

令和元年6月25日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06193

研究課題名(和文) 目標変動と可変感度特性を利用した無意識な燃費最適運転への誘導装置設計

研究課題名(英文) Design of Hybrid Vehicle Driving System for Unconscious Fuel Consumption Using Changing of Target Engine Speed And Sensitivity

研究代表者

日高 浩一 (HIDAKA, Koichi)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：10321407

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ハイブリット電気自動車(HEV)の燃費向上を行うためには、運転者の要求速度に対してエンジンとモータの力配分が重要である。自動車の運転の場合、高効率な燃費走行はエンジン制御と共に運転者の技能や運転特性に依存してしまう。そこで今回は運転者の技能にできるだけ依存しないで燃費性能の向上を目指すための制御方法に関する研究を進めてきた。この目的を達成するために、本研究では運転者の速度予測を組み込むことを想定し、電池残量を考慮しながら要求速度に対して最適なエンジンとモータ各トルク配分を発生するアルゴリズムにモデル予測制御法(MPC)を応用する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではハイブリット電気自動車(HEV)の駆動部の制御方法にモデル予測制御法(MPC)を応用することで、運転者の要求する速度に対して燃料消費の効率がよいエンジン回転数領域では要求速度が出せない場合でもモーター補助を加えることで走行可能となる駆動方法を提案した。この方法の特徴としては、エンジン回転数と効率を表すマップデータを利用し運転者の要求速度が予測できたと仮定した時、電池残量を考慮しながらモータアシストを加えて効率的なエンジン回転数を決定する点である。

研究成果の概要(英文)：This study proposes to design a controller to improve the fuel economy of a hybrid electric vehicle using model predictive control with linear parameter-varying systems. The power-split configuration combines the advantages of both series and parallel hybrid vehicle, and can drive a generator to charge a battery by dividing engine power via a planetary gear set. Rule-based and dynamic programming controllers have been proposed on the basis of a certain driving cycle to improve the fuel economy of hybrid electric vehicles, however, the performance of the methods changes depending on a certain driving cycle that is used for the designs. Therefore, we utilize model predictive control to improve the fuel economy of hybrid electric vehicles. A dynamic model of the drive system of the hybrid electric vehicle is adopted a linear parameter-varying system, which depends on vehicle speed. Furthermore, an optimal fuel map is devised from test data performed by driving cycles of an actual vehicle.

研究分野：機械システム

キーワード：ハイブリット電気自動車 モデル予測制御 線形時変システム 充電率(SOC) 駆動部制御

1 研究開始当初の背景

運転者の走行技能に依存せずに燃費を向上させるための制御方法の検討をハイブリット電気自動車 (Hybrid Electric Vehicle: HEV) を対象として実施する。従来までの HEV の燃費改善の制御設計として、動的計画法 (Dynamic Programming: DP) や ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy: ECMS)、ルールベース法 (Rule-Based: RB) を利用した方法が黎明期において提案されてきた。しかし DP 法においては、運転サイクルを与えずに最適解を導くことは不可能であり、ECMS 法と RB 法の性能は設計で用いた運転サイクルに依存するため、走行パターンが変化すると燃費を低下させる欠点があるなど、これらの方法には実用的な側面から問題があった。さらに制御器の出力指令が運転者にとって最適なものであることも考慮していない等、改善、検討する点も多々存在している。

2 研究の目的

本研究では走行中の各駆動部の状態を考慮でき、多入力多出力系を扱えかつ予測と最適化の面で燃費改善が期待できるモデル予測制御 (Model Predictive Control: MPC) による HEV 駆動部システムの制御設計を提案する。従来の MPC による燃費改善のための HEV 制御設計では線形モデルを利用した方法や非線形制御でアプローチする方法などが提案がされてきた。しかし、線形モデルを利用した方法では設計したモデルの精度が MPC の性能に依存してしまう点がある。一方、非線形制御では線形 MPC と比較して高い性能を達成できるが計算コストが高く実用化の面で問題がある。さらに HEV 駆動部モデルでの駆動部関連では非線形性はバッテリーモデルだけとなっている。さらに運転者の運転感覚の満足度が要求速度への追従など、車速に大きく依存していると考え、本研究ではバッテリー以外の制御設計で使用する数式モデルを、車速をパラメータとした線形パラメータ変動 (Linear Parameter-Varying: LPV) モデルで設計した。MPC が設計したモデル性能に依存することを考慮し、シミュレーション出力と実機での出力から得られる誤差をモデルとして表現することで設計した誤差モデルに導入し、モデル化誤差の低減を行っている。提案したシステムの評価には米国のある国立研究所のデータに基づいて設計された MATLAB のサンプルプログラムである MathWorks 社のパワースプリット HEV モデルを利用して、燃費性能および電池残量率の変化および車速追従を評価にシミュレーションにより有効性の検討と共に、シミュレーションで使用する HEV 駆動部モデルをドライビングシミュレータに組み込み、実際の運転走行を模擬した環境での走行実験でも有効性の検討を行うことを目的とする。

3 研究の方法

- (1) ワースプリット HEV を対象として、プラネタリーギアにおける回転の運動方程式やバッテリーの充放電特性などの物理方程式を利用しかつ車速 V により動的性能が変化することから、車速 v をパラメー

タとした LPV システムで制御設計用モデルを以下で与えた。

$$\dot{x}(t) = A(V(t))x(t) + Bu(t), y(t) = Cx(t), A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12}(V) & 0 \\ 0 & a_{22}(V) & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

$$a_{12} = 0.5b\rho C_d A_f \omega_{mot}(V) \frac{r\omega}{g_f^2}, a_{22} = -0.5a\rho C_d A_f \omega_{mot}(V) \frac{r\omega}{g_f^2}$$

$$a = J_{eng} + \left(\frac{N_s + N_R}{N_s}\right)^2 J_{gen}, b = -\left(\frac{N_R(N_s + N_R)}{N_s^2}\right) J_{gen}$$

(2) 燃費改善のために以下の評価式を利用した。

$$V(k) = \sum_{i=1}^{H_p} \|y(k+i|k) - r(k+i|k)\|_{W_y}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|u(k+i|k)\|_{W_u}^2$$

ここで、 $r(k+i|k)$, $H_p > 0$, $H_u > 0$ はそれぞれ、出力の目標値、予測ホライズン、制御ホライズンであり、 $W_y \in \mathbb{R}^{nH_p \times nH_p}$ と $W_u \in \mathbb{R}^{mH_u \times mH_u}$ (n : 出力数, m : 入力数) は入力と出力の重み行列を表している。

(3) 車速 V に依存して変動する LPV システムの安定性を、変動パラメータ v を利用した変動範囲の行列ポリトープで定義し任意の対 $(x_{k+j|k}, u_{k+j|k})$ とすべての $j \geq 0$ に対して $V(x_{k+j+1|k}) - V(x_{k+j|k}) \leq -L(x_{k+j|k}, u_{k+j|k})$ が成り立つリアブノフ関数 $V(x) = x^T P x$ ($P > 0$) を利用し、最適解行列 ΔU^* の $\Delta u^*(k)$ を利用しサブコントローラ入力 $u(k)$ を以下で設計する方法を提案した。

$$\Delta U^* = \min_{\Delta U} \frac{1}{2} [\Delta U^T H \Delta U + F^T \Delta U], W \Delta U(k) \leq w$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u^*(k)$$

4 研究成果

(1) モデル予測制御用モデル精度の向上

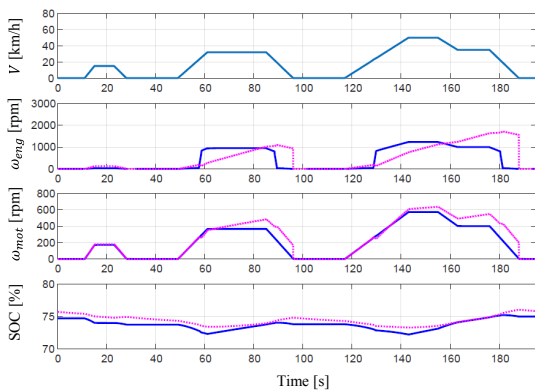


図1 設計モデルの評価 (実線: プラント出力, 点線: モデル出力)

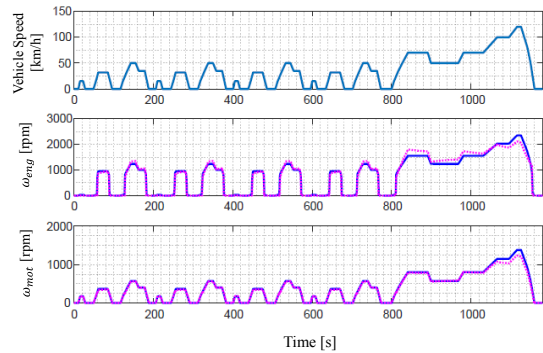


図2 修正モデルの評価 (実線: プラント出力, 点線: モデル出力)

図1はシミュレーションから得られるプラント出力と設計したモデル出力の結果を示す。この結果より、エンジンとモーターモデルは時間の経過に伴って増加する特徴が見られた。さらに、プラント側のエン

ジンは低速走行時に停止していても関わらず、モデルは停止していないことが確認される。この現象により、走行時間が経過することでプラントとモデルの誤差が増加し、このモデルを MPC に適用したときには HEV の性能が改善されないと考えられる。これらは低中速走行における各トルク特性が大きく変わること、係数行列 A, B のモデル化誤差が時間と共に蓄積することが理由と考え、プラントとモデルの誤差が車速に依存して変動すると仮定して誤差特性をエンジン誤差は 1 次関数、モーター誤差は遅れ系のシステムで表現し誤差を補償する方法を提案した。修正したモデルの評価を New European Driving Cycle (NEDC) $T_{sim} = 1180[s]$ の下でシミュレーションを行い、その結果を図 2 に示す。図 2 よりエンジンとモーターのモデル出力は時間に比例して増大する誤差を低減でき、エンジンモデルはプラントが停止するタイミングで正しく停止するなどモデル性能の向上を達成できた。

(2) 燃費性能および電池残量 (SOC) 低下軽減の達成

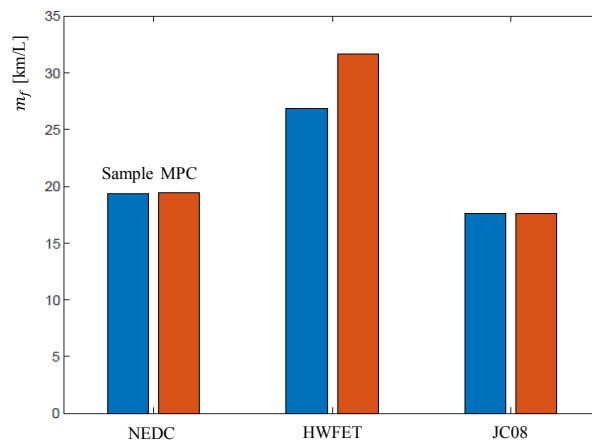
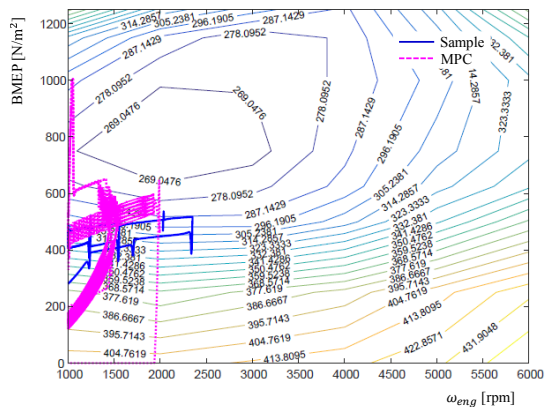
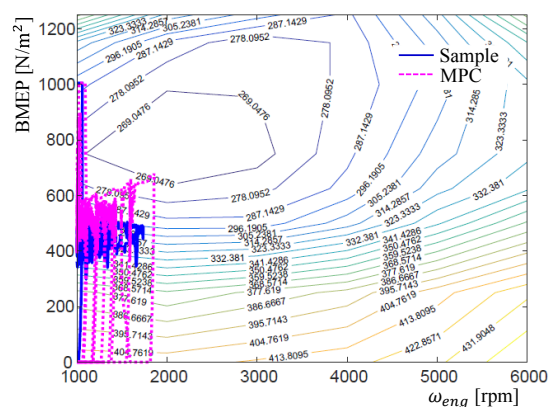


図 3 モード走行における燃費 (サンプル: 左, MPC: 右)

図 3 は NEDC, The Highway Fuel Economy Cycle (HWFET)、JC08 モード走行によるサンプル制御器と MPC の燃費結果より、MPC はそれぞれのモード走行においてサンプル制御器よりも 0.5149%、15.20%、0.3403% の燃費改善を達成できた。NEDC と JC08 モード走行ではサンプル制御器とほぼ変わらない結果であるが、図 4 に示すエンジン動作点の結果から、MPC はサンプル制御器と比較しより効率の良い領域で駆動していることがわかる。また図 5 と 6 から、サンプル制御器側では SOC の過充電が見られているが、MPC 側では SOC に応じて、エンジン回転数を下げることでエンジンの余剰エネルギーでバッテリーを充電しないような動作も確認できる。以上の結果より 3 種類の走行パターンにおいて、MPC はサンプル制御器よりも燃費を改善したことを確認できた。



(a) NEDC



(b) HWFET

図4 エンジン動作点 (実線: サンプル, 点線: MPC)

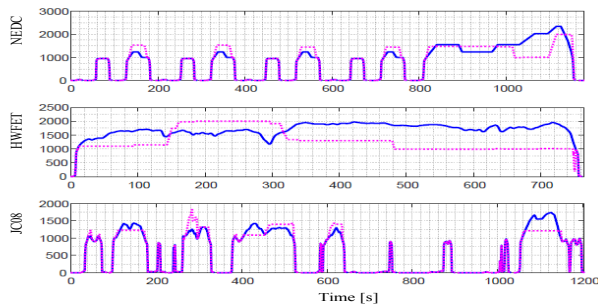


図5 エンジン回転数 (実線: サンプル, 点線: MPC)

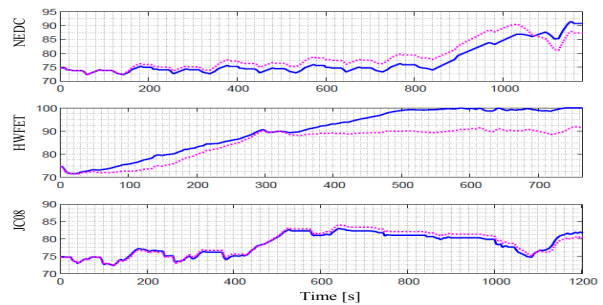


図6 SOC (実線: サンプル, 点線: MPC)

〈引用文献〉

- ① Pei and M. J. Leamy, “Dynamic Programming-Informed Equivalent Cost Minimization Control Strategies for Hybrid-Electric Vehicles,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 135, pp.1-12, Sep 2013
- ② S. Overington and S. Rajakaruna, “A combined High-efficiency Region Controller to Improve Fuel Consumption of Power-Split HEVs,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 6, pp.4597-4607, June 2016
- ③ C. Zhang, A. Vahidi, P. Pisu, X. Li, and K. Tennant, “Role of Terrain Preview in Energy Management of Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, No. 3, pp.1139-1147, March 2010
- ④ S. Miller, “Hybrid-Electric Vehicle Model in Simulink,” <https://jp.mathworks.com/matlabcentralfileexchange/28441-hybrid-electric-vehicle-model-in-simulink>
- ⑤ Hiroki Koguchi, Koichi Hidaka, “On-Line Controller for Fuel Consumption on Split-Type Hybrid Electric Vehicle,” 8th IFAC Symposium Advances in Automotive Control (AAC 2016), pp. 252 - 257, Sweden, 2016
- ⑥ 阪本 篤志, 池田 裕一, 山口 功, 木田 隆, “モデル予測制御による宇宙機の非線形トラッキング制御: 線

形パラメータ変動システムを用いた設計,” 日本航空宇宙学会 (論文), Vol. 15, pp.133-140, 2016

5 主な発表論文等

[国際会議論文](計 2 件)

- ① Yuta Takahashi, Koichi Hidaka, “Energy Management for Hybrid Electric Vehicles Using Linear Parameter-Varying MPC,” SAMCON2019, Chiba, Japan, March, 査読有, TT6-2(6 page), 2019
- ② Yuta Takahashi, Koichi Hidaka, “Model Predictive Control for Hybrid Electric Vehicles with Linear Parameter-Varying Model,” 18th International Conf. Control, Automation and Systems (ICCAS 2018), PyeongChang, Korea, 査読有, pp. 1501–1506, Oct., 2018

[学会発表](計 4 件)

- ① 矢萩北斗, 日高浩一, モデル予測制御による HEV の燃費最適な参照軌道の検討 MSCS2019, 2019 年 3 月, PS-1-7(2page), 2019
- ② 高橋 優太, 日高 浩一, HEV 燃費最適運転のためのモデル予測制御と目標軌道設計, 第 61 回自動制御連合講演会, 2018 年 11 月, 名古屋, pp.1800–1805, 2018
- ③ 高橋 優太, 日高浩一, HEV 駆動部のモデリングおよびモデル予測制御を用いた制御設計, 第 60 回 自動制御連合講演会, FrD2-1(4 ページ), 東京, 2017
- ④ 高橋 優太, 日高 浩一, 鈴木 辰弥, LPV を利用した HEV 駆動部システムのモデリングとその評価, 電気学会 C 部門大会, pp.I288–I293(6 ページ), 香川, 2017

6 研究組織

研究協力者

- (1) 研究協力者氏名： 高橋優太
ローマ字氏名：TAKAHASHI, Yuta
- (2) 研究協力者氏名： 矢萩北斗
ローマ字氏名：YAHAGI, Hokuto