2111 スライディングモード制御を用いた EGR-過給圧協調制御の開発

Development of the EGR-Boost pressure cooperative control using sliding mode control

○鷺森 健児 (ダイハツ工業), 梶谷 満信 (ダイハツ工業),
丹羽 伸二 (ダイハツ工業), 中嶋 健治 (ダイハツテクナー)

Kenji SAGIMORI, Daihatsu Motor Co.,Ltd., 9-37-2, Kitaitami, Itami-shi, Hyougo 563-8651

Mitunobu KAJITANI, Daihatsu Motor Co.,Ltd., 9-37-2, Kitaitami, Itami-shi, Hyougo 563-8651

Shinji NIWA, Daihatsu Motor Co.,Ltd., 9-37-2, Kitaitami, Itami-shi, Hyougo 563-8651

Kenji NAKAJIMA, Daihatsu Techner Co.,Ltd., 9-37-2, Kitaitami, Itami-shi, Hyougo 563-8651

Abstract: The development of clean and the fuel economy engine is one of the important issue for the global environment protection. It is thought that the EGR control of the engine with turbo charger becomes important as one of the solutions. However there is mutual interference between the boost pressure and EGR rate. And also the system has nonlinear characteristics caused by the turbo lag. These problems make it difficult to control the EGR rate accurately. To overcome the above problems, we applied the Sliding Mode Controller with MIMO. And furthermore, we adapted the model structure that does not require the observer. Then we could get the good performance.

Key Words: Exhaust gas re-circulation, Cooperative control, Sliding mode control.

1. 諸言

クリーンかつ低燃費エンジンの開発は地球環境保護のための重要な課題の一つである。その対応技術の一つとして、過給機付きエンジンの EGR 制御が重要になってくると考える。

しかしながら、過給圧と EGR の間には相互干渉が存在する。過給圧を変化させると EGR も変化し、EGR を変化させると過給圧も変化する。このような制御対象に対しては、1 入力 1 出力 (以下 SISO) 制御の組み合わせでは EGR と過給圧を同時に制御するのは難しい。また、本制御対象は運転領域などにより応答性が異なり、かつ過給機にはターボラグ (無駄時間) が存在する。このように本制御対象は非線形なシステムとなっている。

そこで、非線形な制御対象に対して有効なスライディングモード制御 (以下 SMC) を適用することとし、相互干渉を考慮して制御を行うために多入力多出力 (以下 MIMO) でコントローラの設計を行った。さらに、運転領域が変化することで生じる状態量の推定誤差による制御性能の劣化を低減させるために、オブザーバを必要としないモデル構造となるようにした。その結果、良好な制御性能を得ることが出来たので報告する。

2. 供試システム

今回供試したシステムの概略図を Fig.1 に示す。アクチュエータは電子スロットル (以下スロットル)、EGR バルブおよび、ウェイストゲート付ターボチャージャーにより構成されている。センサーとしては、最上流に新気量を計測する Air Flow Meter, スロットル下流の圧力を計測する圧力センサーおよび、過給圧を計測する圧力センサーを備えている。

また、EGR はエキゾーストマニホールドより取り出しスロットル下流へと還流させている

3. システム同定

3-1. 入出力の選定 ここで、制御に使用する入出力について考える。まず過給圧について見てみると、過給圧はウェイストゲート開度により決まるので、入出力はウェイストゲート開度と過給圧とした。次に EGR 率について見てみると、EGR 率は式 (1) の関数で表される。

$$\text{EGR 率} = f(\text{新気量} : Q_a, \text{還流量} : Q_r) \quad (1)$$

従って、新気量と還流量を出力とすれば良い。ここで、新気量はスロットル開度により決まるので入力としてスロットル開度、出力として新気量を選んだ。残る還流量については信頼性を考えると直接計測するのは困難である。そこで、還流量 Q_r について考えると

$$\text{還流量} : Q_r = g(\text{エンジン背圧} : P_{eb}, \text{スロットル下流圧} : P_{th}, \text{EGR バルブ開度} : U_e) \quad (2)$$

$$\text{エンジン背圧} : P_{eb} = h(\text{過給圧} : P_b, \text{ウェイストゲート開度} : U_w) \quad (3)$$

のような関係にある。還流量 Q_r は式 (2) に示すように、EGR バルブの前後の圧力であるエンジン背圧 P_{eb} とスロットル下流圧 P_{th} で決まると考えられる。式 (3) に示すように、エンジン背圧 P_{eb} は過給圧 P_b により決まるので、スロットル下流圧 P_{th} を決めれば還流量 Q_r が決まる。そこで、還流量の代わりにスロットル下流圧を選び、入力として EGR バルブ開度、出力としてスロットル下流圧を選定した。入出力を整理しておく。

Fig. 1 Configuration of EGR System

u_1 = EGR バルブ開度
 u_2 = ウェイストゲート開度
 u_3 = スロットル開度
 y_1 = 新気量
 y_2 = 過給圧
 y_3 = スロットル下流圧

3-2. システム行列の構造 システム同定を行うにあたりその構造について考察を行った。多くの場合、状態量を直接計測することが出来ない。そのためにオブザーバにより状態量の推定を行うことになる。しかし、運転領域がノミナルからずれた場合には、推定誤差が生じ制御性能の悪化を招くことになる。(1)

そこで、モデルのシステム行列構造がオブザーバを必要としない構造になるようにしてシステム同定を行うこととした。具体的には次に示す状態空間モデルで、出力行列 C を単位行列とし 3 次でシステム同定を行った。

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A \cdot X + B \cdot U \\ Y &= C \cdot X \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 $A = (3 \times 3)$, $B = (3 \times 3)$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T$$

3-3. 同定結果 まず EGR バルブ開度、ウェイストゲート開度、スロットル開度を様々な周波数からなる M 系列信号で駆動し、その入出力データを用いて前節で決定したモデル構造となる様にモデル同定を行った(2)。それぞれに入力する M 系列信号は、それぞれが無相関になる様に選んだ。

同定した結果の周波数応答を Fig.2 に示す。破線が実際の出力値、実線が作成したモデルからの値である。10rad/sec まで破線と実線とではほぼ一致している。モード中の運転領域の変化速度を考えると、設計に十分使用できるモデルとなっている。

Fig.2 Identification Result

3-4. モデルの考察 モデルの個々の応答性について見てみる。運転領域の異なる(低負荷, 中負荷, 高負荷) 3つのポイントにおける同定結果のボード線図を Fig.3 に示す。

各アクチュエータを動かしたときのスロットル下流圧のゲイン特性 (Fig.3 の下段) を見てみると、ウェイストゲートによる応答が大きく影響するようになっており、対角の成分であるスロットルに対するスロットル下流圧の応答の影響度が支配的になっていない。これは、ターボチャージャーで過給することでス

Fig.3 Bode Magnitude Diagram

ロットル下流圧が大きく変化するためである。このように本制御対象は、多入力多出力の相互干渉を有したシステムとなっている。そのため EGR バルブで新気量を、ウェイストゲートで過給圧を、さらにスロットルでスロットル下流圧を制御する SISO 制御の組み合わせでは 3 つを同時に制御することが出来ない。

また、制御対象は運転領域により動特性が変化する。例えば、同一ウェイストゲート開度でも、運転領域によりゲイン特性が変わる。このように動作領域全体で見れば非線形なシステムである。そこで、非線形なシステムに対して高いロバスト性を有する SMC を適用し、相互干渉を考慮するために MIMO でコントローラの設計を行った。

4. スライディングモードコントローラの設計

制御系全体のブロック線図を Fig.4 に示す。SMC の設計は状態量を拘束する切換超平面の設計、超平面に拘束するための制御入力的设计により構成される(3)。

Fig.4 Block Diagram of SMC Controller

4-1. 拡大系の定義 1 形のサーボ系を構成するために、目標値 R と出力 Y の偏差の積分値 Z を新たな状態量として定義すると次式が得られる。

$$\dot{X}_e = A_e \cdot X + B_e \cdot U + E_e \cdot R \quad (5)$$

$$\text{ただし、} X_e = \begin{bmatrix} Z \\ X \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} 0 & -C \\ 0 & A \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}, E_e = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}$$

4-2. 超平面の設計 超平面は安定余裕を考慮して設計できる。システムの零点を用いた設計法を適用して設計を行った。式(5)の拡大系がスライディングモードを生じているときの等価制御系が安定となるように超平面を設計する。

まず、切換関数 σ を次のように定義すると、

$$\sigma = S \cdot X_e \quad (6)$$

状態が超平面に拘束されているときは、 $\sigma = \dot{\sigma} = 0$ なので次式となる

$$\dot{\sigma} = S \cdot \dot{X}_e = S(A_e \cdot X_e + B_e \cdot U + E_e \cdot R) = 0 \quad (7)$$

よって、スライディングモードが生じているときの等価制御入力 U_{eq} は次式となる。

$$U_{eq} = -(S \cdot B_e)^{-1}(S \cdot A_e \cdot X_e + S \cdot E_e \cdot R) \quad (8)$$

この入力を拡大系の状態方程式の式(5)に代入すると、次式の等価制御系となる。

$$\begin{aligned} \dot{X}_e &= (A_e - B_e(S \cdot B_e)^{-1}S \cdot A_e)X_e \\ &\quad + (E_e - B_e(S \cdot B_e)^{-1}S \cdot E_e)R \end{aligned} \quad (9)$$

この系が安定になるように超平面を設計することと、目標値の項を無視した系に対して設計することとは等価であるので、

$$\dot{X}_e = (A_e - B_e(S \cdot B_e)^{-1}S \cdot A_e)X_e \quad (10)$$

式(10)の系に対して安定度 ε を考慮し、最適制御理論を用いてフィードバックゲインを求め、それを超平面とした。(4)(5)

$$S = B_e^T \cdot P_s \quad (11)$$

なお、 P_s は任意の正定なに対する次のリカッチ方程式の正定解である。

$$P_s \cdot A_e' + A_e'^T \cdot P_s - P_s \cdot B_e \cdot B_e^T \cdot P_s + Q_s = 0 \quad (12)$$

$$A_e' = A_e + \varepsilon I \quad \varepsilon > 0$$

$$Q_s = \text{diag}[q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6]$$

ここで、リカッチ方程式の重み Q_s はFig.3の周波数応答をもとに以下のように決定した。 q_1, q_2, q_3 は偏差の積分 Z に対する重みであり周波数応答の速さの違いにより決定した。 q_4, q_5, q_6 は出力 Y に対する重みでありゲインの大きさの違いにより決定した。

4-3. 制御入力の設計 次に超平面に拘束するための入力を、最終スライディングモード法を適用して設計した。

制御入力は等価制御入力 U_{eq} (線形入力)と新たな入力 U_{nl} (非線形入力)で構成される次式とした

$$\begin{aligned} U &= U_{eq} + U_{nl} \\ &= -(S \cdot B_e)^{-1}(S \cdot A_e \cdot X_e + S \cdot E_e \cdot R) + U_{nl} \end{aligned} \quad (13)$$

σ を安定させたいので、 σ に関するリアプノフ関数を

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (14)$$

のように選び微分すると

$$\dot{V} = \sigma \cdot \dot{\sigma} = \sigma \cdot S(A_e \cdot X_e + B_e \cdot U + E_e \cdot R) \quad (15)$$

となる。式(15)に式(13)を代入すると

$$\dot{V} = \sigma(S \cdot B_e) \cdot U_{nl} \quad (16)$$

ここで、 U_{nl} を

$$U_{nl} = -k \cdot (S \cdot B_e)^{-1} \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \quad (17)$$

とすると、 $\dot{V}$ は次式となる。

$$\dot{V} = -k \frac{\sigma^2}{\|\sigma\|} \quad (18)$$

したがって、 $k > 0$ とすると $\dot{V} < 0$ となり、スライディングモードが保証される。ここで、制御入力を整理しておく。

$$U = -(S \cdot B_e)^{-1} \left\{ S \cdot A_e \cdot X_e + S \cdot E_e \cdot R + k \frac{\sigma}{\|\sigma\| + \eta} \right\} \quad (19)$$

η はチャタリング低減のために導入した平滑関数である。ただし、 $\eta > 0$ である。

5. シミュレーション

制御性能をシミュレーションにて確認した結果を示す。制御ゲインは、中負荷のモデルをノミナルとして決定した。ノミナルに対する応答結果をFig. 5に示す。3成分とも発散することなく目標値へ追従させることが出来ている。次に上下限モデルに対する応答結果をFig. 6に示す。破線が下限モデル、実線が上限モデルに対する応答である。上下限モデル共にオーバーシュートも無く制御することが出来ておりノミナルに近い制御性能を得ることが出来ている。これは、シグマを安定させることで超平面に拘束しノミナルに近い状態で制御が出来るためと考える。

また本報告では制御性能の悪化を防ぐためにオブザーバを

Fig. 5 Simulation Result (Nominal model)

Fig. 6 Simulation Result 2 (Lower & Upper model)

Fig. 7 Simulation Result 3 (With Observer vs. Without Observer)

Fig. 8 Experimental Result (Nominal)

Fig. 9 Experimental Result 2 (Lower)

有しないようにした。オブザーバを有しないコントローラでの効果を Fig.7 に示す。実線がオブザーバを有しないコントローラ、破線がオブザーバを有するコントローラの結果である。オブザーバを有しないコントローラでは、オーバーシュートが発生していないのに対して、オブザーバを有するコントローラでは、オーバーシュートが発生しており制御性能が悪化している。このようにオブザーバを有しないようにすることで制御性能の

Fig. 10 Experimental Result 3 (EC-mode)

劣化を防ぐことが出来ることが確認できた。

6. 実験試験

実機でのノミナルモデル条件（中負荷）でのステップ応答試験の結果を Fig. 8 に示す。制御ゲインはシミュレーションと同じゲインとした。過給圧に若干のオーバーシュートが見られるが、実機でも発散することなく3成分を同時に制御できている。

次に、下限モデルの条件でのステップ応答の結果を Fig. 9 に示す。下限モデルに対してもシミュレーションと同様に良好な制御性能が得られている。また、モード試験での結果を Fig.10 に示す。時々刻々と変化する目標に対しても、3成分とも良く追従しており、協調して制御することが出来た。

7. 結言

今回多入力多出力の非線形システムに対して、MIMO のスライディングモード制御を適用して、EGR と過給圧の協調制御の開発を行った。その結果、下記の結果を得られた。

1. 過給機付きエンジンの EGR 制御システムは、相互干渉のある非常に非線形なシステムであることがシステム同定することで確認できた。
2. モデル構造をオブザーバを有しない構造とすることで、状態量の推定誤差による制御性能の劣化を防ぐことが出来た。
3. 多入力多出力の非線形なシステムに対して MIMO の SMC を適用することで、優れた制御性能を得ることが出来た。

参考文献

- (1) SICE セミナー 「現代制御理論入門」テキスト、計測自動制御学会、(1997)
- (2) 足立修一、MATLAB による制御のためのシステム同定、東京電機大学出版局、(1996)、
- (3) 梶谷満信、野波健蔵 H ∞ ロバスト超平面を有するスライディングモード制御を用いた高性能アイドル回転制御、日本機械学会論文集 C 編、Vol.67, No.663, (2001), pp.3491-3497
- (4) 野波健蔵、西村秀和、平田光男、MATLAB による制御系設計、東京電機大学出版局、(1998)、
- (5) 野波健蔵、田宏奇スライディングモード制御、コロナ社、(1996)、