

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

林 寛[†]・張 揚^{††}・栗原 伸夫^{†††}

Electronic throttle control based on back-stepping approach

Hiroshi Hayashi[†], Yang Zhang^{††} and Nobuo Kurihara^{†††}

ABSTRACT

An application of the back-stepping control theory was tried for the electronic throttle of automobile engines. There is a back rush in the electronic throttle to have gear train. Therefore, it is a non-holonomic system in which throttle openings don't necessarily become the same even if the same control input should be given. In this paper, the physical model of electronic throttle to be the control object was described, and the usual PID control and the back-stepping control were applied respectively and compared mutually by using Matlab/Simulink simulation. From the results, it became clear that the resolution of throttle openings was greatly improved without injuring the response by applying the back-stepping control.

Key Words: non-holonomic, non-linear control, back-stepping, electronic throttle, engine, automobile

キーワード: 非ホロノミック、制御、バックステッピング、電子スロットル、エンジン、自動車

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普及してきている。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に主として用いられる。

電子スロットルを構成する要素は、直流モータ、減速ギア、バタフライ弁であり、その構造は簡素である。しかし非線形かつ非ホロノミッ

クという特性があることから、制御系の設計は単純ではない。これらの特性は、リンプホーム機構を実現させるための2種類のスプリングと直流モータ回転数を減速するギアトレインに内在するバックラッシュに起因する。電子スロットル制御系には、従来から比例積分微分(PID)制御が適用されている。そしてPID制御では、制御対象の非線形性を補償するために、制御偏差に応じた制御ゲインの調整が必要となり、この行程に過大な労力を伴うことが課題となっている。さらなる課題は、スロットル開度の分解能を向上させることである。パワートレインにおけるトルク制御の円滑化やエミッション制御の高性能化には、吸気量の微細な調整が求められるからである。

非ホロノミック系の非線形適応制御理論と

平成 23 年 1 月 14 日受理

[†] 工学研究科機械・生物化学工学専攻博士前期課程・2 年

^{††} 工学研究科機械システム工学専攻博士後期課程・3 年

^{†††} 工学研究科・システム情報工学科・教授

して、1990 年代にリアプノフ安定論に基づくバックステッピング制御理論が提案された¹⁾。

本研究は、自動車用の電子スロットルにバックステッピング制御を適用して、従来の PID 制御と比較してその効果を検証するものである。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

自動車エンジンで用いられる電子スロットルの構造をFig.1に示す。構成部品は、直流モータ、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。ここで、スプリングは閉弁用とリンプホーム機能を実現するための開弁用との2種類があり、これらを組み合わせたスプリング特性はFig.2で示すように強度の非線形性を持つ。

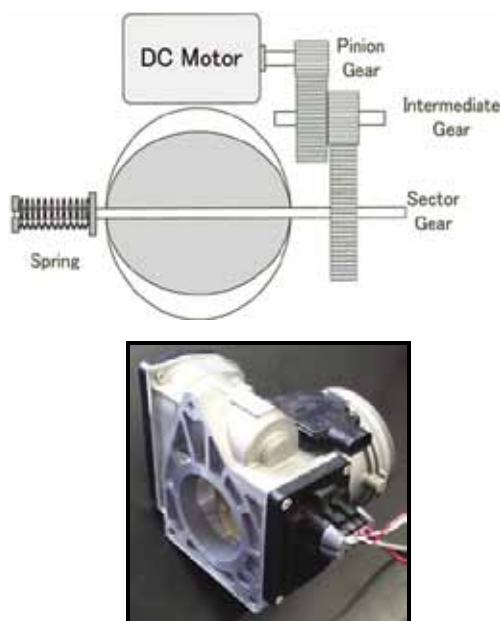


Fig. 1 電子スロットル

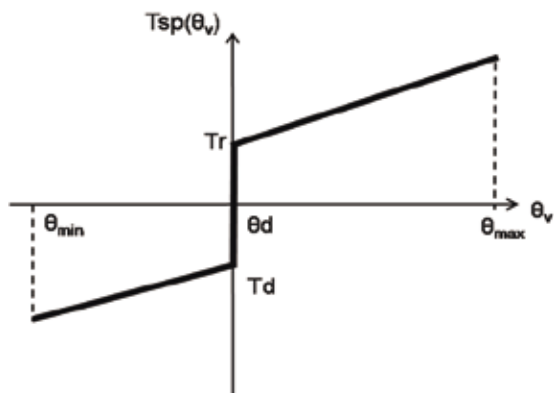


Fig. 2 スプリング特性

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

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

スプリング特性式

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

(1)～(4)式で用いた主な記号を Table 1 に記す。モータ抵抗 R や粘性係数 D_m, D_g, D_v は温度によって変化するがここでは一定とした。(2)式 of バルブ回転運動方程式では、静止摩擦を省略した。また、(4)式で記述したスプリング特性を 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、直流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出力の3次常微分モデルである。このブロック線図に従って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。

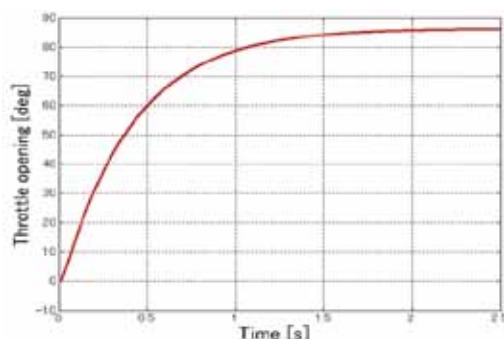


Fig. 4 電子スロットルの基本特性

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-Stepping 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。

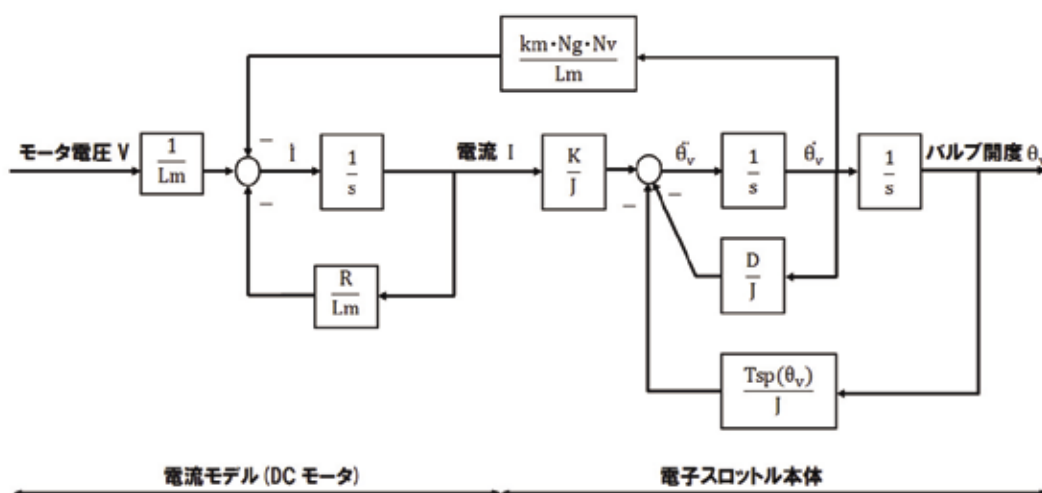


Fig. 3 電子スロットルモデル

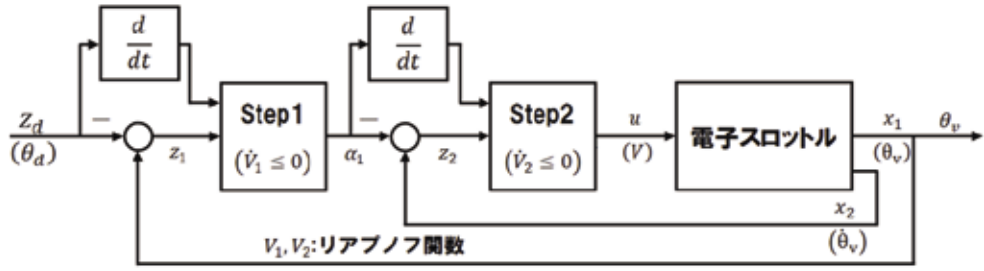


Fig. 5 バックステッピング制御系のブロック線図

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

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 $c_1 > 0$

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

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、

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

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 [f(x, t) + b(x, t)u - \dot{\alpha}_1] \quad (16)$$

ここで操作量 u を

$$u = \frac{1}{b(x, t)} [-c_2 z_2 + \dot{\alpha}_1 - f(x, t) - z_1] \quad (17)$$

ただし、定数 $c_2 > 0$ 、と設計すれば、

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 \leq 0 \quad (18)$$

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 および操作量 u は、それぞれ次式で与えられる。

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

$$u = \frac{1}{b(x, t)} [-c_2 z_2 + \dot{\alpha}_1 - f(x, t) - z_1] \quad (17)$$

ここで、定数 $c_1, c_2 > 0$ とする。

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] からは良く一致する応答が得られている。

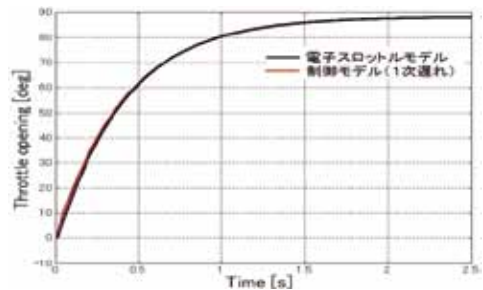


Fig. 6 電子スロットルモデルと 1 次制御モデル

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。

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。

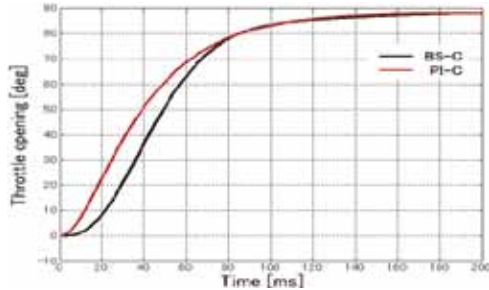


Fig. 7 全閉全開 (W. O. T.) 応答による比較
(バックラッシュ無)

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。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。

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

Figure 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。

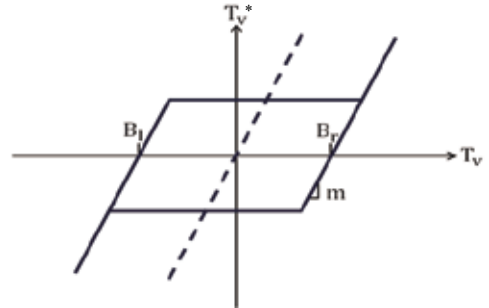


Fig. 8 バックラッシュの不感帯領域

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.) 応答と比較した結果を 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。

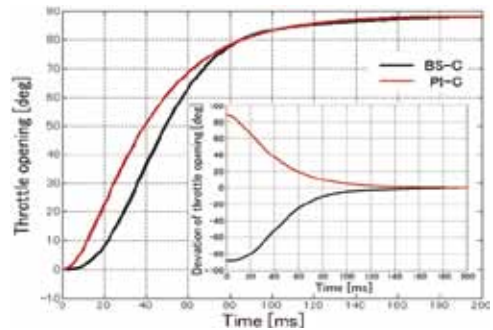


Fig. 9 全閉全開 (W. O. T.) 応答による比較
(バックラッシュ有)

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。このことは、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。

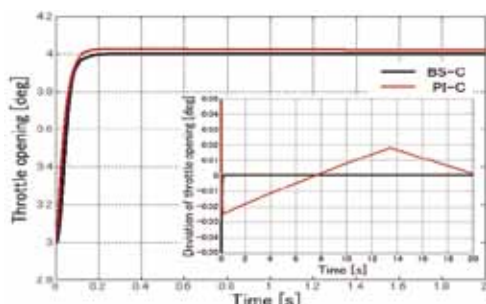


Fig. 10 微小開度 (N. O. T.) 特性

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。

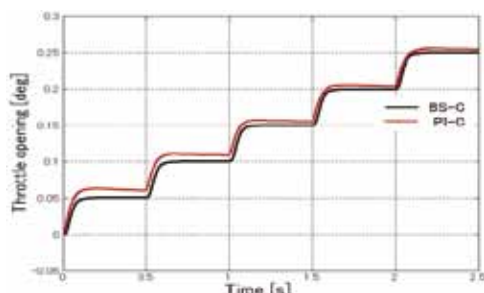


Fig. 11 分解能に関する特性比較

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はかるため、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。

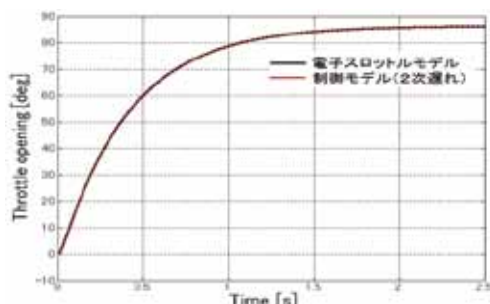


Fig. 12 電子スロットルと 2 次制御モデル

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を調整した。そのときのシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。95%応答で PI 制御が 75[ms]、バックステッピング制御は 78[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ときの定常偏差を表した実行結果を Fig. 14 に示す。次の Fig. 15 は、開度を 3° から 4° まで開いた結果である。

4.1 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 0.025° 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 0.025° 毎に開度を開けることができた。

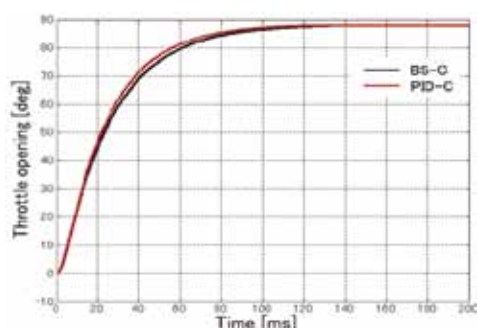


Fig. 13 全閉全開(W.O.T.)応答による比較

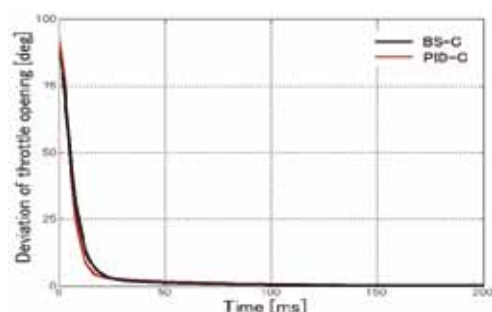


Fig. 14 W.O.T. 応答における制御偏差

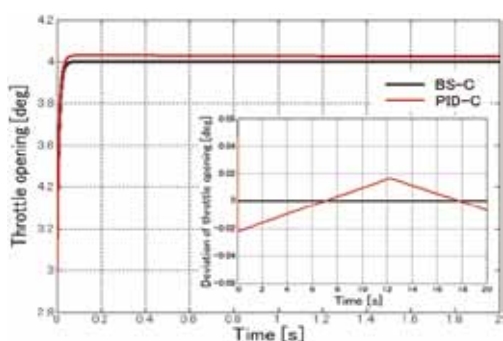


Fig. 15 微小開度(N.O.T.)特性

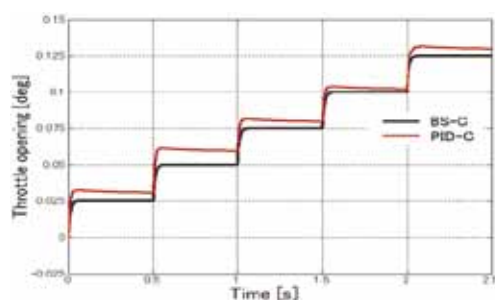


Fig. 16 分解能に関する特性比較

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/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まったく受けない。
- (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まったく受けない。
- (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能を向上でき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における定数 c_1 、 c_2 の簡便なチューニング法の確立が必要である。

参考文献

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