スライディングモード制御による電子制御 スロットルシステムの位置制御

ウメルジャン サウット*・樋口 幸治**

中野 和司**・松尾 孝美***

Position Control of Electronic Throttle Chamber Using Sliding-Mode Controller with Prescribed Transient Response

Sawut UMERUJAN*, Kohji HIGUCHI**,
Kazushi NAKANO** and Takami MATSUO***

With increasing demand for high fuel efficiency, better exhaust control measures, comfort and high performance on current vehicles, electronic control of the throttle chamber which decides the engine output, is getting advanced day by day. It is expected that this trend will be maintained towards electronic control of the throttle chamber in conjunction with injection air-amount control, drive control, traction control, etc. A control method for electronic throttle servo system is proposed, which consists of a DC motor, a throttle valve and a return spring. The control method fulfills the demand for high robustness in nonlinear opening of the throttle. In this paper, a sliding-mode controller with prescribed transient response is designed for electronic throttle chamber systems. By using a function augmented sliding hyperplane, it is guaranteed that the output tracking error converges to zero in a finite time. Simulation and experimental results are shown for the confirmation of effectiveness of the sliding-mode controller with prescribed transient response.

Key Words: throttle chamber, VSS observer, function augmented sliding-mode control

1. はじめに

自動車エンジンの発展の原動力になった燃費改善、排気ガス対策については、国内規制の対応に目処が付き、エンジン系の制御は動力性能と快適性の追求にシフトした。その後、いっそうの低燃費、排気ガス浄化、快適性などの向上を求めて、エンジン系と駆動系をトータルに制御する方向に進展してきている。このように制御への要求仕様が多様化・高度化していく中で、エンジンの目標出力を決定するスロットルチャンバの電子制御化も急速に進んでおり、今後もさらにその傾向は続くものと思われる。このスロットルチャンバの電子制御技術により、直噴エンジンの空気量制御、アイドル空気量制御、トラクションコントロール制御などの機能を取

り込み、高精度な統合システムを構築することが可能となる^{1)~3)}。

本論文では、DC モータ、バタフライ弁、リターンスプリングから構成された、スロットル角度に高いロバスト性が要求される電子制御スロットルサーボ系に対するモデリングおよびロバストスライディングモード制御を用いた場合の設計法について述べる。まず、通常のスロットル角度だけ用いた通常のフィードバック制御では性能が不十分であるため、非線形 VSS (Variable Structure System) オブザーバを用いたスライディングモード制御系を提案する。この制御系はファンクションオーグメントスライディング切換超平面^{4),5)}を用いるもので、これにより出力軌道誤差を有限時間で 0 に収束させることができる。さらに、制御対象のパラメータによってスライディングモードを生じるとき制御入力およびスロットル角度にチャタリングが発生したり、ノイズによる振動が無視できなくなる場合がある。この問題を解決するために飽和関数を用いたスライディングモード制御器の設計法についても述べる。最後に、提案手法の有効性をシミュレーションおよび実機による実験によって実証する。

* (株) ニッキ 厚木市上依知 3029

** 電気通信大学 調布市調布ヶ丘 1-5-1

*** 大分大学 大分市旦野原 700

* NIKKI Co., Ltd., 3029 Kamiechi, Atsugi

** The University of Electro-Communications, 1-5-1
Chofu-ga-oka, Chofu

*** Oita University, 700 Dannoharu, Oita

(Received November 10, 2003)

(Revised April 13, 2004)

2. 電子制御スロットルシステムの数式のモデル

制御をうまく行なうためには、制御対象の特性をいかによく知るかということが大切である。制御対象の基本的な構造しかわかっていないと、望ましい制御結果を得ることは困難である。本研究では、Fig.1 に示すような電子制御スロットルシステムを制御対象とし、その数式モデルを以下のように求める^{6)~8)}。

Fig. 1 Electronic throttle chamber system

電機子における電流と電圧の関係は次式で表わされる。

$$L \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_e N \frac{d\theta}{dt} = U_a \quad (1)$$

ここに、 i_a は電機子電流、 U_a は電機子両端の入力電圧、 L と R_a は電機子のインダクタンスと抵抗、 K_e は誘起電圧定数、 N はギヤ比で、 θ はスロットル角度である。一方、電機子に加わる電磁的なトルクを $T = K_t i_a$ とすれば、電子制御スロットルシステムの動特性は次式のように表わされる。

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + d_k \operatorname{sgn}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) + K_s \theta = N K_t i_a \quad (2)$$

ここに、 J は系のスロットル軸換算での全慣性モーメント、 D は粘性摩擦係数、 d_k はクーロン摩擦で、 K_s はリターンスプリングのばね定数である。電機子のインダクタンス成分 L は無視できるとして、(1) 式を (2) 式に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -\frac{1}{J} \left(D + \frac{N^2 K_t K_e}{R_a} \right) \dot{\theta} \\ & - \frac{1}{J} d_k \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - \frac{1}{J} K_s \theta + \frac{N K_t}{R_a J} U_a \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式において状態変数を $x_1 = \theta$ 、 $x_2 = \dot{\theta}$ とおけばシステムの状態方程式と出力方程式はつぎのように求められる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} x_2 \\ a_1 x_1 + a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + a_3 x_2 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} U_a \end{aligned} \quad (4)$$

$$y = x_1 \quad (5)$$

上の (4) 式では

$$a_1 = -\frac{K_s}{J}$$

$$a_2 = -\frac{d_k}{J}$$

$$a_3 = -\left(\frac{D}{J} + \frac{N^2 K_t K_e}{R_a J}\right)$$

$$b_1 = 0$$

$$b_2 = \frac{N K_t}{R_a J}$$

であり、(5) 式の y は観測値である。

3. 制御系の設計

3.1 非線形 VSS オブザーバの設計

ここでは、(5) 式のようにシステムの状態のうちスロットル角度しか測定できないとする。このようなスロットル角度のみのフィードバックでは制御性能において不十分であるため、ここですべての状態量を推定する機能をもつ状態オブザーバを設計する。まず、(4) 式と (5) 式を次式のように書き直す。

$$\dot{x} = f(x) + b U_a \quad (6)$$

$$y = c^T x \quad (7)$$

ここで、状態ベクトル x をつぎのように定義する。

$$x = [x_1 \ x_2]^T \quad (8)$$

また、

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ a_1 x_1 + a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + a_3 x_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

であり、 $b = [0 \ b_2]^T$ 、 $c = [1 \ 0]^T$ である。

この非線形系に対して、下記のようなシステムの全状態量を推定するロバスト VSS オブザーバを設計する^{9), 10)}。

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}) + b U_a + b \zeta \operatorname{sgn}(\bar{y}) + k \bar{y} \quad (10)$$

$$\bar{y} = \hat{y} - y = c^T (\hat{x} - x) \quad (11)$$

ここで

$$\operatorname{sgn}(\bar{y}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \bar{y} > 0 \\ 0 & \text{if } \bar{y} = 0 \\ -1 & \text{if } \bar{y} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

であり、 $\hat{x}$ はシステム状態の推定値を表わし、 $k = [k_1 \ k_2]^T$ はオブザーバゲイン行列、 $b \operatorname{sgn}(\bar{y})$ はオブザーバの非線形補償入力項、 ζ はスカラーゲインである。推定誤差を

$$e_r = \hat{x} - x \quad (13)$$

とおくと、誤差システムはつぎようになる。

$$\begin{aligned} \dot{e}_r = & f(\hat{x}) - f(x) + k c^T e_r \\ & + b c^T \zeta \operatorname{sgn}(e_r) \end{aligned} \quad (14)$$

上式のオブザーバゲイン k は、(14) 式が安定となるように

$$J_i = \int_0^{T_i} \bar{y}^2(t) dt \quad (15)$$

を最小にするように遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて決定することができる (詳細については参考文献 6) を参照されたい)。

3.2 スライディングモード制御系の設計

従来のPID制御では目標値やシステムパラメータ（電圧や負圧）などが変化した場合は、同じ制御パラメータで制御が困難であるためP, I, Dの各ゲインも同時に変化させなければならないなどの欠点がある。この問題に対してPID制御の代わりにロバストスライディングモード制御を提案する。

スライディングモード制御のロバスト性は、最もきわだった特性の一つである。線形または非線形の高次微分方程式で表わされたプラントに対して、スライディングモード超平面の微分方程式はシステムのモデル化誤差と不可観測な外生入力による影響を完全になくすることができるものである。このようにスライディングモードはシステムのモデル化誤差や外乱などに対してロバストというより不変であるといえよう。よって、スライディングモード制御は、線形系はもちろん非線形系、パラメータ変動系、時変系など、未知パラメータや未知外乱を有する系に容易に適用でき、後述するように希望の特性を切換面として設計すれば、システムの状態は所望の特性に拘束され適応していくことになる。この結果、スライディングモード制御は、制御入力が一変連続的に変化する非線形制御と、スライディングモードが存在すればそれにそって適応していく適応制御の両面をもっていることになる。制御の目的は、切換面上にない状態を切換面に収束させ、その面上に保つことである。なお切換超平面の設計は基本的には線形制御理論のすべてを適用できる^{11), 12)}。

状態ベクトルはオブザーバによる推定値を用いることにし、(6)式の非線形系に対するファンクションオーグメントスライディング切換超平面 $s(t)$ として、次式を定義する^{4), 5)}。

$$s(t) = s_1 e(t) + s_2 \dot{e}(t) - z(t) \quad (16)$$

ここに、 $e(t) = x_1(t) - x_d(t)$ であり、 $x_d(t)$ は2回連続微分可能な規範軌道（目標出力）、 s_1, s_2 は正定数、 $z(t) = s_1 q(t) + s_2 \dot{q}(t)$ 、 $q(t)$ は増大関数である。 $q(t)$ はある境界区間 $[0, t_f]$ 、 $t_f > 0$ によって設計する。また、 $q(t)$ 、 $\dot{q}(t)$ に対して初期条件をそれぞれ $q(0) = e(0)$ 、 $\dot{q}(0) = \dot{e}(0)$ と定義すると、この条件より明らかにシステムの状態が最初の瞬間にスライディング切換超平面上にあることがわかる。すなわち、 $s(0) = 0$ である。したがって、提案されたスライディング切換超平面(16)式を用いることによって、スライディングモードの存在に対してつぎの結論が得られる。もし、スライディングモード制御入力

$$U_a = K_p[-s_1 \dot{e} + s_2(\ddot{x}_d - a_1 x_1 - a_2 \operatorname{sgn}(x_2) - a_3 x_2) + s_1 \dot{q} + s_2 \ddot{q} - P \operatorname{sgn}(s)] \quad (17)$$

がプラント(4)式に適用されるなら、このシステムは常にスライディングモード状態にある。すなわち、 $s(t) \equiv 0$ $\forall t > 0$ である。ここに

$$P = \delta[s_1 \dot{e} - s_2 \ddot{x}_d + s_2(a_1 x_1 + a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + a_3 x_2) - s_1 \dot{q} - s_2 \ddot{q}] + \eta \quad (18)$$

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (19)$$

であり、 $\eta > 0$ 、 $K_p > 0$ 、 $\delta > 0$ である。

切換超平面 s に関するリアプノフ関数の候補を

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (20)$$

とすると、その時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(s_1 \dot{e} + s_2 \ddot{x}_2 - s_2 \ddot{x}_d - \dot{z}) \\ &= s[s_1 \dot{e} - s_2 \ddot{x}_2 - \dot{z} \\ &\quad + s_2(a_1 x_1 + a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + a_3 x_2 + b_2 U_a)] \\ &= s\{s_1 \dot{e} - s_2 \ddot{x}_2 - \dot{z} \\ &\quad + s_2(a_1 x_1 + a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + a_3 x_2) \\ &\quad + \beta[-s_1 \dot{e} + s_2 \ddot{x}_d + \dot{z} - s_2 a_1 x_1 \\ &\quad - s_2 a_2 \operatorname{sgn}(x_2) - s_2 a_3 x_2 - P \operatorname{sgn}(s)]\} \\ &= s[(1 - \beta)(s_1 \dot{e} - s_2 \ddot{x}_d - \dot{z} + s_2 a_1 x_1 \\ &\quad + s_2 a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + s_2 a_3 x_2) - \beta P \operatorname{sgn}(s)] \quad (21) \end{aligned}$$

となる。ここに、 $\beta = K_p s_2 b_2 > 0$ である。それで、各パラメータの定義より、 $\delta > |\beta - 1|/\beta$ となるように δ を決定すれば、(21)式はつぎのように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s[(1 - \beta)(s_1 \dot{e} - s_2 \ddot{x}_d - s_1 \dot{q} - s_2 \ddot{q} + s_2 a_1 x_1 \\ &\quad + s_2 a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + s_2 a_3 x_2) - \beta \delta |s_1 \dot{e} - s_2 \ddot{x}_d \\ &\quad + s_2 a_1 x_1 + s_2 a_2 \operatorname{sgn}(x_2) + s_2 a_3 x_2 \\ &\quad - s_1 \dot{q} - s_2 \ddot{q}| \operatorname{sgn}(s) - \beta \eta \operatorname{sgn}(s)] < -\beta \eta |s| \quad (22) \end{aligned}$$

したがって、 $\dot{V} < 0$ となりリアプノフの定理より安定なスライディングモード制御を実現できる。制御パラメータは、GAを用いてつぎの評価関数を最小にするように決定した。最終的には、 $s_1 = 10.872$ 、 $s_2 = 0.278$ 、 $K_p = 0.142$ 、 $\delta = 5.802$ 、 $\eta = 0.325$ となった（詳細については参考文献6)を参照されたい）。

$$J_j = \int_0^{T_j} |e(t)| dt \quad (23)$$

なお、Fig.2は設計した制御系のブロック図である。

4. シミュレーションおよび実験結果

4.1 実験条件

前章で提案した手法の有効性を確認するために、シミュレーションおよび実験による実験を行なった。シミュレーションおよび実験において、入出力信号のサンプリング周期 $\Delta t = 0.4$ [ms]、 $T_i = T_j = 5$ [s]、初期状態 $x_1(0) = 5.0$ [deg]、 $x_2(0) = 0$ [deg/s]、目標値 $x_d = 60.0$ [deg]、 $\dot{x}_d = 0$ [deg/s]、目標値に達するまでの時間 $t_f = 0.4$ [s]とする。ほかの設計パラメータはTable 1のとおりである。また、ファンクションオーグメントスライディングモード切換超平面の設計に用いる増大関数 $q(t)$ を次式によって定義する。

Fig. 2 Block Diagram of Overall Systems

Table 1 Parameters

symbols	values
a_1	-1.024×10^1
a_2	-0.295
a_3	-7.565×10^1
b_2	5.378×10^2
k_1	-7.065×10^2
k_2	1.028
ζ	1.250

$$q(t) = \begin{cases} v_0 + v_1 t + v_2 t^2 + v_3 t^3 & \text{if } 0 < t < t_f \\ 0 & \text{if } t \leq t_f \end{cases} \quad (24)$$

ここに,

$$v_0 = e(0)$$

$$v_1 = \dot{e}(0)$$

$$v_2 = -3v_0/t_f^2 - 2v_1/t_f$$

$$v_3 = 2v_0/t_f^3 + v_1/t_f^2$$

である。これは出力軌道を表わす関数であり、設計者が自由に定めることができる。たとえば、目標値への収束速度を設定することもできる（ここでの実験においては、システムの時定数を考慮し、 $t_f > 0.23[s]$ としなければならないことがわかっている）。

4.2 シミュレーション結果および検討

Fig.3, Fig.4, Fig.5はスロットル角度 x_1 および角速度 x_2 , 位相軌道および sgn 関数を用いた場合の制御入力をそれぞれ示している。

シミュレーション結果から、スロットル角度は指定された時間で目標値に収束しているが、過渡応答中にチャタリング現象により制御入力およびスロットルバルブに高周波振動が起っていることがわかる。これらは、サンプリング周期を無限小にすることができないため、現実のスライディングモードは切換面を滑ることにはならず、その近傍でチャタリングすることになり、入力的高速切換によって起った現象である。ここで、チャタリングを除去するため、通常よく行なわれるように sgn 関数の代りにつぎの飽和 (sat) 関数を採用する。すなわち

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sgn}(s) & \text{if } |s| > \phi \\ s/\phi & \text{if } |s| \leq \phi \end{cases} \quad (25)$$

Fig. 3 Simulated throttle angle and angular velocity

Fig. 4 Simulated phase portrait

Fig. 5 Simulated control input

とする。ここに、 $\phi > 0$ はチャタリングを除去するために用いられる定数である。

Fig.6, Fig.7, Fig.8はスロットル角度 x_1 および角速度

x_2 , 位相軌道および sat 関数を用いた場合の制御入力をそれぞれ示している。

Fig. 6 Simulated throttle angle and angular velocity with sat-function

Fig. 7 Simulated phase portrait with sat-function

以上の結果から明らかのように, 制御入力およびスロットル角度ともにチャタリングを起こさず, 指定された時間 t_f で目標値に収束しており, 設計したスライディングモード制御は安定に動作していることがわかる。

4.3 実験結果および検討

Fig.9, Fig.10, Fig.11 は, シミュレーションと同様の条件で実機による実験を行なった場合のスロットル角度 x_1 および角速度 x_2 , 位相軌道および sgn 関数を用いた場合の制御入力をそれぞれ示している。シミュレーション結果と同様に, スロットル角度は指定された時間で目標値に収束しているが, 過渡応答中にチャタリング現象により制御入力およびスロットルパルプに振動が起っていることがわかる。一方, Fig.12, Fig.13, Fig.14 はスロットル角度 x_1 および角速度 x_2 , 位相軌道および sat 関数を用いた場合の制御入

Fig. 8 Simulated control input with sat-function

力をそれぞれ示している。制御入力およびスロットル角度ともにチャタリングを起こさず, 指定された時間での目標値追従性能を示している。

これらの実験結果は, シミュレーション結果とほぼ一致しており, 提案した手法の有効性が確認できた。さらに, VSS オブザーバおよびスライディングモード制御は安定に動作することについても確認された。なお, sgn 関数を用いた場合の実験結果と sat 関数を用いた場合の実験結果を比較すると, いずれも指定された時間で目標値に収束していることがわかる。特に, sat 関数を用いた場合は, 制御入力およびスロットル角度ともにチャタリングを起こすことなく, 良好な目標値追従性能が得られた。

Fig. 9 Experimental throttle angle and angular velocity

5. おわりに

本研究では電子制御スロットルシステムの位置制御を目的として, 新たなスライディングモード制御法を提案した。すなわち, ファンクションオーグメントスライディング切換

Fig. 10 Experimental phase portrait

Fig. 13 Experimental phase portrait with sat-function

Fig. 11 Experimental control input

Fig. 14 Experimental control input with sat-function

Fig. 12 Experimental throttle angle and angular velocity with sat-function

超平面を用いることにより出力軌道誤差がオーバーシュートすることなく指定された時間で目標値に収束することを可能にし、シミュレーションおよび実験によって、この手法の有

効性を確認した。

今後の理論的課題としては、ここでは言及しえなかった非線形 VSS オブザーバ併合系としての安定性の証明があげられる。また実際のスロットルチャンバシステムでは、リターンスプリングのばね定数 K_s はスロットル角度 θ の非線形関数になっている。このほかに、バタフライ弁に対する負圧の影響、ギヤのバックラッシュなどの要素を含めたより高精度なモデリングが必要である。今後はこのようなモデリングとそれに基づいた制御系設計を行ない、それを実験的にも検証し、提案法の実用性をより確かなものにしていきたい。

参考文献

- 1) 原田 宏 (編): 自動車の制御技術, 1/49, 朝倉書店 (1997)
- 2) C. Rossi, A. Tilli and A. Tonielli: Robust Control of a Throttle Body for Drive by Wire Opening of Automotive Engines, IEEE Trans. Control System Tech., **8**-6, 993/1002 (2000)
- 3) M. Sommerville, C. Hatipoglu and Ümit Özgüner: Switching Control of a Pneumatic Throttle Actuator, IEEE Control System Magazine, **20**, 81/87 (1998)
- 4) S. Umerujan, K-B. Park, T. Hanamoto and T. Tsuji: Fric-

tionless Control of Robot Arm with Sliding Mode Observer, Proc. of IEEE International Vehicle Electronics Conference, 61/65 (2001)

- 5) S. Umerujan, T. Hanamoto, T. Tsuji and N. Umeda: Identification and Control of Non-linear System with Friction, Proc. of 6th IEEE International Workshop on Variable Structure Systems, 357/382 (2000)
- 6) ウメルジャン, ハイレット, 中野: 電子制御スロットルシステムの同定とロバスト制御, 計測自動制御学会論文集, **39**-12, 1150/1155 (2003)
- 7) R. Conatser, J. Wagner, S. Ganta and I. Walker: Diagnosis of Automotive Electronic Control Systems, Control Engineering Practice, **8**-6, 1/8 (2002)
- 8) S. B. Choi and J. K. Hedrick: Robust Throttle Control of Automotive Engines: Theory and Experiment, Trans. of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **118**, 992/988 (1996)
- 9) K. D. Young, V. I. Utkin and Ümit Özgüner: A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control, IEEE Trans. Control System Tech., **7**-3, 328/342 (1999)
- 10) S. Umerujan, N. Umeda, T. Hanamoto and T. Tsuji: Model Reference Sliding Mode Control of Flexible Arm with Non-linear VSS Observer, Proc. of 3rd Asian Control Conference, 2893/2898 (2000)
- 11) V. I. Utkin: Variable Structure Systems with Sliding Mode, IEEE Trans. Automat. Contr., **22**-2, 212/222 (1977)
- 12) R. A. DeCarlo, S. H. Zak and G. P. Matthews: Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable System, A Tutorial, Proc. IEEE, **76**-3, 212/232 (1988)

松 尾 孝 美 (正会員)

1985年九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻博士後期課程修了。大分大学助手, 助教授を経て, 2004年より同大学教授。制御理論とその応用に関する研究に従事(工学博士)。システム制御情報学会, 電気学会, IEEEなどの会員。

[著 者 紹 介]

Umerujan Sawut (正会員)

2001年九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。同年(株)ニッキ入社, 現在に至る。主として, 非線形系のロバスト制御とその応用, システム同定, 柔軟構造物の制振制御, エンジン制御, パワーエレクトロニクスに関する研究に従事(博士(工学))。電気学会会員。

樋 口 幸 治 (正会員)

1980年北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程単位修得退学。電気通信大学助手, 講師を経て, 現在同大学助教授。システム制御とその応用(特に, パワーエレクトロニクス)に関する研究に従事(工学博士)。電子情報通信学会, 電気学会, IEEEなどの会員。

中 野 和 司 (正会員)

1980年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程単位修得退学。九州大学助手, 福岡工業大学助教授, 教授を経て, 99年より電気通信大学教授。システム同定・制御に関する研究に従事(工学博士)。システム制御情報学会, 電子情報通信学会, 電気学会, IEEEなどの会員。