EV の巡航速度維持タスクにおけるモーションプランニングの消費電力量最適化*

Optimizing Electric Energy Consumption for Longitudinal Motion Planning for EV Cruising Task

高野 岳
Gaku TAKANO

大林 真人
Makoto OBAYASHI

宇土 敬祐
Keisuke UTO

特集

This paper studies optimizing electric energy consumption for motion planning for EV cruising tasks. We optimize a longitudinal motion plan, in which the speed is changed in a triangular wave pattern around the cruising speed considering the effective use of electric power transfer efficiency. In such a problem, the pulse-and-glide (PnG) strategy, a motion plan that alternately combines acceleratingusing the maximum efficiency point of the gasoline engine and decelerating by coasting, is known to be effective for engine vehicles. However, for EVs, it was theoretically unclear whether the PnG strategy is optimal since there is also regeneration. Therefore, depending on the motor torque T_{MD} during the deceleration interval, we divided the cases into (i) power running T_{MD} > 0, (ii) deceleration by coasting T_{MD} = 0, and (iii) regeneration T_{MD} < 0, and derived a numerical model of energy consumption per meter traveled in each case. Using these models, we theoretically showed that the plan of (iii) by regeneration consumes more energy than the plan of (ii) by coasting (PnG strategy) and is not optimal. Also, we obtained sufficient conditions for motor efficiency when the PnG strategy plan of (ii) is optimal.

Key words :
EV Systems, Energy control system, Motion control, Motion planning, Pulse-and-glide

1. はじめに

カーボンニュートラルを目指した環境規制手法の変化により，自動車における電動化 (EV) の進展は避けられないものとなった．しかし，EV にはエンジン車に比べて航続距離が短いという大きな課題が残されている．この課題に対して，バッテリー容量の増加などのアプローチもあるが，従来，安全，利便を目的に導入されてきた自動運転用モーションプランニングの活用による消費電力量削減のアプローチを検討する．モーションプランニングによる消費電力量削減の効果がどの程度あり得るのか数値モデルに基づく定量的な指標を示したい．

本研究では，巡行速度維持タスクでの縦方向のモーションプランニングを取り上げる．このタスクは，基礎的ではあるものの，一般に走行区間での占有時間が長く，消費電力量が削減可能であれば効果が大きいと考える．

この種の先行研究に，Li らの前方車追従におけるエンジン車の縦方向のモーションプランニングの研究がある [1]．Li らは，前方車の車速に合わせて車速を維持するとき，前方車と同一速度で走らせるよりも，ガソリンエンジンの最大効率点を使った加速と，慣性減速（惰性走行）を交互に組み合わせたモーションプランの方

＊自動車技術会の了解を得て「2022 年春季大会学術講演会講演予稿集 No.57-22 文献番号：20225253」より修正・加筆の上全文転載

が，燃料消費量が小さくなることを示した．このモーションプランは，Pulse-and-glide (PnG) 戦略と呼ばれる．

So らは，速度 0 からスタートし，一定距離を走行後，特定の終端速度とする EV のモーションプラン問題において，動的計画法により消費電力量の最小化を行った [2]．彼らは，動的計画法により得られた最適なモーションプランの中間部分が PnG 戦略と似ていることを示した．また，回生を含まない加減速を繰り返すパターンにおいては，エンジン車における Li らの結果と同じく，PnG 戦略が有効であることを示した．

このように，EV においてもエンジン車同様に慣性減速を利用するモーションプランが有効なことが期待されるが，EV には，エンジン車には無い回生による充電動作があり，So らの論文でも，この影響が不明確であった．そこで，本研究では，巡行速度を中心に三角波状に速度を変化させるモーションプランにおいて，減速区間のモーションを，力行，モータトルク＝ 0（慣性減速），回生の 3 つで分類し，それぞれケースでの走行距離当たり消費電力量を数値モデル化する．この数値モデルを用いて，消費電力量の最小化（最適化）を検討する．

2. 定式化

EV の駆動輪周りのトルク T [N·m] と角速度 ω [rad/s] で表した車両運動特性を次式で与える．これらは，Mechanical Simulation 社の車両運動ソフトウェアソリューション CarSim2021 のリファレンスマニュアル [3) 4)] と Kamal らの論文 [5)] を参考に得た．J_{total} [kg·m^2] は駆動輪周りで換算した慣性モーメントである．$T_R(\omega, \theta_{LS})$ [N·m] は駆動輪周りで換算した抵抗トルクを合成したものであり，転動抵抗，空気抵抗，勾配抵抗を含む．各変数の説明と本研究で用いる数値例を Table 1 に示す．数値例は CarSim2021 に内蔵の B−セグメント EV のデータを流用した．

Table 1　Vehicle model parameters

Parameter and symbol	Value
Moment of inertia of motor, J_M	0.0226 kg·m^2
Moment of inertia of shaft, J_{shaft}	0.013 kg·m^2
Moment of inertia of tire, J_T	0.899 kg·m^2
Atmospheric density, ρ_a	1.206 kg/m^3
Drag coefficient, C_d	0.3
Front projection area, A	1.6 m^2
Effective diameter of tire, d	0.574 m
Vehicle weight (gross weight), M	1323.9 kg
Gear ratio, γ	3.905
Rolling resistance (road coefficient), R_{r_surf}	1.0
Rolling resistance (constant), R_{r_c}	0.008
Rolling resistance (speed-dependent coefficient), R_{r_v}	0.00018 s/m
Longitudinal slope angle, θ_{LS}	0 rad

$$J_{total} \cdot \frac{d\omega}{dt} = T - T_R(\omega, \theta_{LS}) \quad (1)$$

$$J_{total} \coloneqq \left(M\left(\frac{d}{2}\right)^2 + 4J_T + \gamma^2 J_M + \gamma^2 J_{shaft} \right) \quad (2)$$

$$T_R(\omega, \theta_{LS}) \coloneqq \frac{d}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \omega & \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Mg \cdot \left(\mathrm{sgn}(\omega) \cdot \cos\theta_{LS} \cdot R_{r\_surf} \cdot R_{r\_c} + \sin\theta_{LS}\right) \\ Mg \cdot \cos\theta_{LS} \cdot R_{r\_surf} \cdot R_{r\_v} \cdot \frac{d}{2} \\ \mathrm{sgn}(\omega) \cdot \frac{1}{2} C_D \rho_a A \left(\frac{d}{2}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

車速 v [m/s] と車両加速度 a [m/s^2] は駆動輪周り角速度 ω [rad/s] から次式で与えられる．

$$v = \omega \cdot \frac{d}{2} \quad (4), \qquad a = \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{d}{2} \quad (5)$$

また，駆動輪周りのトルク T [N·m] と角速度 ω [rad/s] とモータ回転軸周りのトルク T_M [N·m] と角速度 ω_M [rad/s] は次式で関係づけられる．

$$\omega_M = \gamma \cdot \omega \quad (6), \qquad T_M = T/\gamma \quad (7)$$

モータ消費電力 P_{motor} [W] は次式で与えられる．

$$P_{motor} = T_M \cdot \omega_M = T_M \cdot \gamma \cdot \omega = T_M \cdot \frac{2\gamma}{d} \cdot v \quad (8)$$

バッテリー供給電力 P_{bttry} [W] は式 (9) で与えられる．$P_{motor} > 0$ が力行，$P_{motor} = 0$ がモータトルク $T_M = 0$，$P_{motor} < 0$ が回生時の動作に対応する．ここでモータ効率 $\varepsilon(T_M, \omega_M)$ はバッテリーとモータ間の総合的な効率であり，モータトルクとモータ角速度の関数としてマップで与えられる．ただし，$0 \leq \varepsilon(T_M, \omega_M) < 1$ である．本研究の数値例では，CarSim2021 に内蔵のものを流用した Fig. 1 のモータ効率マップを用いる．Fig. 1 では分かりやすさのため，縦軸をモータトルク T_M [N·m] で，横軸をモータ角速度 ω_M [rad/s] から車速 v [km/h] に換算して示した．

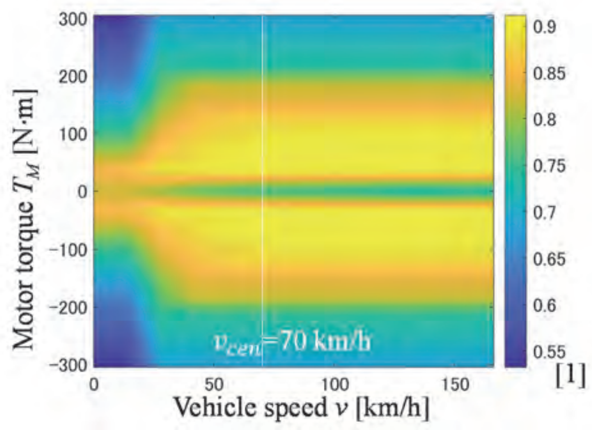

Fig. 1　Motor efficiency map

$$P_{bttry} = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon(T_M, \omega_M)} \cdot P_{motor} & (P_{motor} > 0) \\ 0 & (P_{motor} = 0) \\ \varepsilon(T_M, \omega_M) \cdot P_{motor} & (P_{motor} < 0) \end{cases}$$
$$= \begin{cases} \frac{T_M \cdot (2\gamma/d) \cdot v}{\varepsilon\left(T_M, (2\gamma/d) \cdot v\right)} & (T_M \cdot v > 0) \\ 0 & (T_M \cdot v = 0) \\ \varepsilon\left(T_M, (2\gamma/d) \cdot v\right) \cdot T_M \cdot (2\gamma/d) \cdot v & (T_M \cdot v < 0) \end{cases} \quad (9)$$

時間 $0 \leqq t \leqq T_{cyc}$ [s] でのバッテリー供給電力量 E_{bttry} [J] は次式で与えられ，これはシステム消費電力量に相当する．以降，特に明記しない限りシステム消費電力量を消費電力量と呼ぶ．

$$E_{bttry} = \int_0^{T_{cyc}} P_{bttry} dt \quad (10)$$

これらを用いて，本研究で議論する走行距離当たりのバッテリー供給電力量（システム消費電力量）$E_{bttry/dist}$ [J/m] は次式で得られる．

$$E_{bttry/dist} = \int_0^{T_{cyc}} P_{bttry} dt \Big/ \int_0^{T_{cyc}} v dt \quad (11)$$

3. 数値シミュレーション

巡行速度維持タスクにおける加減速の影響を見るために，Fig. 2 の巡行速度を中心に加減速対称で三角波状に速度を変化させるモーションプランを考え，数値シミュレーションする．このモーションプランは速度振幅 Δv と周期 T_{cyc} の 2 つのパラメータを持ち，一周期の平均速度は v_{cen} になる．加速区間での加速度とモータトルクを a_A, T_{MA} とし，同様に減速区間でのそれらを a_D, T_{MD} をとする．この記法を次章以降も用いる．定義から，$a_A = |a_D|$ となる．

消費電力量の数値シミュレーションは，次のように行う．

1) モーションプランから (v,a) の時間遷移を得る．
2) 式 (4),(5) より (v,a) から $\left(\omega, \frac{d\omega}{dt}\right)$ を得る．
3) 式 (1)-(3) より $\left(\omega, \frac{d\omega}{dt}\right)$ から駆動輪周りのトルク T を得る．
4) 式 (6),(7) より (ω, T) からモータ軸周りの (ω_M, T_M) を得る．
5) 式 (8),(9) より (ω_M, T_M) から電力 P_{motor}，P_{bttry} を得る．
6) 式 (10),(11) より P_{bttry} から消費電力量 E_{bttry} 及び走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ を得る．

より現実に近づけるため，モータトルク伝達効率 0.99 と伝達機構からのブレーキトルク 1.0 N·m を上記に加えてシミュレーションを行った．

Fig. 3 に v_{cen} =70 km/h で速度振幅 Δv と周期 T_{cyc} を振った場合の走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ を 2 次元マップとして示す．赤線が減速区間のモータトルク T_{MD} = 0 の線で慣性減速に対応する．赤線左の領域が T_{MD} > 0 で減速区間力行，右の領域が T_{MD} < 0 で減速区間回生に対応する．消費電力量は T_{MD} = 0 の線を谷として小さくなっており，T_{MD} が回生側に振れても消費電力量は大きくなることがわかる．このことは，減速区間で回生のケースを加えて考えても，モータトルク T_{MD} = 0 の慣性減速が消費電力量的に有効であることを示唆している．

Fig. 3 の消費電力量マップ上で最小となったのは，Δv=1.2 km/h, T_{cyc}=7.0 s の時（Fig. 3 白×点）で，走行距離当たり消費電力量は 293.8 J/m であった．一方，一定速（Δv=0 km/h）の場合は 317.7 J/m であった．両

者のモーションプランおよびモータトルク T_M，モータ効率 ε，消費電力 P_{bttry}，消費電力量 E_{bttry} の時間遷移を Fig. 4 に示す．電力最小となったモーションプランにおいて，減速区間のモータトルク T_M は確かに 0 になっていることが確認できる．また，加速区間あるいは減速区間において，モータトルク T_M は厳密には変化するが，Δv は v_{cen} に比べて小さいため，T_M は一定とみなせることがわかる．

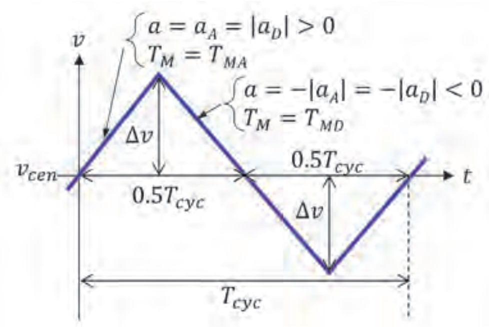

Fig. 2　Speed pattern with symmetrical acceleration and deceleration maintaining cruising speed

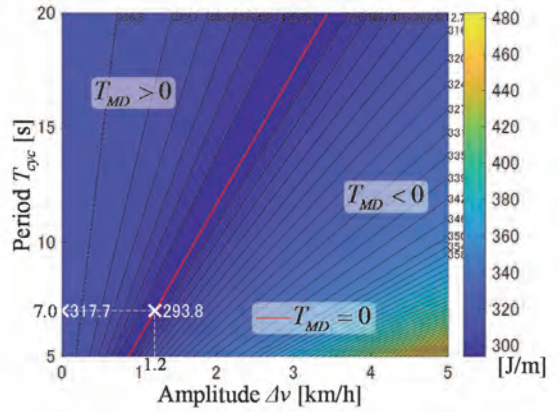

Fig. 3　System energy consumption per meter traveled [J/m] at v_{cen}=70 km/h

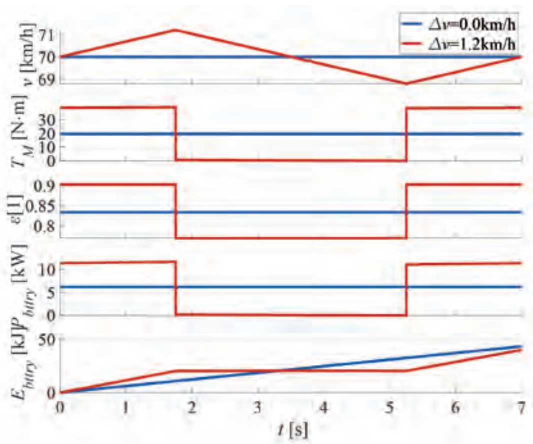

Fig. 4　Comparison of motion plan with minimum energy consumption and constant speed motion plan in Fig. 3

4. 走行距離当たり消費電力量の数値モデル化

より一般化した巡航速度を維持するモーションプランとして，Fig. 5 の巡行速度 v_{cen} を中心に加減速非対称で三角波状に速度を変化させるモーションプランを考える．繰り返し周期 T_{cyc} における減速区間の比率であるデューティ比 r_D $(0 < r_D < 1)$ は平均速度を巡行速度 v_{cen} に合わせる条件から，以下のように決定される．

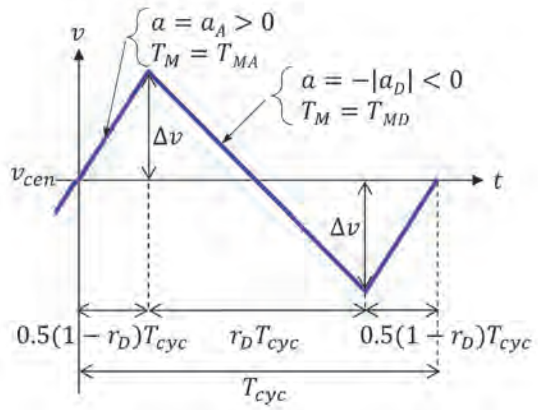

Fig. 5　Speed pattern with asymmetrical acceleration and deceleration maintaining cruising speed

$$r_D = \frac{a_A}{a_A + |a_D|} \quad (12)$$

このプランに対して走行距離当たり消費電力量の理論式を導出し，数値モデルとして使用する．理論式では減速区間のモーションに応じて，(i) 力行 $T_{MD} > 0$，(ii) 慣性減速 $T_{MD} = 0$，(iii) 回生 $T_{MD} < 0$，の場合分けが生じる．

4.1 準備

モータトルク T_M は式 (1)-(5), (7) より車速 v と車両加速度 a の関数として次式で与えられる．

$$T_M = T_M(v, a) = J_{total} \cdot \frac{2}{\gamma d} \cdot a + \frac{1}{\gamma} \cdot T_R\left(\frac{2}{d} \cdot v, \theta_{LS}\right) \quad (13)$$

このとき，一定速度の場合のモータトルク T_{MC} は次式で与えられる．

$$T_{MC} = T_M(v_{cen}, a = 0) = \frac{1}{\gamma} \cdot T_R\left(\frac{2}{d} \cdot v_{cen}, \theta_{LS}\right) = \text{const.} \quad (14)$$

加速区間モータトルク T_{MA} は $T_{MA} > T_{MC}$ を，減速区間モータトルク T_{MD} は $T_{MD} < T_{MC}$ を満たす必要がある．

ここで Fig. 5 のモーションプランにおいて以下の仮定を行う．

仮定 1:

$v_{cen} \gg \Delta_V$ であるから，抵抗トルク $T_R\,(\omega = 2/d \cdot v,\ \theta_{LS})$ は一定とみなせ $T_R\,(2/d \cdot v_{cen},\ \theta_{LS})$ で近似される．

仮定 1 と式 (13), (14) から，加速区間のモータトルク T_{MA} と減速区間のモータトルク T_{MD} は区間中一定とみなせ，次式で与えられる．

$$T_{MA} \simeq J_{total} \cdot (2/\gamma/d) \cdot a_A + T_{MC} = \text{const.} \quad (15)$$
$$T_{MD} \simeq J_{total} \cdot (2/\gamma/d) \cdot a_D + T_{MC} = \text{const.} \quad (16)$$

逆に加速区間の加速度 a_A と減速区間の加速度 a_D はモータトルク T_{MC}, T_{MA}, T_{MD} で次のように表される．

$$a_A = (T_{MA} - T_{MC}) \cdot \gamma d / J_{total} / 2 > 0 \quad (17)$$
$$a_D = (T_{MD} - T_{MC}) \cdot \gamma d / J_{total} / 2 < 0 \quad (18)$$

上式から式 (12) のデューティ比 r_D はモータトルク T_{MC}, T_{MA}, T_{MD} で次のように表せる．これは，Fig. 5 のモーションプランはモータトルク T_{MC}, T_{MA}, T_{MD} で決定できることを示している．

$$r_D = \frac{a_A}{a_A - a_D} = \frac{T_{MA} - T_{MC}}{T_{MA} - T_{MD}} \quad (19)$$

さらに，電力関係の 2 つの仮定を行う．

仮定 2:

$v_{cen} \gg \Delta_V$ であるから，加速，減速区間のモータ消費電力 P_{motor} は速度変化に対して依存が小さく，次式で近似される．

$$P_{motor} \simeq \begin{cases} T_{MA} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen} & (a > 0) \quad (20) \\ T_{MD} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen} & (a < 0) \quad (21) \end{cases}$$

仮定 3:

$v_{cen} \gg \Delta_V$ であるから，加速区間，減速区間のモータ効率は一定とみなせ，次式で近似される．

$$\varepsilon\left(T_M, (2\gamma/d) \cdot v\right) \simeq \begin{cases} \varepsilon_A & (a > 0) \quad (22) \\ \varepsilon_D & (a < 0) \quad (23) \end{cases}$$
$$\varepsilon_A := \varepsilon\left(T_{MA}, (2\gamma/d) \cdot v_{cen}\right) = \text{const.} \quad (24)$$
$$\varepsilon_D := \varepsilon\left(T_{MD}, (2\gamma/d) \cdot v_{cen}\right) = \text{const.} \quad (25)$$

以上から Fig. 5 のモーションプランは，モータ効率マップ Fig. 1 の車速 v=v_{cen} の線上で加速動作点 A と減速動作点 D を選ぶことに対応する（Fig. 6 参照）．

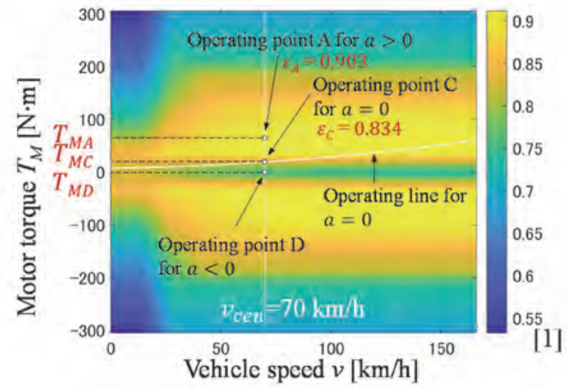

Fig. 6　Motor efficiency map with operating points of an asymmetrical acceleration and deceleration speed pattern maintaining cruising speed

4.2 一定速度の場合の消費電力量

比較のため，一定速度の場合のバッテリー供給電力 P_{bttry}，消費電力量 E_{bttry} 及び走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ を以下に示す．ただし，ε_C はモータトルク T_{MC} と車速 v_{cen} におけるモータ効率とする．

$$\varepsilon_C := \varepsilon\left(T_{MC}, (2\gamma/d) \cdot v_{cen}\right) \quad (26)$$

$$P_{bttry} = \frac{T_{MC} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}}{\varepsilon\left(T_{MC}, (2\gamma/d) \cdot v_{cen}\right)} = \frac{T_{MC} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}}{\varepsilon_C} \quad (27)$$

$$E_{bttry} = \int_0^{T_{cyc}} P_{bttry} dt = T_{cyc} \cdot \frac{T_{MC} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}}{\varepsilon_C} \quad (28)$$

$$E_{bttry/dist} = \frac{E_{bttry}}{v_{cen} \cdot T_{cyc}} = \frac{1}{v_{cen} \cdot T_{cyc}} \int_0^{T_{cyc}} P_{bttry} dt = \frac{2\gamma}{d} \cdot \frac{T_{MC}}{\varepsilon_C} \quad (29)$$

4.3 消費電力量の理論式

前述の仮定のもと，Fig. 5 のモーションプランの走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ の理論式は，下記で導入する重み k_A を使い，次式で与えられる．導出は後述する．

理論式：

$$k_A := \frac{T_{MC} - T_{MD}}{T_{MA} - T_{MD}} \cdot \frac{T_{MA}}{T_{MC}} \quad (30) \qquad \begin{array}{ll} 0 < k_A < 1 & ((\text{i})\ 0 < T_{MD} < T_{MC}) \\ k_A = 1 & ((\text{ii})\ T_{MD} = 0) \\ k_A > 1 & ((\text{iii})\ T_{MD} < 0) \end{array}$$

$$E_{bttry/dist} = \begin{cases} \dfrac{2\gamma}{d} \cdot \left(k_A \cdot \dfrac{T_{MC}}{\varepsilon_A} + (1 - k_A) \cdot \dfrac{T_{MC}}{\varepsilon_D}\right) & ((\text{i})\ 0 < T_{MD} < T_{MC}) \quad (31) \\ \dfrac{2\gamma}{d} \cdot \dfrac{T_{MC}}{\varepsilon_A} & ((\text{ii})\ T_{MD} = 0) \quad (32) \\ \dfrac{2\gamma}{d} \cdot \left(\dfrac{T_{MC}}{\varepsilon_A} + (k_A - 1) \cdot \left(\dfrac{1}{\varepsilon_A} - \varepsilon_D\right) T_{MC}\right) & ((\text{iii})\ T_{MD} < 0) \quad (33) \end{cases}$$

4.4 (i) 力行 $0 < T_{MD} < T_{MC}$ の場合の導出

加速区間及び減速区間のバッテリー供給電力 P_{bttry} は仮定 2, 3 から次のようになり，

$$P_{bttry} = \begin{cases} T_{MA} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}/\varepsilon_A & (a>0) \quad (34) \\ T_{MD} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}/\varepsilon_D & (a<0) \quad (35) \end{cases}$$

一周期当たりの消費電力量 E_{bttry} は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} E_{bttry} &= \int_0^{T_{cyc}} P_{bttry} dt \\ &= (1-r_D) \cdot T_{cyc} \cdot \frac{T_{MA} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}}{\varepsilon_A} + r_D \cdot T_{cyc} \cdot \frac{T_{MD} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}}{\varepsilon_D} \end{aligned} \quad (36)$$

ここでデューティ比 r_D に式 (19) を代入すると，モータトルク T_{MC}, T_{MA}, T_{MD} で消費電力量 E_{bttry} は次のように表せる．

$$E_{bttry} = \frac{2\gamma}{d} \cdot v_{cen} \cdot T_{cyc} \cdot \left(\frac{T_{MC} - T_{MD}}{T_{MA} - T_{MD}} \cdot \frac{T_{MA}}{\varepsilon_A} + \frac{T_{MA} - T_{MC}}{T_{MA} - T_{MD}} \cdot \frac{T_{MD}}{\varepsilon_D} \right) \quad (37)$$

さらに上式を式 (30) で表される重み k_A を使い整理すると，

$$E_{bttry} = \frac{2\gamma}{d} \cdot v_{cen} \cdot T_{cyc} \cdot \left(k_A \cdot \frac{T_{MC}}{\varepsilon_A} + (1-k_A) \cdot \frac{T_{MC}}{\varepsilon_D} \right) \quad (38)$$

を得る．これから，走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ の理論式は次式で与えられる．

$$E_{bttry/dist} = \frac{E_{bttry}}{v_{cen} \cdot T_{cyc}} = \frac{2\gamma}{d} \cdot \left(k_A \cdot \frac{T_{MC}}{\varepsilon_A} + (1-k_A) \cdot \frac{T_{MC}}{\varepsilon_D} \right) \quad (39)$$

また, $0 < T_{MD} < T_{MC} < T_{MA}$ から, 重み k_A は $0 < k_A < 1$ となる.

4.5 (ii) 慣性減速 $T_{MD} = 0$ の場合の導出

(i) 力行 $0 < T_{MD} < T_{MC}$ の場合の導出において，$T_{MD} = 0$ とおけば，以下の走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ の理論式が得られる．この場合，重み k_A =1 と考えられる．

$$E_{bttry/dist} = \frac{E_{bttry}}{v_{cen} \cdot T_{cyc}} = \frac{2\gamma}{d} \cdot \left(\frac{T_{MC}}{\varepsilon_A} \right) \quad (40)$$

4.6 (iii) 回生 $T_{MD} < 0$ の場合の導出

加速区間及び減速区間のバッテリー供給電力 P_{bttry} は仮定 2, 3 から次のようになる．減速区間 (a<0) で充電動作になる点が (i) の場合と異なる．

$$P_{bttry} = \begin{cases} T_{MA} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}/\varepsilon_A & (a>0) \quad (41) \\ T_{MD} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen} \cdot \varepsilon_D & (a<0) \quad (42) \end{cases}$$

ゆえに一周期当たりの消費電力量 E_{bttry} は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} E_{bttry} &= \int_0^{T_{cyc}} P_{bttry} dt \\ &= (1-r_D) \cdot T_{cyc} \cdot \frac{T_{MA} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen}}{\varepsilon_A} + r_D \cdot T_{cyc} \cdot T_{MD} \cdot (2\gamma/d) \cdot v_{cen} \cdot \varepsilon_D \end{aligned} \quad (43)$$

ここで (i) の場合と同様に，デューティ比 r_D の式 (19) による置き換えと，式 (30) で表される重み k_A を使い整理すると，消費電力量 E_{bttry} と走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ の理論式は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} E_{bttry} &= \frac{2\gamma}{d} \cdot v_{cen} \cdot T_{cyc} \cdot \left(\frac{T_{MC} - T_{MD}}{T_{MA} - T_{MD}} \cdot \frac{T_{MA}}{\varepsilon_A} + \frac{T_{MA} - T_{MC}}{T_{MA} - T_{MD}} \cdot T_{MD} \cdot \varepsilon_D \right) \\ &= \frac{2\gamma}{d} \cdot v_{cen} \cdot T_{cyc} \cdot \left(k_A \cdot \frac{T_{MC}}{\varepsilon_A} + (1-k_A) \cdot \varepsilon_D \cdot T_{MC} \right) \\ &= \frac{2\gamma}{d} \cdot v_{cen} \cdot T_{cyc} \cdot \left(\frac{T_{MC}}{\varepsilon_A} + (k_A - 1) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - \varepsilon_D \right) T_{MC} \right) \end{aligned} \quad (44)$$

$$E_{bttry/dist} = \frac{E_{bttry}}{v_{cen} \cdot T_{cyc}} = \frac{2\gamma}{d} \cdot \left(\frac{T_{MC}}{\varepsilon_A} + (k_A - 1) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - \varepsilon_D \right) T_{MC} \right) \quad (45)$$

また, $T_{MD} < 0 < T_{MC} < T_{MA}$ から, 重み k_A は $k_A > 1$ となる.

4.7 消費電力量の最小化

4.4. 節– 4.6. 節より得られた走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ の理論式，式 (31)-(33) を用いて，Fig. 5 のモーションプランにおける消費電力量の最小化を検討する．

ここで，(iii) 回生 $T_{MD} < 0$ の場合において電力量を最小化するモータトルク T_{MD} とモータトルク T_{MA} の組合せを想定してみる．このとき，同じ T_{MA} を使い，(ii) 慣性減速 $T_{MD} = 0$ のモーションプランを考えると，(iii) においては，$k_A > 1$，$0 < \varepsilon_A < 1$，$0 < \varepsilon_D < 1$ のため，式 (32) の消費電力量 < 式 (33) の消費電力量となる．これは，(iii) の回生を含むプランよりも，走行距離当たり消費電力量が小さくなる (ii) の慣性減速のプランが必ず存在することを示している．つまり，回生を含むプランは消費電力量として最適とはなり得ない．

つぎに，(i) 力行 $T_{MD} > 0$ の場合において電力量を最小化するモータトルク T_{MD} とモータトルク T_{MA} との組合せが存在し，効率に関して，$\varepsilon_A > \varepsilon_D$ が成り立つものと仮定する．このとき，同じ T_{MA} を使い，(ii) 慣性減速 $T_{MD} = 0$ のモーションプランを考えると，(i) では，$0 < k_A < 1$，$0 < \varepsilon_D < \varepsilon_A < 1$ のため，式 (32) の消費電力量 < 式 (31) の消費電力量となる．これは，(i) における最適なプランよりも，走行距離当たり消費電力量が小さい (ii) のプランが存在することを示している．整理すると，上記の仮定が (i) に比べて (ii) のプランの消費電力量が小さくなる十分条件といえる．

最後に，(ii) 慣性減速 $T_{MD} = 0$ の場合において電力量の最小化を考えると，式 (32) から，$T_M > T_{MC}$ の領域においてモータ効率最大となるモータトルクを T_{MA} として選べばよいことがわかる．

ここで，モータ効率マップにおいて車速 $v = v_{cen}$ の線上の最大効率点を加速動作点 A として選択できる場合には，(i) におけるすべての減速区間モータトルク T_{MD} に対しても $\varepsilon_A > \varepsilon_D$ が成立し，さらに (ii) の場合での最良ケースとなるため，この加速区間モータトルク T_{MA} を使う (ii) のモーションプランが最適なプランとなる．このプランは PnG 戦略と一致する．つまり，モータ効率マップにおいて，車速 $v = v_{cen}$ の線上の最大効率点が $T_M > T_{MC}$ の領域にあることが，PnG 戦略が消費電力量として最適となる十分条件といえる．

参考のため，3 章の数値例において v_{cen} = 70 km/h における PnG 戦略の加速動作点 A と減速動作点 D を Fig. 6 のモータ効率マップ上に示す．さらに，T_{cyc} = 7.0 s における PnG 戦略と一定速度のモーションプランおよびモータトルク T_M，モータ効率 ε，消費電力 P_{bttry}，消費電力量 E_{bttry} の時間遷移を Fig. 7 に示す．Fig. 4 に比べ，PnG 戦略では加速区間モータトルク T_{MA} が大きくなり，これにともなってデューティ比 r_D が増大し，減速区間が延びることがわかる．

定量的な指標として，一定速度に対する (ii) の慣性減速 $T_{MD} = 0$ を含むプランの走行距離当たり消費電力量削減率ついて述べる．理論式は式 (29) と式 (32) から次式で与えられる．

$$\text{Reduction rate by (ii)} = 1 - \frac{\varepsilon_C}{\varepsilon_A} \quad (46)$$

上記の理論式は PnG 戦略の場合も当然成立する．Fig. 8 の上図に，各巡航速度 v_{cen} に対する一定速度及び PnG 戦略での走行距離当たり消費電力量 $E_{bttry/dist}$ のシミュレーション値を示す．各パラメータは 3 章の数値例のものを用いた．さらに Fig. 8 の下図に，各巡航速度 v_{cen} に PnG 戦略による一定速度に対する削減率のシミュレーション値および式 (46) による理論値を示す．いずれの巡航速度においても理論値とシミュレーション値との差が小さく，理論式 (46) が妥当であることを示している．削減率は v_{cen} = 52 km/h で最大値 8.7% となるが，それ以上の巡航速度では次第に減少し，v_{cen} = 112 km/h でほぼ 0% になる．これは，車速があがると一定速度の維持に必要なモータトルク T_{MC} が単調に増大し，PnG 戦略で使用する加速区間モータトルク T_{MA} との差が小さくなり，最終的には一致するためである．

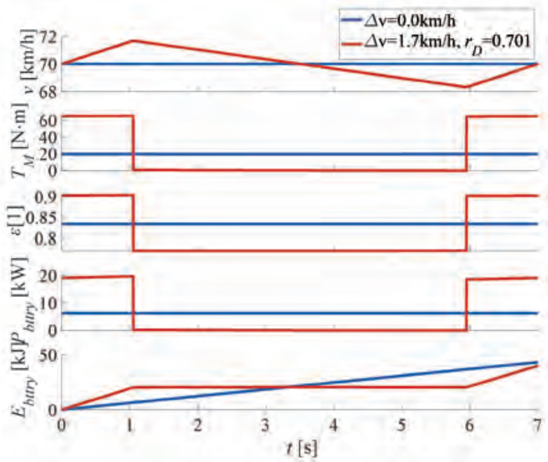

Fig. 7 Motion Plan based on PnG at v_{cen} =70 km/h , and T_{cyc} =7.0 s

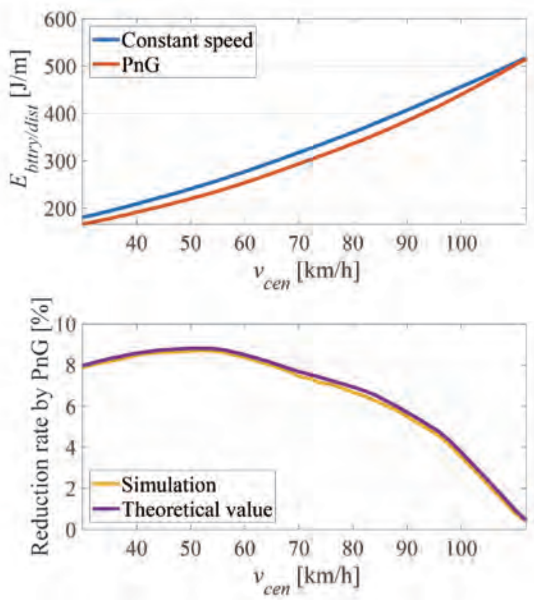

Fig. 8 Energy consumption per meter traveled for constant speed and PnG strategy for each cruising speed (top figure) and reduction rate by PnG strategy (bottom figure)

5. まとめ

本研究では，巡行速度を中心に三角波状に速度を変化させるモーションプランにおいて，減速区間モータトルク T_{MD} に応じて，(i) 力行 $T_{MD} > 0$，(ii) 慣性減速 $T_{MD} = 0$，(iii) 回生 $T_{MD} < 0$，の場合に分け，それぞれのケースでの走行距離当たり消費電力量の数値モデルを得た．

このモデルを使い，(iii) の回生を含むプランよりも消費電力量が小さくなる (ii) の慣性減速を含むプランが必ず存在し，回生を含むプランは消費電力量として最適とはなり得ないことを理論的に示した．また，(i) の力行を含むプランに比べ (ii) の慣性減速を含むプランの消費電力量が小さくなる十分条件を示した．モータ効率マップにおいて PnG 戦略を取り得る場合には，この十分条件に適合し，PnG 戦略が消費電力量として最適となる．

さらに，(ii) の慣性減速を含むプランが消費電力量の観点から有効であることを数値例にて定量的に示した．

参考文献

(1) Shengbo Eben Li, and Huei Peng : "Strategies to minimize the fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 226.3 (2012), p.419-429, doi:10.1177/0954407011420214

(2) Kai Man So, Patrick Gruber, Davide Tavernini, Ahu Ece Hartavi Karci, Aldo Sorniotti, and Tomaz Motaln : "On the Optimal Speed Profile for Electric Vehicles", IEEE Access , vol.8 (2020), p.78504-78518, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2982930

(3) Mechanical Simulation : VehicleSim Browser Reference Manual Powertrain for Electric and Hybrid Electric Vehicles (BEV/HEV), Mechanical Simulation (2019), 20p.

(4) Mechanical Simulation : VehicleSim Browser Reference Manual Powertrain System, Mechanical Simulation (2020), 56p

(5) Md Abdus Samad Kamal, Masakazu Mukai, Junichi Murata, and Taketoshi Kawabe : "Ecological Vehicle Control on Roads With Up-Down Slopes", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.12, no.3 (2011), p.783-794, doi:10.1109/TITS.2011.2112648

特集

著者

高野 岳
たかの がく

デンソーアイティーラボラトリ 研究開発グループ
モデルベースト制御に関する研究に従事

大林 真人
おおばやし まこと

デンソーアイティーラボラトリ 研究開発グループ
MPC によるモーションプランニングおよびオンライン数理最適化に関する研究に従事

宇土 敬祐
うと けいすけ

デンソーアイティーラボラトリ 研究開発グループ
電池・制御関連の数理最適化応用研究に従事