

バックステッピング方式による電子スロットルの シミュレーション検討

Simulation study of electronic throttle control based on back-stepping approach

○三浦 昌宏*, 林 寛*, 栗原伸夫**

Masahiro Miura*, Hiroshi Hayashi*, 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

*Hachinohe Institute of Technology

キーワード : 自動車エンジン (Automotive Engine), 電子スロットル (Electronic Throttle),
バックステッピング制御 (Back-stepping 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。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。

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. 1 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.2 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。

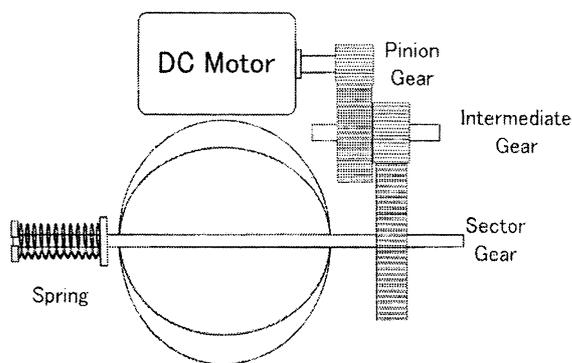


Fig. 1 電子スロットルの構造

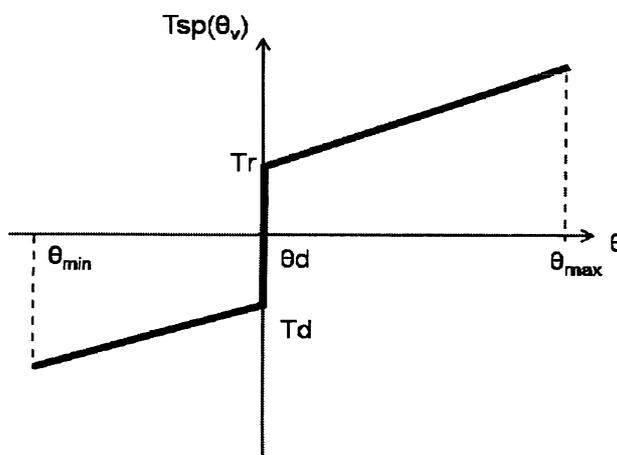


Fig. 2 スプリング特性

2.2 電子スロットルのモデリング

電子スロットルの物理モデルを構成部品ごとに次式で記述する。

直流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

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

直流モータ回路方程式

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

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. 2 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に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	バルブ開度	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

2.3 プログラミング

電子スロットルの物理モデル(1)~(4)式について、ラプラス変換した結果をブロック線図で表すと Fig. 3 となる。モータ電圧 V を入力としてバルブ開度 θ_v を出力とする一入力一出力の3次常微分モデルである。このブロック線図に従

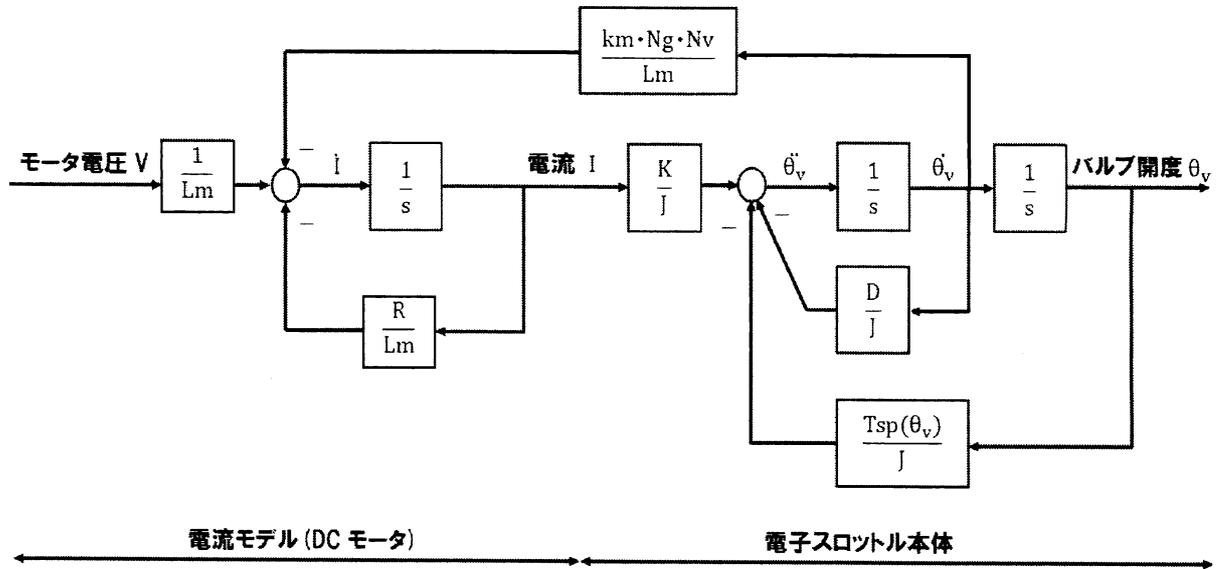


Fig. 3 電子スロットルモデル

って、Matlab/Simulinkを用いて同様なブロック線図形式のプログラミングを行った。電子スロットルの基本特性として単位ステップ応答を求めた結果がFig. 4である。この応答から、電子スロットル1次遅れモデルあるいは2次遅れモデルで近似できると考えられる。

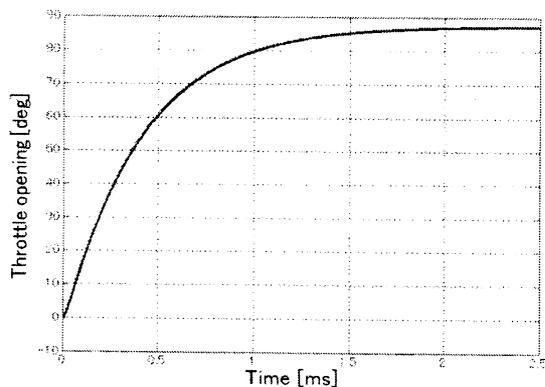


Fig. 4 電子スロットルの基本特性

3. 電子スロットル制御系の設計

3.1 バックステッピング制御法

バックステッピング制御 (Back-Step

ping Control : BSC) を用いた制御系は、以下の手順で設計される。

まず制御対象となる電子スロットルのモデルを状態方程式で記述する。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 & (5) \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + b(x, t)u & (6) \end{cases}$$

ここで、 $b(x, t) \neq 0$ とする。また、 u はモータ電圧 V 、 x_1 はスロットル開度 θ_v である。

3.1.1 BSC 設計ステップ 1

$$z_1 = x_1 - z_d \quad (z_1: \text{制御偏差}) \quad (7)$$

リアプノフ候補関数 V_1 を次式で定義する。

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (8)$$

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(x_2 - \dot{z}_d) \quad (9)$$

ここで、仮想目標値 α_1 を次式で定義する。

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 + \dot{z}_d \quad (10)$$

ここで、定数 $c_1 > 0$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1(x_2 - c_1 z_1 - \alpha_1) \\ &= -c_1 z_1^2 + z_1(x_2 - \alpha_1) \\ &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (z_2: \text{中間制御偏差}) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、中間制御偏差 $z_2 = 0$ のとき

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 \leq 0 \quad (12)$$

となるから、 V_1 はリアプノフ関数となり、 z_1 はゼロに収束する。

3.1.2 BSC 設計ステップ 2

リアプノフ候補関数 V_2 を次式で定義する。

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (13)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2\dot{z}_2 \quad (14)$$

ここで、

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = f(x, t) + b(x, t)u - \dot{\alpha}_1 \quad (15)$$

$$\dot{V}_2 = -c_1z_1^2 + z_1z_2 + z_2 \left[\begin{matrix} f(x, t) + \\ b(x, t)u - \dot{\alpha}_1 \end{matrix} \right] \quad (16)$$

ここで操作量 u を

$$u = \frac{1}{b(x, t)} [-c_2z_2 + \dot{\alpha}_1 - f(x, t) - z_1] \quad (17)$$

ただし、定数 $c_2 > 0$ 、と設計すれば、

$$\dot{V}_2 = -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 \leq 0 \quad (18)$$

となり、 V_2 はリアプノフ関数となるから z_1 はゼロに収束する。

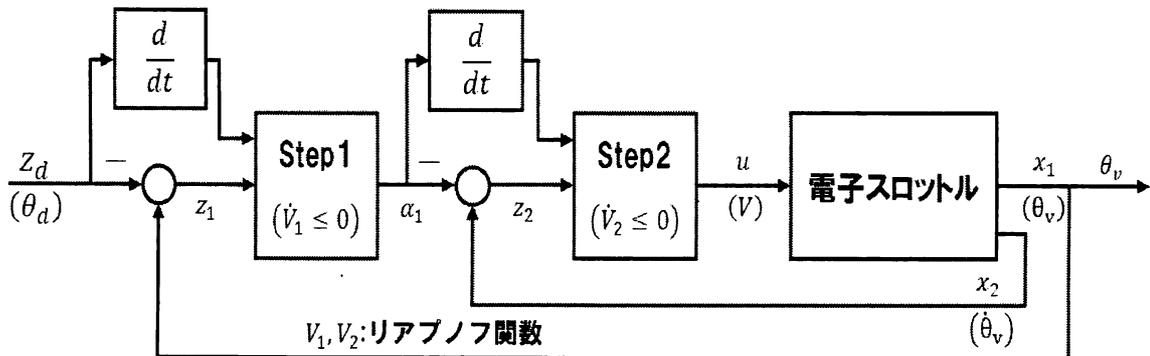
3.1.3 BSC設計のまとめ

バックステッピング制御系は上述した式から、Fig. 5 のブロック線図で表される。仮想目標値 α_1 及び、操作量 u はそれぞれ次式で与えられる。

$$\alpha_1 = -c_1z_1 + \dot{z}_d \quad (10)$$

$$u = \frac{1}{b(x, t)} [-c_2z_2 + \dot{\alpha}_1 - f(x, t) - z_1] \quad (17)$$

ここで、定数 $c_1, c_2 > 0$ とする。



バックステッピング制御ブロック線図

Fig. 5

3.2 電子スロットル制御 (1次モデル)

電子スロットルを1次遅れモデルで近似したグラフを Fig.6 で示す。立ち上がりの遅れ特性に差異がみられるが、0.5 [s]からはよく一致する応答が得られている。1次制御モデルを用いたバックステッピング制御とPI制御を Fig. 7 で比較する。

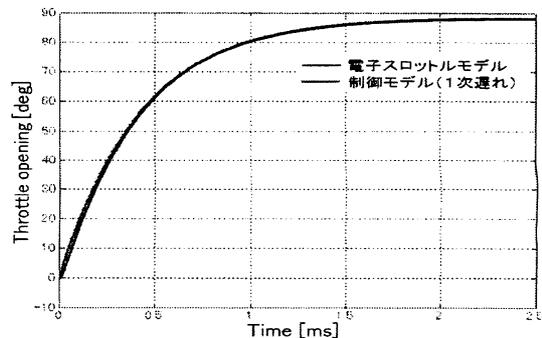


Fig. 6 電子スロットルモデルと1次制御モデル

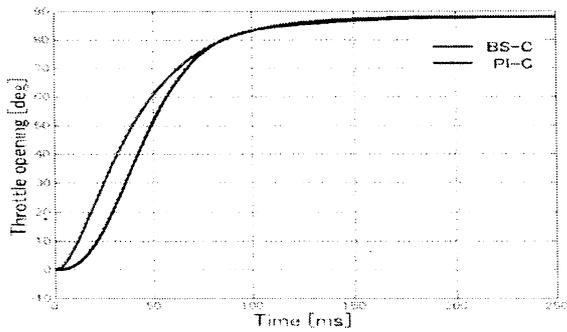


Fig. 7 全閉全開 (W.O.T) 応答による比較

ここで用いた1次制御モデルと定数 c_1, c_2 は、次の通りである。

$$f(x, t) = -1.4017, \quad b(x, t) = 0.3432$$

$$c_1 = 31.5, c_2 = 12.4$$

全閉から全開に開く (W.O.T) ときのステップ応答である。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。ここまでの結果からはPI制御が優れていることとなるが、次の3.3で述べるように、バックラッシュ特性を考慮するとBSCの効果が表れる。

3.3 バックラッシュモデルの挿入

電子スロットルが内蔵するギアトレイン部では、滑らかに回転させるために適切なバックラッシュを持たせている。つまり、一对のギアをかみ合わせるときの歯面間の遊びである。バックラッシュが小さすぎると潤滑が不十分になりやすく歯面同士の摩擦が大きくなり、一方、バックラッシュが大きすぎると噛み合いが悪くなってギアを破損させ易くなる。

バックラッシュの不感帯領域を次式で定式化する。

$$\dot{T}_v(t) = \begin{cases} m\dot{T}_v(t) & \text{if } \dot{T}_v(t) > 0 \text{ and } T_v(t) = m(T_v(t) - B_r) \\ \text{or} \\ m\dot{T}_v(t) & \text{if } \dot{T}_v(t) < 0 \text{ and } T_v(t) = m(T_v(t) - B_l) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

Fig. 8 が (19) 式のグラフで、パラメータは、 m : 傾き、 B_l, B_r : 不感帯の幅 となる。

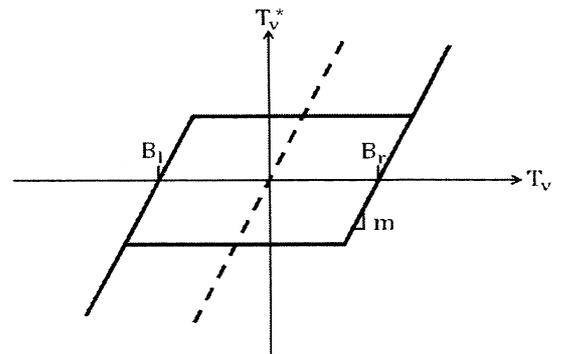


Fig. 8 バックラッシュの不感帯領域

制御対象である電子スロットルのシミュレーションモデルにバックラッシュモデルを挿入して、制御系の応答を全閉全開 (W.O.T) 応答で比較した結果を Fig. 9 で示す。バックステッピング制御とPI制御のどちらもバックラッシュの影響は見られない。制御偏差は正負反転となるが、両者とも同様に収束している。

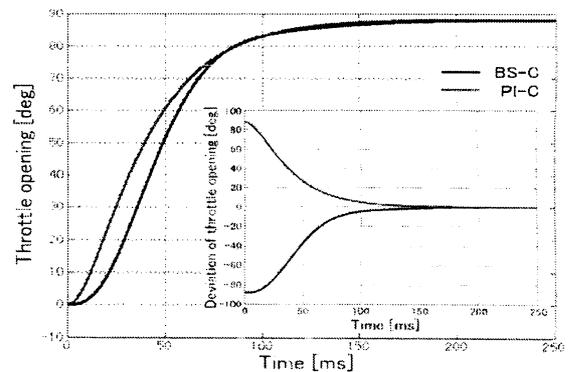


Fig. 9 全閉全開 (W.O.T) 応答による比較 (バックラッシュ有)

次に開弁角度を 3° から 4° まで開く微小開弁 (N.O.T) 操作での応答を Fig. 10 に示す。バックステッピング制御とPI制御を比較するとPI制御ではオーバーシュートが起こり、整定する角度が一定となり難しく、また収束時間もかかる。制御偏差の特性を見るとその原因が分かる。つまり、制御偏差がゼロとなるように積分を続け、方向が変わるとまた積分を続けるためである。このように、PI制御ではバックラッシュの影響が大きい。一方、バックステッピング制御では影響が全く見られない。この事は、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分解能を向上できることを示唆している。

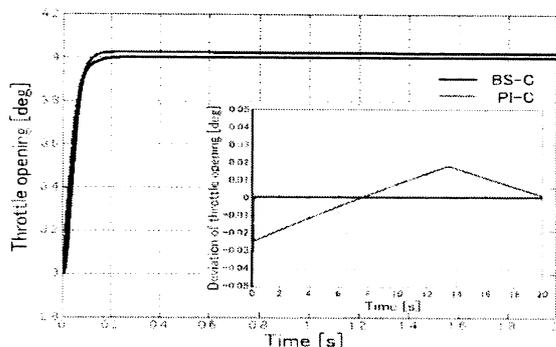


Fig. 10 微小開弁 (N.O.T) 応答による比較

3.4 電子スロットルの分解能

電子スロットルの分解能が高くなるほど吸気制御の精度を向上できる。しかし、微小な開弁操作には限界がある。分解能の試験として、スロットル開度を 0.05° 毎に開けたときの応答を Fig. 11 に示す。

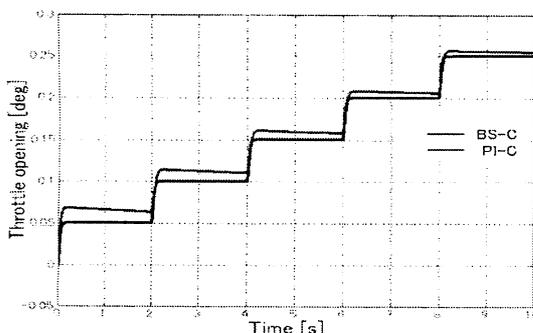


Fig. 11 分解能に関する特性比較

PI 制御ではバックラッシュの影響により位置が定まらない。一方、バックステッピング制御では、目標値が 0.05° 毎に変化するのに応じて開度が追従している。

4. 応答性の改善

4.1 バックステッピング制御 (2次モデル)

電子スロットルの高応答性を図るため、2次遅れモデルの積分型バックステッピング制御系を設計する。電子スロットルを2

次遅れモデルで近似したグラフを Fig. 12 に示す。

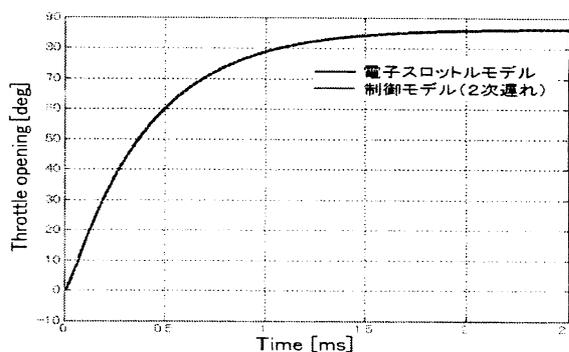


Fig. 12 電子スロットルと制御モデルの近似

同じ様に制御対象である電子スロットルを2次遅れモデルで近似し、パラメータの調整を行った。使用したパラメータを以下に示す。

$$f(x, t) = -9.9x_2 - 23.57$$

$$b(x, t) = 24$$

$$c_1 = 9.8, c_2 = 15$$

電子スロットルを全閉から全開に開いたとき (W.O.T) の安定限界までパラメータの調整を行った。そのときのシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。

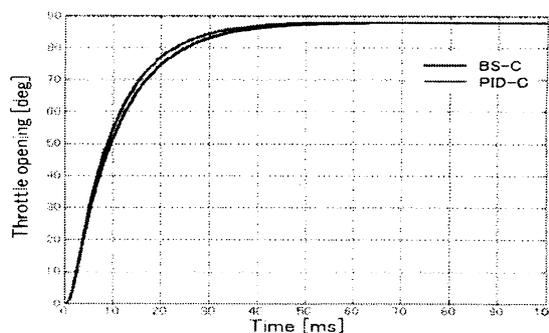


Fig. 13 BS 制御 (2次遅れモデル) と PI 制御の比較

95% 応答で、PI 制御が 27[ms]、バックステッピング制御は 30[ms] という高応答性が得られ、両方式ともに大幅に改善されている。また、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も改善されている。バックラッシュ特性を追加した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結果を Fig. 14 に示す。

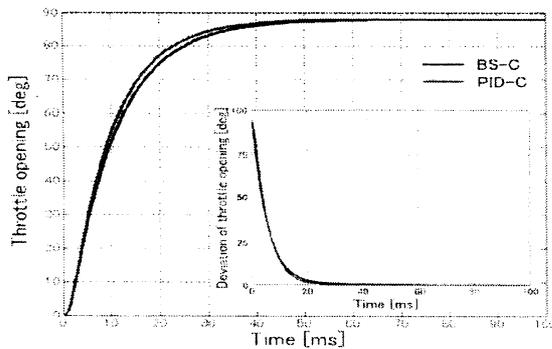


Fig. 14 電子スロットルの全開特性

次の Fig. 15 は、開度を 3° から 4° まで開いた結果である。

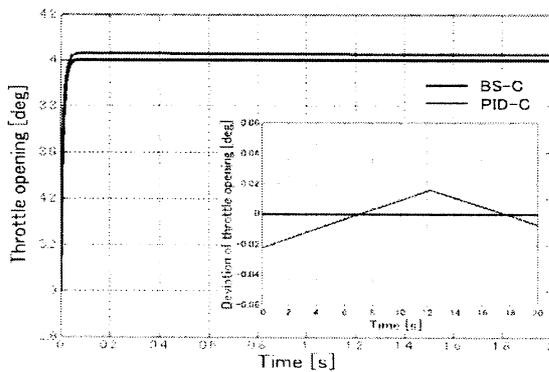


Fig. 15 電子スロットルの微小開度特性

4.2.2 2次モデルを用いた分解能の確認

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. 16 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。

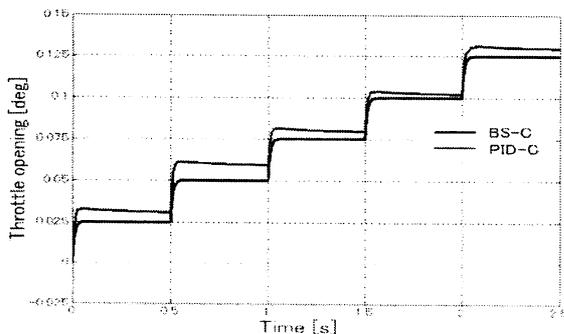


Fig. 16 分解能に関する特性比較

5. 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/Simulation 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 次遅れモデルと 2 次遅れモデルでそれぞれ近似し、バックステッピング制御を設計してシミュレーションにより制御性能を比較した。

- (1) 1 次遅れ制御モデルを用いた場合、バックステッピング制御は PI 制御と比較して応答遅れを生じる。しかし、バックラッシュの影響を全く受けない。
- (2) 2 次遅れ制御モデルを用いた場合、バックステッピング制御は PI 制御と同様な応答が得られる。ここでも、バックラッシュの影響を全く受けない。
- (3) PI 制御は全閉全開操作 (W.O.T) であればバックラッシュの影響は無視できる。しかし、微小開弁操作 (N.O.T) になると非線形ホロノミック系としての問題点を生じて、整定開度が定まらなくなる。

以上のように、電子スロットルに 2 次遅れ制御モデルを用いたバックステッピング制御を適用することで、応答性を維持したまま、分解性能を向上出来る可能性が明らかとなった。今後の課題として、バックステッピング制御の、さらなる応答性の向上を目指す。

参考文献

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