

低次モデルによる電子スロットルのバックステッピング制御

Back-stepping Control using Low-order model for Electronic Throttle

○ 栗原伸夫*

Nobuo Kurihara *

*八戸工業大学

*Hachinohe Institute of Technology

キーワード：非線形制御 (Automobile Engine), バックステッピング制御(Back-stepping Control),
制御系設計(Electronic Throttle), 電子スロットル (Electronic Throttle), 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

自動車の燃費低減・排気抑制をはかるうえで電子スロットルが普及されている。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。制御対象としての特性は複数のスプリングとギアトレインでのバックラッシュから非線形系かつ非ホロミック系である。PID 制御が使われているが、制御偏差に依存したゲイン調整に手間取ること、また分解能に限界があることが課題である。

本研究は、バックステッピング制御(以降 BSC)を取り上げて、電子スロットルへの適用につき Matlab/Simulink シミュレーションにより検討する。

2. 制御系の設計

2.1 線形二次の制御モデル

BSC 設計にあたり制御対象を二次遅れ要素で近似できるものとした。PID 設計と同等条件とすることで現行との違和感を少なくするためである。 u をモータ電圧 V 、 x_1 をスロットル開度 θ_v とすると、制御モデルは次式で表記できる。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + bu \end{cases} \quad (1)$$

2.2 制御則の設定

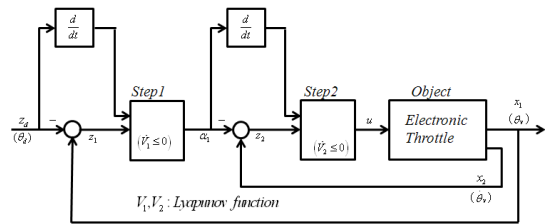


Fig. 1 電子スロットルの BSC 制御系

BSC 制御系においてステップ 1 の制御偏差 z_1 およびその変化率 \dot{z}_1 は、(2) (3) 式である。

$$z_1 = x_1 - z_d \quad (2)$$

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{z}_d = x_2 - \dot{z}_d \quad (3)$$

ステップ 1 の制御則として、仮想目標値 α_1 を (4) 式で定義する。ここで従来の BSC¹⁾ を修正して、 $d_1 \dot{z}_1$ を加える微分型 BSC (D-BSC) とした。微分項で制御系の応答を高めるものである。

$$\alpha_1 = z_d - (c_1 z_1 + d_1 \dot{z}_1) \quad (4)$$

ここで、定数 $c_1 > 0$ 、定数 $d_1 \geq 0$ である。

制御則の安定性は次のように保証される。

Lyapunov 候補関数 V_1 を (5) 式で定義すると、

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (5)$$

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{1+d_1} (-c_1 z_1^2 + z_1 z_2) \quad (6)$$

が誘導される。中間制御偏差 $z_2 = 0$ であれば、

(7)式のように V_1 はLyapunov関数となり、制御偏差 z_1 はゼロに収束する。

$$\dot{V}_1 \leq 0 \quad (7)$$

ステップ2の制御則として、操作量 u を(8)式で定義する。ここで制御モデルとして(1)式で示す線形二次のモデルが組込まれている。

$$u = \frac{1}{b} (\dot{\alpha}_1 - c_2 z_2 - a_1 x_1 - a_2 x_2 - z_1) \quad (8)$$

ここで、定数 $c_2 > 0$ である。

制御則の安定性は次のように保証される。

Lyapunov候補関数 V_2 を(9)式で定義すると、

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2(1+d_1)} z_2^2 \quad (9)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{(1+d_1)} (-c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2) \leq 0 \quad (10)$$

(10)式のように V_2 はLyapunov関数となり、制御偏差 z_1 はゼロに収束する。二次遅れ制御モデルを用いたD-BSCを整理してFig.2に示す。

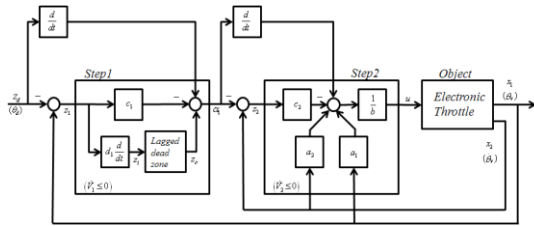


Fig. 2 D-BSC 制御系 (提案)

ここで、微分項により定常偏差が残るため、(11)式の不感帯を挿入することで制御偏差 z_1 に応じて微分項ゲインを漸減させている。

$$z_o(t) = z_i(t) + L(e^{-z_i(t)/L} - 1) \quad (11)$$

3. 電子スロットル制御

3.1 電子スロットルモデル

電子制御スロットルのシミュレーションモデルをFig.3で示す。駆動回路方程式と回転運動方程式による線形要素にギアトレインのバックラッシュモデルを非線形要素として挿入した。

3.2 シミュレーション結果

分解能を調べるために0.025[deg]の連続ステ

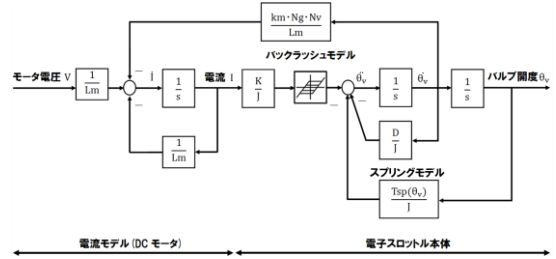


Fig. 3 電子スロットルのブロック線図モデル

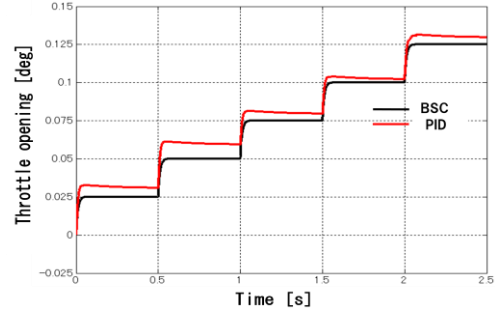


Fig. 4 微小ステップ変化の応答

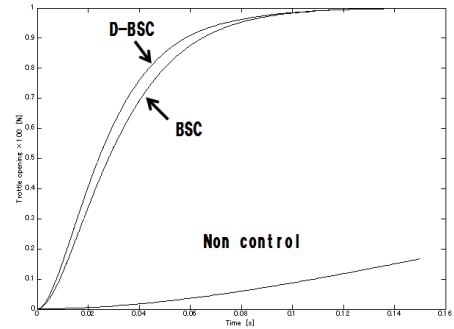


Fig. 5 全閉全開変化の応答

ップ変化を与えた応答をFig.4に示す。BSCはPIDに比べてバックラッシュの影響を受けない。また、BSCは応答が遅くなる課題があったが、D-BSCにより解決できることがFig.5の結果が示している。

4. おわりに

バックステッピング制御は位置決め問題などに効果的であるがあまり普及していない。PIDに比べて設計が複雑になったり、応答が低下したりすることが要因と思われる。本研究ではこれらを解決して、電子スロットル制御を例にBSCの性能が極めて優れていることを示した。

参考文献

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