

# 自動車エンジンのロバスト制御に関する研究

張 揚

要 旨

二酸化炭素の排出が少ない社会、つまり低炭素型社会を作ることが求められている。今日、世界の乗用車保有台数は5億台を越えたと言われている。自動車における省エネルギー技術の促進が強く求められている。この問題に 대응するために、次世代自動車と呼ばれる電気自動車、ハイブリッド車、アイドルストップ車などの開発がなされている。しかしながらコストや利便性においてまだガソリン車には及ばない。2007年度における日本国内の自動車保有台数は75,762,932台であり、その中で約99.33%はガソリン車である。

米国環境省の調査結果によると、自動車で燃焼により生じたエネルギーの約80%は、エンジンならびにそのアイドルリングにより損失しているという。特に市街地を運転する際の信号待や渋滞は多くのエネルギーを浪費する。そのため、アイドルリングに関する研究は自動車の省エネルギー技術の切り口と見られている。アイドルリングの回転数を100rpm下降することで、2%-5%の燃費低減が試算される。

本研究は、アイドルリングの低速化を制御技術の面から追求する。低速化の課題として、外乱に対してロバストな制御システムの構築が重要となる。輸送遅れ、行程遅れ、回転数の検出遅れなどのむだ時間の影響が大きくなること、燃焼パージやエアコン投入さらにはステアリングの据え切りなどトルク外乱の影響を受けてエンストを引き起こしやすくなることが挙げられる。

本論文は、第1章から第8章に整理されている。

第1章では、研究の背景とアイドル回転数の低速化がもたらす効果と技術課題について述べている。アイドルストップまで実施せずとも低速化による効果は大きく、そしてエンスト防止のためにロバスト制御技術の充実が必要であるとしている。

第2章では、操作量である電子スロットル開度から制御量であるエンジン回転数までを記述するモデリングを実施している。物理式からノミナルモデルとして4つの状態量を含めた状態方程式が誘導され、ここで補償すべき外乱として、燃料パージ(D1)、ステアリング据切りトルク(D2)、燃焼行程の出力変動(D3)を課題設定している。これらを連動して制御対象としての特性をシミュレーションにより確認している。

第3章では、外乱補償に必要な制御上の課題を明確にしている。その一つは電子スロットルによる吸気制御の応答性を向上させること、二つとして電子スロットルの制御開度には限界があることである。以降の章でこれらの解決策を講じていくが、第3章においてゼロ点補償法と拘束条件付き

---

学位記番号と学位：博第48号，博士（工学）

授与年月日：平成23年3月19日

授与時の所属：大学院工学研究科機械システム工学専攻博士後期課程

補償法が課題となることを指摘している。

第4章では、スライディングモード制御の導入をはかっている。応答性の改善に対する効果について、従来のSmith補償法に比べてスライディングモード制御がより優れていることを、シミュレーションで確認している。

第5章では、スライディングモード制御におけるゼロ点補償法と関連するチャタリング抑制法を提案している。これにより第4章で用いた従来のスライディングモード制御と比較して、3種の外乱に対するエンジン回転数の変動を1/3程度に抑制できることをシミュレーションで確認している。

第6章では、拘束条件付きのスライディングモード制御の設計法を提案している。ここでの着眼は、目標の入力値と実際に作動した入力値の偏差を新たな状態量として制御モデルに編入させる方法である。これにより制御系の安定性への影響が懸念されたが、シミュレーションで良好な結果が得られている。

第7章では、実用化に向けて離散時間システムでの設計法を検討している。まず極配置法に基づいて離散時間サーボ系を設計し、次に制御入力の変動に対する補償ゲインを求める手順を提案している。この離散時間システムにおいて、現行の最短制御周期である10[ms]でもスライディングモード制御による外乱に対するロバスト性の高さが確認されている。

第8章では、本研究を以下のようにまとめている。

- (1)自動車エンジンにおいてアイドル回転数の低速化をはかるために、ロバスト性を向上させる制御システムを提案している。
- (2)制御システムの核として、スライディングモード制御を導入している。
- (3)ゼロ点補償法とチャタリング抑制法を提案して、スライディングモード制御の応答性をさらに高めている。
- (4)電子スロットル開度の限界を考慮して、拘束条件付きのスライディングモード制御の設計法を提案している。
- (5)離散時間システムに展開して、実用的な制御周期において制御性能を確認している。

以上によって、自動車エンジンのアイドル回転数制御にスライディングモード制御を適用することで、外乱に対するエンジン回転数の変動を従来の1/3程度に抑制できることから、低速化がはかれるとしている。

主指導教員 栗原伸夫

## A Study on Automotive Engine Robust Control

Yang ZHANG

### Abstract

In recent years, environment and energy problems are becoming increasingly serious in the automotive industry. Idling accounts for about 20% in the 10-15 mode fuel economy tests of actual automotives. If the idling speed is decreased by 100 rpm by improving the control method, fuel consumption will decrease by 2–5%. However, this decrease results in more dead time, worse response, and unstable idling speed because dead time has an inversely-proportional relationship with engine speed. At worst it would cause the engine to misfire and stall. Recently, sliding mode control (SMC) is regarded as the solution to the problem of improving system robustness, because sliding mode control is a type of variable structure control where the dynamics of a nonlinear system are altered via application of a high-frequency switching control. It is an important robust control approach, which can provide an adaptive approach to tackle parametric systems, uncertain parametric systems and uncertain disturbance systems.

Therefore, SMC is employed to improve robustness of engine idle control in this study. First, the digital engine model is constructed as a control object. the model concludes air intake, manifold, combustion, torque produce. The intake air flow is adjusted to reach a certain engine speed by adjusting the angle and position of the electronic throttle. The basic input is the equivalent electronic throttle opening angle  $\theta$ , which is restricted within a finite opening scale and the controlled output is engine speed  $N_e$  [rpm]. Because of the inversely-proportional relationship between the dead time  $L$  and the engine speed  $N_e$  [rpm], the dead time is derived from the feedback of the output of the system which used to handle with the Smith compensator. In view of the disturbances in an actual engine, three disturbances are loaded into the engine model. Two disturbances,  $D_1$  and  $D_2$ , are added as transitional disturbances before and after the dead time, taking evaporative purge and stationary steering into consideration. The measured engine speed in fluctuation  $D_3$  is also added as a steady disturbance to simulate the combustion fluctuation of an actual engine. Model parameters is set based on a 1.8L,4-cylinder engine.

And then the control subject should be analyzed systematically. In the case of engine robust control, the dead-time is supposed to be compensated because it show inverse proportion relation with engine speed, namely, it will get bigger at lower idling speed. For this reason, Pade approximation is used for the compensation. At second, responsiveness should be improved, that is, settling time is expected to be shortened. Because the two disturbances  $D_1$  and  $D_2$  in this study are both bias power disturbances and unmatched disturbances for sliding mode control. They cannot be compensated totally. That is the reason why the step response is also utilized for simulating the  $D_1$  quick-rising and  $D_2$  breakdown in

simulations. Since the compensation for this two disturbances depends on the responsiveness improvement, also the magnitude and settling time are both supposed to be eliminated by the compensation method. At third, the input of engine model is opening angle of electronic control throttle. The angle should be bounded to prevent throttle plate not to strike the intake air pipe. For this reason, the control input is bounded, as a result, it raises the possibility of destroy the stability of engine control system. Thus the resolvment should be considered to compensate the control input even if it is bounded. Finally, the control subject above was discussed based on continuous model. But in practice, using microcomputer such as DSP chips to implement the controller becomes more and more important nowadays. It means the discrete-time controller is also required. Especially, the principle in continuous-time sliding mode control is different from the discrete-time sliding mode control. The states can approach the switching hyperplane in discrete-time SMC but cannot stay on it in reality. It means the quasi-sliding mode exists. So it is necessary that discrete-time SMC controller verified based on discretized engine model. Accordingly, for the aforementioned control subjects, integral SMC is modified. The derivation of reference input is added to increase the zero of system so that the responsiveness can be improved. And for the control input constraint, the combination which connects the compensation gain derived from control input difference with the variable switching gain expressed by a monotonous decrease function is proposed. The multiplier effect is expected to compensate the bounded control and also eliminate the chattering in continuous engine model. And also, the discrete-time SMC is applied to engine speed robust control. Discrete-time controller is designed based on discretized engine model, but the simulation is carried on used the combination of continuous engine model and zero-order hold, in which three disturbances can be loaded as if in continous controller.

To confirm the control performances, the simulations were carried out in Matlab/Simulink under D1, D2 and D3 disturbances. From simulation results, the engine speed with SMC controller did not cause steady-state error with regards to fuel disturbance D1 and torque disturbance D2 although throttle opening was confined, and also maintained robustness during engine speed fluctuation D3. And the magnitudes of D1, D2 are both eliminated. Settling time is also shortened. In short, control performance of the proposed control methods is clearly verified by simulation results.

In the study, from the point of view on automotive fuel economy, engine robust control is investigated to improve the responsiveness against the disturbances which always give rise to engine stall. According to the simulation results, it is verified that the disturbanes can be compensated more by the proposed sliding mode control logic than results by the other control methods, so idling speed can be lowered to achieve fuel economy effectively. In the future work, it is essential to embed the control logic into microcomputer for automotive engine to verify the control effect by the experiment. And also, the subject in sliding mode control theory such as output feedback is to be investigated.

Professor(Chairperson) NOBUO KURIHARA