

バックステッピング方式による電子スロットルの非線形制御

Simulation Study of Intake-Air Pulsation in SI-Engine

○林 寛*, 張 揚**, 栗原伸夫***

Hiroshi Hayashi*, Yang Zhang**, Nobuo Kurihara**

*八戸工業大学大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻博士前期課程

**八戸工業大学大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻博士後期課程

***八戸工業大学大学院工学研究科

***Hachinohe Institute of Technology, Graduate School of Engineering

キーワード : 自動車エンジン (Automobile Engine), 電子スロットル(Electronic Throttle),
バックステッピング制御(Backstepping Control) , シミュレーション(Simulation)

連絡先 : 〒031-8501 八戸市大字妙字大開 88-1 八戸工業大学工学部システム情報工学科
栗原研究室 栗原伸夫, Tel&Fax: (0178)25-8174, E-mail: kurihara@hi-tech.ac.jp

1. はじめに

自動車エンジンの制御システムでは、燃費低減・排気抑制をはかるうえで電子スロットルが使われている。電子スロットルの写真 1 に示す。ガソリンエンジンでは吸気制御系に、そしてディーゼルエンジンでは排気循環制御系である。

電子スロットルは制御対象としての特性は、非線形系かつ非ホロノミック系である。つまり、2 種類のスプリングとギアトレインのバックラッシュが起因する。従来から制御方式として PI 制御が適用されているが、制御偏差に応じたゲイン調整に手間取ること、分解能に限界があることなどが課題となっている。

本研究では、非ホロノミック系の非線

形適応制御理論として着目されつつあるバックステッピング制御の適用による効果をシミュレーションで検討する。

本報告では、電子スロットルのモデリング、バックステッピング制御の設計、そして Matlab/Simulink を用いたシミュレーション結果について述べる。

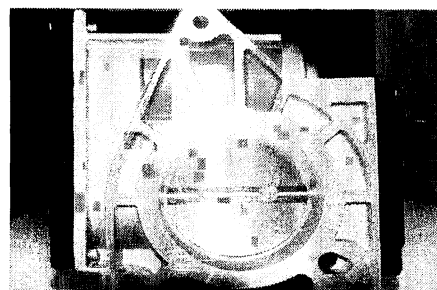


Photo.1 電子スロットルの外観

2. 電子スロットル

2.1 電子スロットルの構造

電子制御スロットルの構造を Fig.2 に示す。部品の構成は、DC モータ、ギアトレイン（オピニオンギア、中間ギア、セクタギア）、バタフライ弁、スプリングである。スプリングは閉弁用とリンプホーム機能のための開弁用の2種類があり、スプリング特性は Fig.3 で示すように強度の非線形性を持つ。また、ギアトレインの円滑動作には多少のバックラッシュが存在する。

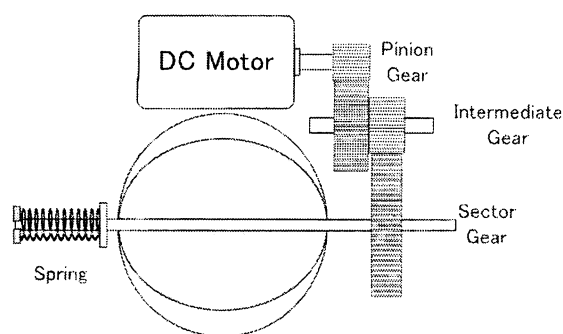


Fig. 2 電子スロットルの構造

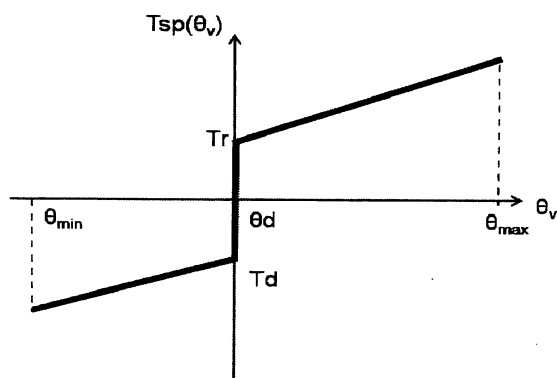


Fig. 3 スプリング特性

2.2 電子スロットルのモデリング

ここでは電子制御スロットルを次式で記述する。

モータ回転運動方程式

$$J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + D_m \frac{d \theta_m}{dt} = K_m I - T_{sp1} \quad (1)$$

バルブ回転運動方程式

$$J_v \frac{d^2 \theta_v}{dt^2} + D_v \frac{d \theta_v}{dt} + T_{sp}(\theta_v) = K I (= T_v) \quad (2)$$

モータ回路方程式

$$L_m \frac{di}{dt} + R I + K_m N_g N_v \frac{d \theta_m}{dt} = V \quad (3)$$

スプリング特性式

$$T_{sp}(\theta_v) = \begin{cases} Tr + Kr \times \theta_v & (\theta_{max} > \theta_v > \theta_d) \\ Td + Kd \times \theta_v & (\theta_{min} < \theta_v < \theta_d) \end{cases} \quad (4)$$

上記の式中に用いた主な記号を Table 1 に記す。また、(4)式のスプリング特性を Fig. 3 で示す。スロットル開度 θ_d は、リンプホーム機能を実現させるデフォルト開度であり、モータに通電しない状態でこの開度に保たれる。これは、DC モータが故障しても低速で車を運転できるよう吸気をエンジンへ取り込むための開度である。

Table 1 パラメータの説明

パラメータ	意味	単位
θ_v	バルブ回転角	deg
θ_m	モータ回転角	deg
V	モータ電圧	V
T_{sp}, T_{sp1}	スプリング特性	N・m
N_g, N_v	ギア比	-
J_m, J_g, J_v	慣性モーメント	N・m・s ²
D_m, D_g, D_v	粘性係数	N・m・s
E_g, E_v	ギア効率	-
$T_{sp}(\theta_v)$	スプリング特性	N・m
R	モータの抵抗	Ω

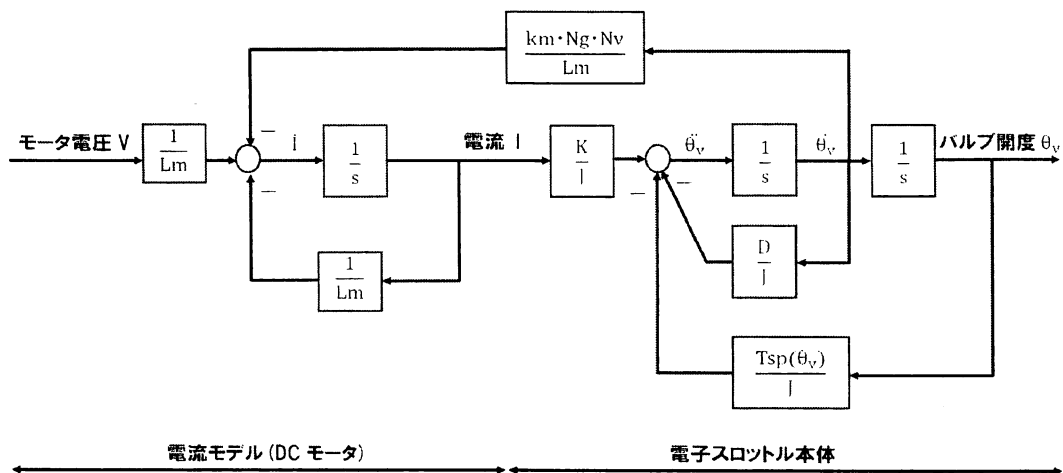


Fig. 4 電子スロットルのシミュレーションモデル

2.3 プログラミング

電子スロットルのモデル式は3元連立2階常微分方程式となり、これをMatlab/Simulinkブロック図で記述した結果をFig. 4で、シミュレーション結果をFig. 5にそれぞれ示す。

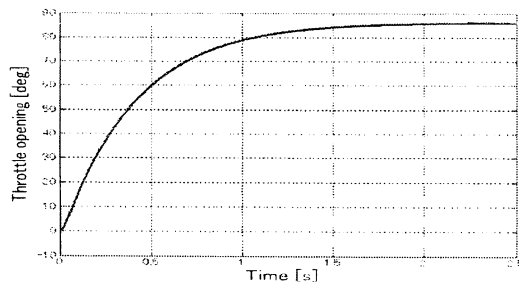


Fig. 5 電子スロットルの基本特性

3. 電子スロットルへの適用

3.1 電子スロットル制御の設計

バックステッピング制御では操作量Vは次式で与えられる。

$$V = \frac{1}{b(x,t)} [-f(x,t) - c_2 z_2 - z_1 - c_1 \dot{z}_1 + \ddot{z}_d] \quad (5)$$

ここで、 c_1 、 c_2 : Lyapunov 安定条件による定数、 z_d : 目標値、 $z_1 = x_1 - z_d$ 、 $\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{z}_d = x_2 - \dot{z}_d$ 、 $z_2 = x_2 + c_1 z_1 - \dot{z}_d$ である。

x_1 、 x_2 : 状態量、 V : 操作量

$f(x,t)$: 遷移行列、 $b(x,t)$: 駆動行列

ここで、制御対象である電子スロットルを1次遅れモデルで近似すると(6)式となる。

$$\begin{cases} \dot{f}(x,t) = Ax_2 \\ b(x,t) = B \end{cases} \quad (6)$$

A、B : 時定数とゲインに関する定数

バックステッピング制御のブロック線図をPI制御のものとFig. 6で比較する。電子スロットルを全閉から全開に開いたとき(W.O.T)のシミュレーション結果をFig. 7に示す。95%応答で100[ms]という制御目標を両方式ともにクリアしている。ただし、バックステッピング制御はPI制御と比較して立ち上がりが遅れる。

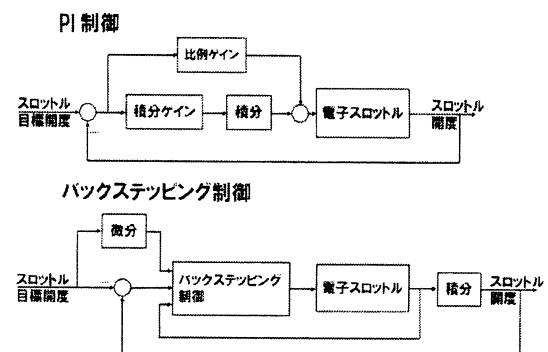


Fig. 6 バックステッピング制御ブロック図

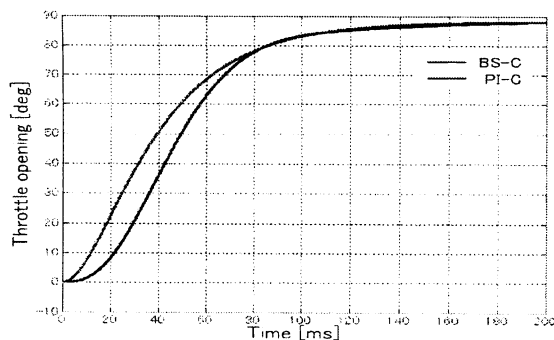


Fig. 7 ステップ応答の比較

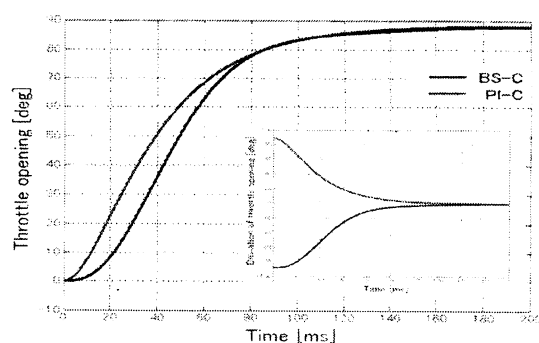


Fig. 9 電子スロットルの全開特性

3.2 バックラッシュ特性の追加

電子のスロットルにおけるギアトレインのバックラッシュの不感帯領域を次式で定式化する。

$$\dot{T}_v(t) = \begin{cases} m\dot{T}_v(t) & \text{if } \dot{T}_v(t) > 0 \text{ and } T_v(t) = m(T_v(t) - B_r) \\ \text{or} \\ & \text{if } \dot{T}_v(t) < 0 \text{ and } T_v(t) = m(T_v(t) - B_l) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

(7)式をグラフで表したものがFig. 8である。主な記号は、 m が傾き、 B_l 、 B_r が不感帯の幅である。電子スロットルの開度を全閉から全開にしたものと定常偏差を表した実行結果をFig. 9に示す。次のFig. 10は、開度を 3° から 4° まで開いた結果である。

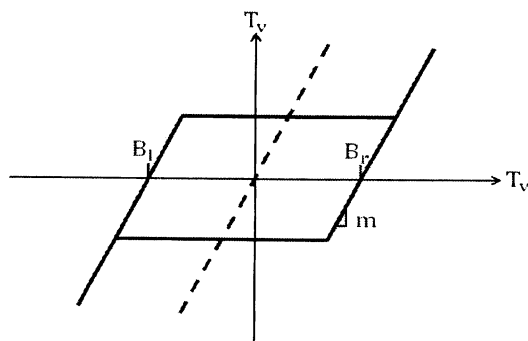


Fig. 8 バックラッシュの不感帯領域

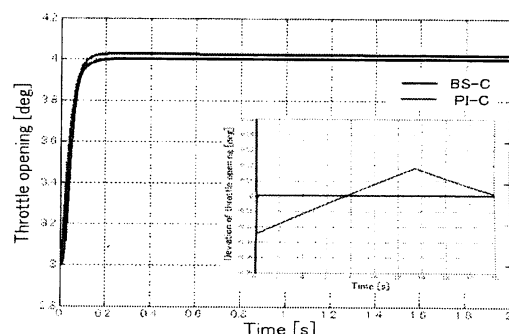


Fig. 10 電子スロットルの微小開度特性

3.3 電子スロットルの高分解能化

電子スロットルの基本開度には、限界がある。スロットル開度を 0.05° 毎に開けるとFig. 11のようにPI制御では、微小開度の限界を超えてしまうため、目標値に対してずれが生じるが、バックステッピング制御の結果では、目標値の 0.05° 毎に開度を開けることができた。

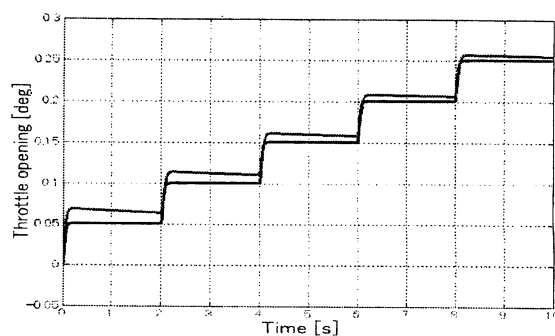


Fig. 11 分解能に関する特性比較

4. まとめ

自動車エンジンに用いられる電子スロットルの制御法として、非線形ホロノミック系に有効とされるバックステッピング制御の適用を Matlab/Simulink を用いたシミュレーションで検討した。

電子スロットルのモデルとして、モータ回転運動方程式、バルブ回転運動方程式、モータ回路方程式、スプリング特性式、ギアトレインのバックラッシュ特性を物理式から誘導した。電子スロットルの動特性を1次遅れモデルで近似してバックステッピング制御を設計した。

シミュレーション結果から、バックステッピング制御はPI制御と比較して立ち上がりが遅れる。

しかし、バックラッシュの影響をまったく受けないことが分かった。これにより、バックステッピング制御を用いることで電子スロットルの高分解能化がはかれる可能性を得た。

今後の検討課題として、バックステッピング制御の応答性向上をはかるため、電子スロットルの2次遅れモデルによる設計、さらにはバックステッピング制御にスライディングモード制御を組みあわせる合わせ方法などを進める予定である。

参考文献

- [1] Changyun Wen, Jing Zhou, "Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems", Springer Publication (2008)