ハイブリッドカーの燃費向上のための最適制御検討

複合科学研究科　統計科学専攻　荒川 俊也

1　はじめに

現在，環境問題対応や，京都議定書における CO_2 排出量削減目標を達成するため，各自動車メーカは，従来の内燃機関のみならず，モータも動力とした環境対応車の研究開発を進めている．しかし，EV の場合，航続距離が搭載している電池容量に依存する．現状では，電池を充電せずに，長距離を走行できない．また，電池を充電するスタンドの設置などのインフラ整備が不十分であることも現状の問題として挙げられる．

そのため，環境対応車として，低価格で，かつ，燃費の良い車が求められており，ハイブリッドカー（Hybrid Electric Vehicle: HEV）が，次世代環境適応車として有望視されている．HEV は，内燃機関を用いるが，モータを併用した駆動を行うため，従来の自動車より燃費が良い．また，EV と異なり，航続距離の制限が無いこと，モータ容量や電池容量が小さいため，低価格であることが特徴である．

2　HEV 制御の基本方程式

HEV は，基本的に，下記の制御則によって動作する．

低速域：モータによる駆動（pureEV）

低速域-高速域：モータ＋エンジンによる駆動（HEV）

高速域：エンジンによる駆動

また，モータ駆動時にはバッテリを使用するために，バッテリが放電するが，ブレーキを作動させた場合，ブレーキの力学的エネルギを電気エネルギに変換し，バッテリを充電する．これを回生と呼ぶ．従って，上記制御則に基づく運動方程式，バッテリ使用時の放電，回生による充電などのファクタを加味する必要がある．Utaichana et al.が述べているモデル[1]を簡略化すると，次の状態空間方程式となる．

$$
\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} P_{ICE} \\ W_{bat} \\ V \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_{ICE}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \dfrac{1000\eta_1}{m_c(V+\varepsilon_c)} & 0 & -\dfrac{k_{v1}}{m_c}|V| \end{bmatrix}\begin{bmatrix} P_{ICE} \\ W_{bat} \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{P_{bat}\cdot eng}{\tau_{ICE}} & 0 & 0 \\ 0 & * & 0 \\ 0 & \dfrac{1000\eta_2}{m_c(V+\varepsilon_c)} & -\dfrac{1000}{m_c(V+\varepsilon_c)} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{ICE} \\ P_{ED} \\ P_{FR} \end{bmatrix}
$$

$$
= \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_{ICE}}\cdot P_{ICE} \\ 0 \\ \dfrac{1000\eta_1}{m_c(V+\varepsilon_c)}\cdot P_{ICE} - \dfrac{k_{v1}}{m_c}|V|\cdot V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{P_{bat}\cdot eng}{\tau_{ICE}} & 0 & 0 \\ 0 & * & 0 \\ 0 & \dfrac{1000\eta_2}{m_c(V+\varepsilon_c)} & -\dfrac{1000}{m_c(V+\varepsilon_c)} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{ICE} \\ P_{ED} \\ P_{FR} \end{bmatrix}
$$

なお，上式の*は $* = \ln\left(d_{1,v}\overline{W_{bat}} + d_{2,v}\right) + 2d_{3,v}P_{bat,nom} + d_{4,v}$ を満たす．

ここで，線形化のために，Taylor 展開を考える．

$\dfrac{dx}{dt} = f(x) + g(x) \cdot u$ のとき，平衡点 $x = X^*$ のまわりで Taylor 展開すると，

$$\frac{dx}{dt} = f(X^*) + \left.\frac{\partial f}{\partial t}\right|_{x=X^*} (x - X^*) + g(X^*) \cdot u + O^2(x,u)$$

$$= \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_{ICE}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \dfrac{1000\eta_1}{m_c(V^* + \varepsilon_c)} & 0 & -\dfrac{1000\eta_1}{m_c(V^* + \varepsilon_c)^2} - \dfrac{k_{v1}}{m_c}\left(\left|V^*\right| sgn(V^*) + V^*\right) \end{bmatrix} (x - X^*) +$$

$$\begin{bmatrix} \dfrac{P_{ICE}{}^* \cdot eng}{\tau_{ICE}} & 0 & 0 \\ 0 & * & 0 \\ 0 & \dfrac{1000\eta_2}{m_c(V^* + \varepsilon_c)} & -\dfrac{1000}{m_c(V^* + \varepsilon_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ICE} \\ P_{ED} \\ P_{FR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_{ICE}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \dfrac{1000\eta_1}{m_c(V^* + \varepsilon_c)} & 0 & -\dfrac{k_{v1}}{m_c}\left|V^*\right| \end{bmatrix}$$

となる．この線形状態空間方程式を離散化する必要があるが，上式では，$\dfrac{1}{m_c(V^* + \varepsilon_c)}$ の項および ln の項が計算を煩雑にするので，離散化は容易ではない．従って，上記計算の煩雑さを考慮した上で，線形化された状態空間方程式を更に簡略化すると，次の式が得られる．

$$\frac{dP_{ICE}}{dt} = -\frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE} + \frac{b_{ICE}}{\tau_{ICE}} u_{ICE} \qquad \frac{d\overline{W_{bat}}}{dt} = -\frac{1}{\tau_{bat}} \overline{W_{bat}} + \frac{1}{\tau_{bat} \cdot P_{Eout}} P_{bat} \qquad \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\tau_V} V + \frac{b_V}{\tau_V} P_{cwh}$$

ここで，

$$P_{cwh} = \begin{cases} C_{11}P_{ICE} + C_{12}P_{bat} & (C_{11}, C_{12} > 0) \\ C_{21}P_{ICE} + C_{22}P_{bat} & (C_{21} > 0, C_{22} < 0) \end{cases} \qquad P_{bat} = \begin{cases} 0 & (V > \alpha) \\ P_{Eout} & (0 < V < \alpha) \end{cases}$$

である．

本研究では，上記簡略化モデルを用いて，Receding Horizon による Model Predictive Control を適用して，NEDC（New European Driving Cycle）モードにおける燃費最適制御の構築を目指す．

参考文献

[1] Kasemsak Uthaichana, et al.: HYBRID MODEL PREDICTIVE CONTROL TRACKING OF A SAWTOOTH DRIVING PROFILE FOR AN HEV, 2008 American Control Conference