

連続可変動弁機構付SIエンジンの始動制御およびトルクデマンド制御

Engine Starting Control and Torque Demand Control of SI Engine with Continuous Variable Valve Train

80716555 杉平成広 (Shigehiro Sugihira) Supervisor: 大森浩充 (Hiromitsu Ohmori)

1 緒論

エンジン制御においては、これまで経験を活かしやすいマップや If-then ルールを用いた制御が主であった。しかしながらその開発にはエンジンごとに膨大な時間と労力が必要であるため、最近ではシミュレーションを活用したモデルベースの開発が期待されている [1]。そこで本研究では、エネルギー、環境といった観点から重要である、エンジンの始動制御とトルクデマンド制御のベンチマーク問題に取り組み、この 2 つの問題に有効な制御手法を提案する。

2 制御対象

本研究で想定するエンジンは連続可変動弁機構付ポート噴射型 6 気筒の SI エンジンである。制御対象は SICE エンジン・パワートレイン先端制御理論調査研究会から提供された車両モデルのエンジン部分である。

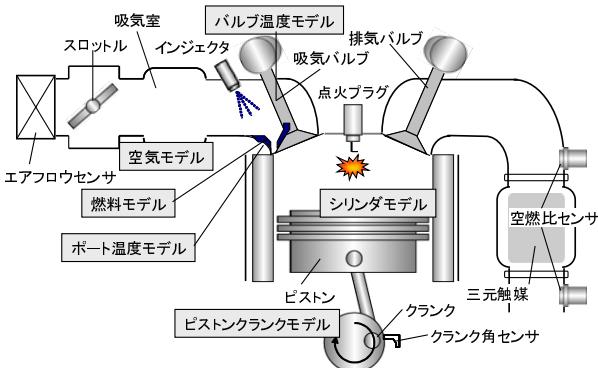


図 1: 制御対象

図 1 に示すように、制御対象は空気、燃料、シリンダ（燃焼と冷却損失を考慮）、バルブ・ポート温度、ピストンクラランクのサブモデルから構成される。入出力は表 1 のように定義され、16 入力 5 出力のシステムである。

表 1: 入出力の定義

入力	スロットル角 u_{th} , 吸気バルブリフト量 $u_{vl} \in \mathbb{R}^1$ 点火時期 u_{sa} , 燃料噴射量 $u_{fi} \in \mathbb{R}^6$
出力	吸気バルブ位相角 u_{vti} , 排気バルブ位相角 $u_{vte} \in \mathbb{R}^1$
	エンジン速度 y_1 , スロットル通過空気流量 $y_2 \in \mathbb{R}^1$ クランク角 $y_3 \in \mathbb{R}^1$, 左右バンク空燃比 $y_4, y_5 \in \mathbb{R}^2$

3 始動制御

3.1 問題設定

始動制御では左右バンク空燃比はフィードバック不可である。制御目標は以下のように設定した。

- 始動後、エンジン速度が 1.5 秒以内に $650 \pm 50[\text{rpm}]$ に落ち着くこと
- エンジン速度が $650[\text{rpm}]$ に漸近すること
- エンジン速度のオーバーシュートを低減すること
- 燃費を考慮すること

3.2 提案法

従来はスロットル角と点火時期と燃料噴射量のみを用いてエンジンの始動に成功していたが、提案法では特に吸気バルブリフト量に着目し、他の入力は主に燃費を考慮して設計した。始動制御における提案法を表 2 に示す。

表 2: 提案法 (始動制御)

制御入力	制御手法、方策
スロットル角	フルスロットル ($u_{th} = 90[\text{deg}]$)
点火時期	MBT に設定 ($u_{sa} = 15[\text{deg}]$)
燃料噴射量	逆モデルによる FF 制御
吸気バルブ位相角	最大限に進角 ($u_{vti} = 50[\text{deg}]$)
排気バルブ位相角	最大限に遅角 ($u_{vte} = 50[\text{deg}]$)
吸気バルブリフト量	離散型極値探索制御

燃料噴射量は空燃比を理論空燃比にするために用い、最適点火時期によって燃料のエネルギーを最大限にトルクに変換する。また、スロットル角と吸気バルブの位相角を上のように設定することでポンプ損失の低減を図る。吸気バルブリフト量については図 2 のように離散型極値探索制御 [2] に基づくコントローラを提案する。ただし、 $\theta = u_{vl}$ であり、 Z は評価関数を表し、次式で与える。

$$Z = h(y_1) = A(y_1 - N_d)^2 \quad (1)$$

ここで、 N_d は目標エンジン速度、 A は重みである。

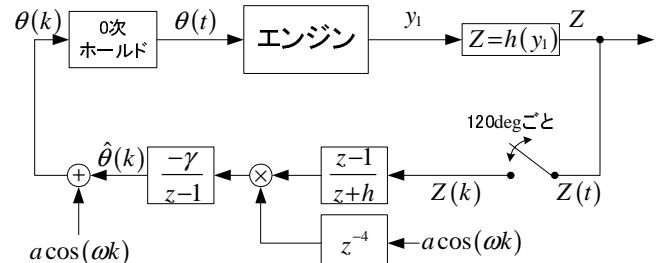


図 2: 吸気バルブリフト量制御器 (始動制御)

3.3 ベンチマークテスト

シミュレーションにより提案法の有効性を以下に示す。ここで、吸気バルブリフト量コントローラの設計パラメータは $A = 1, h = 0.1, \omega = 0.9\pi, a = 0.001, \gamma = 0.001$ とした。

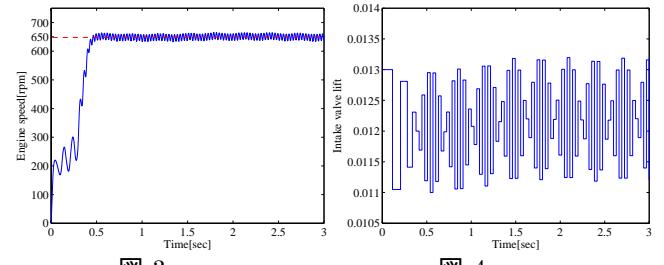


図 3: y_1

図 4: u_{vl}

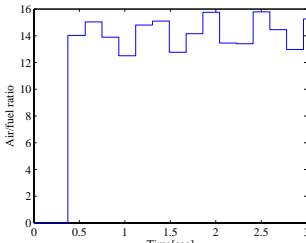


図 5: 筒内空燃比 (4番気筒)

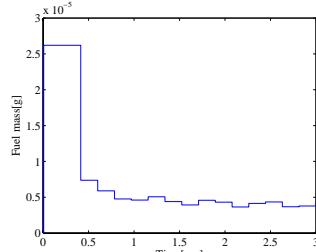


図 6: u_{fi4} (4番気筒)

4 トルクデマンド制御

4.1 問題設定

トルクデマンド制御では全ての出力がフィードバック可能である。制御目標は以下のように設定した。

- ・軸トルクが 0.5 秒以内に目標値 $\pm 10[\text{Nm}]$ に落ち着くこと
- ・軸トルクが目標値に漸近すること
- ・目標値がステップ変化しても上記を満たすこと

4.2 提案法

トルクデマンド制御における提案法を表 3 に示す。

表 3: 提案法 (トルクデマンド制御)

制御入力	制御手法、方策
スロットル角	フルスロットル ($u_{th} = 90[\text{deg}]$)
点火時期	MBT に設定 ($u_{sa} = 15[\text{deg}]$)
燃料噴射量	逆モデルによる FF 制御 + PI 制御
吸気バルブ位相角	最大限に進角 ($u_{vti} = 50[\text{deg}]$)
排気バルブ位相角	最大限に遅角 ($u_{vte} = 50[\text{deg}]$)
吸気バルブリフト量	セルフチューニング制御 (STC)

燃料噴射量と吸気バルブリフト量以外は燃費を考慮して表 2 同じにした。燃料噴射量制御では左右バンクの空燃比がフィードバック可能なことから PI 補償を加えることで理論空燃比との定常偏差を無くし、STC に基づく吸気バルブリフト量コントローラによって軸トルクを制御することが狙いである。図 7 に提案する吸気バルブリフト量コントローラを示す。

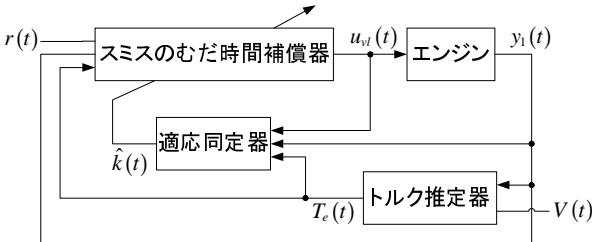


図 7: 吸気バルブリフト量制御器 (トルクデマンド制御)

ここで、 V は車速でありフィードバック可能な値である。トルク推定器においては次式によって軸トルクを推定した。

$$T_e = \frac{Js}{\tau s + 1} [y_1] + \frac{1}{\tau s + 1} [\text{map}(y_1, V) y_1^2] \quad (2)$$

ここで、 τ は設計パラメータであり、 $\text{map}[\cdot]$ は \cdot のマップ関数であることを意味する。また、適応同定器においては同定モデルを

$$\hat{T}_e = \frac{\hat{k}}{\tau s + 1} e^{-\tau_d s} \left[\frac{u_{vl}}{y_1} \right], \quad \tau_d = \frac{2\pi}{y_1} \quad (3)$$

とし、以下の適応則によってパラメータ \hat{k} を同定する。

$$\dot{\hat{k}}(t) = -\frac{\gamma \phi e}{1 + \phi^2}, \quad \gamma > 0 \quad (4)$$

$$\phi = \frac{1}{\tau s + 1} e^{-\tau_d s} \left[\frac{u_{vl}}{y_1} \right], \quad e = T_e - \hat{T}_e \quad (5)$$

ここで、 γ は適応ゲインを表す。そして、適応パラメータ \hat{k} を用いて図 8 に示すスミスのむだ時間補償器によって制御入力を合成する。

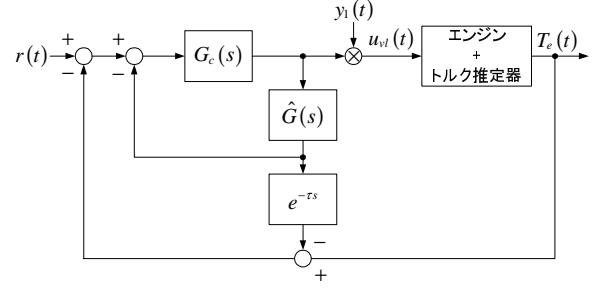


図 8: スミスのむだ時間補償器

ここで、 \hat{G} は

$$\hat{G}(s) = \frac{\hat{k}}{\tau s + 1} \quad (6)$$

であり、 G_c は次式のように設計した。

$$G_c(s) = \frac{\lambda(\tau s + 1)}{\hat{k}s}, \quad \lambda > 0 \quad (7)$$

4.3 ベンチマークテスト

シミュレーションにより提案法の有効性を以下に示す。15 秒間のアイドル状態を経てからトルクデマンド制御を行った。ここで、吸気バルブリフト量コントローラの設計パラメータは $\tau = 0.1, \gamma = 1 \times 10^7, \lambda = 10$ とした。

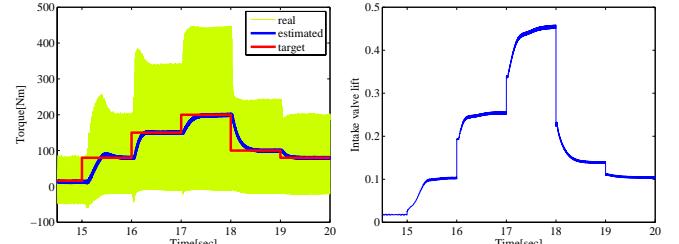


図 9: トルク



図 10: u_{vl}

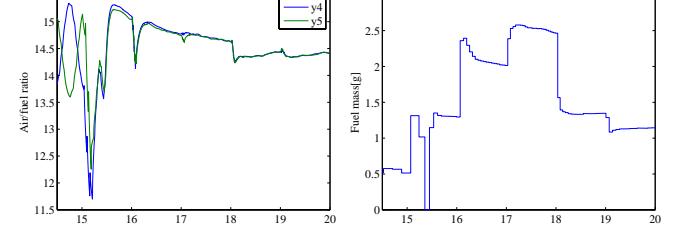


図 11: y_4, y_5



図 12: u_{fi4} (4番気筒)

5 結論

離散型極値探索制御とセルフチューニング制御を始動制御とトルクデマンド制御それぞれに応用することで、始動性を改善し、要求トルクを短時間で実現できることをシミュレーションにより示せた。

参考文献

- [1] 大畠 明, “モデルベース開発とエンジンモデル - 制御理論と企業のギャップについて - ,” SICE エンジン・パワートレイン先端制御理論講演会第 1 回講演資料, 2006.
- [2] J. Y. Choi, M. Krstić, K. B. Ariyur and J. S. Lee, “Extremum seeking control for discrete-time systems,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 47, pp. 318-323, 2002.