、(18)が成立するので、この制御系が条件安定であることがわかる。

次に、定常特性を検討する。モデル誤差があるとき、図3の系で目標入力から制御出力までの伝達関数は式(12)で与えられる。 $G_c(s)$ が積分器を持っていて、かつ式(4)、(5)より、

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(1 + \frac{M_3(s)}{G_c(s)} \right) = 1 \quad (20)$$

となるので、式(12)でステップ目標入力の定常偏差が0に漸近する。

また、この系で制御対象の前後でステップ外乱 $d_1(s)$ 、 $d_2(s)$ が発生した際の出力偏差 $e_d(s)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} e_d(s) &= \frac{(1 + G_c(s)G(s)(1 - (1 + \frac{M_3(s)}{G_c(s)})e^{-Ls}))}{1 + G_c(s)G(s) + \delta(s)(1 + \frac{M_3(s)}{G_c(s)})G_c(s)G(s)e^{-Ls}} \\ &\quad * (d_1(s)G(s)e^{-Ls} + d_2(s)) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $G_c(s)$ が積分器を持っていて、かつ式(20)によって、ステップ外乱に対する定常偏差も0に漸近する。

つぎに2章の数値例において、制御対象にモデル誤差があったとき、提案した系のロバスト安定性を考察する。式(11)により、制御対象のモデル誤差があると、制御対象の係数とむだ時間に差異を生じる。図3の系で制御対象にモデル誤差があるときの応答を図6で示す。

ここで、図6(a)では、制御対象の係数が0.4から0.6に変動したとき、つまり

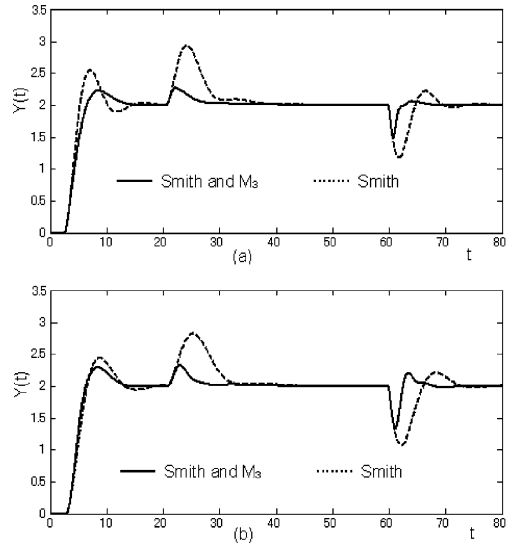


Fig. 6 Unit step response of smith predictor and disturbance compensator M_3 with model error

$$G_m(s) = 1.5G(s) \quad (22)$$

となったときのシステム応答である。図6(b)では、むだ時間0.5から0.8に変動したとき、つまり

$$Lm = 1.6L \quad (23)$$

となったときのシステム応答である。スミス制御と外乱補償器を付けたときの応答を比較すると、モデル誤差があるときでも補償器によって外乱に対するロバスト安定性を向上することが明らかである。

4. エンジンの回転数制御系

4.1 回転数制御

筒内噴射式のSIエンジンにおける回転数制御システムを図7に示す⁽⁵⁾。このシステムは電子制御スロットルを開閉し、目標回転数に見合う吸入空気量を調節する。基本入力要素は、ISC/V開度 θ [%] であり、制御量はエンジン回転数 Ne [rpm] である。クランク角度センサから回転数を検知し、コントロールユニットによ

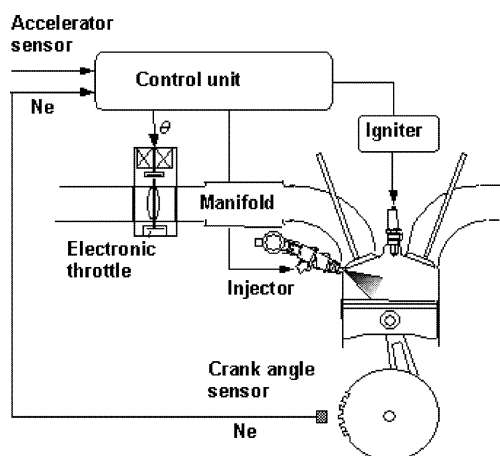


Fig. 7 Control system of SI engine

り電子制御スロットルへの開度信号 θ を出力し、開度信号 θ に従い、スロットルが開閉し吸入空気量を調節する。その空気量に見合う燃料を筒内に噴射する。その燃料量によるトルクで回転を得る。アクセル開度で設定される目標値にエンジン回転数を追従される機能と、トルク外乱などに対してエンジン回転数を一定に保つ機能が必要とされる。

4.2 制御対象のモデル

エンジン回転数制御は吸気系、トルク発生系、回転系から成ると考えられる。これを正確にモデル化することは、モデルが複雑になるだけでなくパラメータ同定が困難であり実用的でない。そこで、線形化したエンジン回転数制御モデルを作成する。図 8 のブロック線図として表現される。

吸入空気量はスロットル開度、マニホールド内の圧力の遅れ関数で記述される。マニホールド内の圧力が低い場合、スロットルを通る流れは音速流となり、その吸入空気量はスロットル開度のみの関数となる。スロットルはモータにより駆動するため、時定数 τ の遅れが生じる。したがって、吸気系のダイナミックを一次遅れとした。トルクはシリンダ内空気量とエンジン

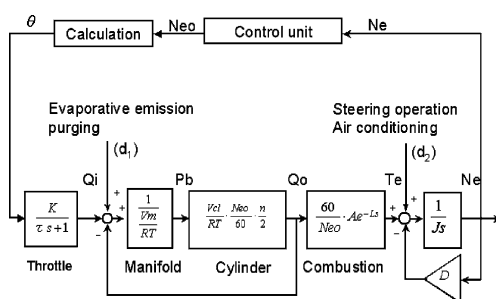


Fig. 8 Modeling for engine speed control

回転数の関数として、エンジン試験で実測した値として非線形関数でモデル化した。ここで、燃料量、点火時期、空燃比は定格のものとして考慮しない。ここで、 A は単位換算の係数である。またここに含まれるむだ時間 L は回転数の関数として与えた。つまり、トルクが得られるには吸気・圧縮・爆発の 3 行程分の遅れが生じることを意味する。ISC/V からシリンダまでの吸気系を一次遅れ系、燃焼室を含むトルク発生系を無駄時間、回転系を一次遅れ系とした。さらに外乱として、揮発燃料分のパージ、ステアリングの据切りや空調投入などの負荷変化を加えていることが特徴である。

図 8 で示すエンジンモデルのパラメータを表 1 にまとめる。エンジンモデルに表 1 のパラメータを代入して式を簡略化するとモデルの伝達関数として式 (24)、(25) が得られる。

$$\frac{6}{0.1s+1} e^{-Ls} \frac{3}{0.35s+1} \quad (24)$$

$$L = \frac{3}{4} \cdot \frac{2 \cdot 60}{Ne} \quad (25)$$

Table 1 Model parameters of control object

K	Coefficient of air flow	0.01	(—)
τ	Time constant of air flow	0.1	(s)
V_m	Volume of manifold	3,170	(cm ³)
V_{cl}	Volume of cylinder	450	(cm ³)
Neo	Engine speed	800	(rpm)
n	Number of cylinder	4	(—)
J	Moment of engine inertia	0.15	(kgm ²)
D	Coefficient of friction	0.432	(—)

5. むだ時間補償による吸気制御の応答改善

4.2 節で誘導したエンジンの回転数制御モデルに、2.2 節で提案する 2 自由度系の外乱補償器を適用する場合の効果をシミュレーションで確認する。図 1 のスミス制御方式と図 3 の 2 自由度系の外乱補償器を付加した制御方式とを比較する。制御対象は式 (24) で与えられるエンジンモデルである。 d_1 として揮発燃料分のパージ、 d_2 としてステアリングの据切りや空調投入などの負荷変化をむだ時間前後に加えている。むだ時間のモデル誤差による影響を考慮して、むだ時間要素の遅れ時間 L は回転数 N_e の関数として与える。制御器 $G_c(s)$ は 2.3 節と同様に PI 制御を適用する。シミュレーション条件として、初期回転数を 700 [rpm] とし、時刻 5 [sec] に目標入力を 800 [rpm] と設定する。また時刻 15 [sec] の時点で目標入力を 700 [rpm] に戻すことにする。目標入力に対する応答を図 9 に示す。2 自由度系の外乱補償器を付加した場

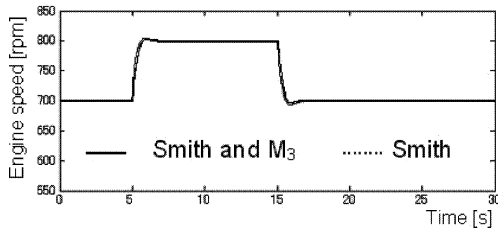


Fig. 9 Simulation results for engine idle speed

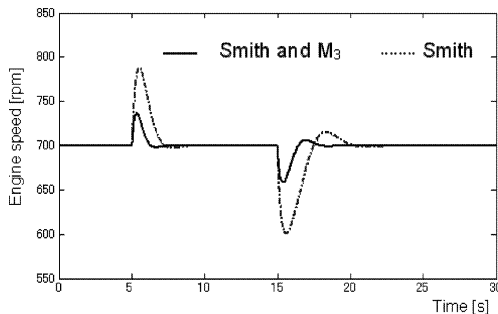


Fig. 10 Simulation results for disturbance

合でも、本来のスミス制御方式の特性を損なわないことが分かる。

つぎに時刻 5 [sec] で外乱 d_1 を、時刻 15 [sec] で外乱 d_2 を加える。外乱に対する応答を図 10 に示す。

スミス制御方式と 2 自由度系を付加した制御方式の応答性を比較すると、 $M_3(s)$ の設定により、外乱に対するロバスト性向上が得られていることが分かる。図 10 において、外乱による回転数の落込みを半減できる結果が得られた。このシミュレーション結果から、図 3 および式 (3) で提案するスミス制御方式に 2 自由度系を付加する制御方式が、エンジン回転数制御における吸気制御の応答改善に有効であることを確認した。

6. ま と め

ガソリンエンジンのアイドル回転数制御において、サイクル燃焼に起因するむだ時間補償に着目し、吸気制御に外乱補償器を付加するスミス制御方式を適用することで、応答性改善をはかった。

スミス制御方式を適用する場合、外乱に対するロバスト性を改善するためにスミス制御方式に外乱補償器を付加した式 (2)、(3) を提案した。むだ時間を持つ 2 次遅れの制御対象に適用することで、数値計算で外乱に対する応答性改善の効果を比較した。特に 2 自由度系の外乱補償器を組み合わせる方式が、制御系の性能ならびに調整の点で優れていることを明らかにした。

外乱補償器を付加したスミス制御方式に対して、モデル誤差による応答への影響を評価した。式 (3) のケースを例に、モデル誤差の存在で条件安定であり、目標入力と外乱に対する定常偏差が 0 に漸近することを示した。また数値例で比較検討した結果から、目標入力に対するスミス制御方式の効果を保ちつつ、外乱に対して即応できることが明らかとなった。

エンジンアイドル回転数制御に適用するため、電子制御スロットルによる吸気制御のモデルを作成した。むだ時間が回転数で変化すること、むだ時間の前後に揮発燃料分のパージや負荷変動などの外乱を持つモデルである。シミュレーションによって、スミス制御方式に 2 自由度系の外乱補償器を組み合わせる方式を適用することで、応答性、安定性の向上が得られた。これによりエンストを引き起こさずにアイドル回転数の低速化をはかって燃費低減の可能性を見出した。

今後、提案した制御方式をエンジンの制御システムに組み込んで、実験にて検証する必要がある。

参考文献

- (1) O.J.M. Smith, A Controller to Overcome Dead Time, ISA J, 6-2(1959), 28-33.
- (2) 渡辺慶二, スミス法の外乱補償と安定性について, 計測自動制御学会論文集, Vol. 23, No. 7 (1987), 727-733.
- (3) 石墨 崇, 栗原伸夫, 大須賀稔, むだ時間補償を用いたアイドル回転数制御, 日本機械学会 D & D '99 講演論文集, (1999), 620.
- (4) 前田 肇, 杉山俊治, アドバンスト制御のためのシステム制御理論, (1990), 56-62, 朝倉書店.