

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25289050

研究課題名(和文) 道路情報と地形情報を利用した電気自動車の航続距離延長制御の研究

研究課題名(英文) Range Extension Control for Electric Vehicle Using Information on Road and Geography

研究代表者

川邊 武俊 (Kawabe, Taketoshi)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：60403953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,300,000円

研究成果の概要(和文)：エミッション性能に優れる電気自動車は次世代移動手段として期待されているが、一充電あたりの航続距離の延長が課題とされている。そこで、下り勾配走行時や減速時に回生充電が可能な電気自動車の特徴を利用した航続距離延長の制御方法を提案した。デジタルマップおよびGPS、を利用を前提とし、現在地点から目的地点までの道路勾配情報、信号機の現示変化予定などを既知と考え、電気自動車の動特性やエネルギー消費に関する特性をモデル化し、電力消費を抑制するモデル予測制御系の制御問題を定式化した。ある典型的な坂道通過を計算機シミュレーションしたところ、提案手法は電力消費を16%程度抑制する効果が確認された。

研究成果の概要(英文)：Electric vehicle (EV) is expected to be a mobility in near future for its good emission performance. However, range of EV for one charge should be extended for it is generally used as an alternative of current automobile. Therefore, we propose a control methodology for the range extension exploiting the EV's property that EV can regenerate during going downhill slope/braking. The range extension problem has been formulated based upon model predictive control scheme with a performance index including a term that represents electric energy consumption and a vehicle model that represents electric properties of an EV as well as predictive traffic circumstances, e.g. change of traffic signals. In this scheme the traction force and braking force of the EV is optimized and renewed at each sampling time of the control. Computer simulation results showed that the proposed control improved energy consumption in 16% or so at typical hill climbing and successive descending.

研究分野：制御工学

キーワード：電気自動車 制御工学 モデル予測制御 省電力

1. 研究開始当初の背景

CO₂の総排出量の低減やエネルギー問題が世界的に重要視されており、運輸部門、特に自動車のCO₂排出量やエネルギー消費の削減が課題とされ、現在に至っている。当初は、課題解決のための手段としてディーゼルエンジン車、ハイブリッドを含む電気自動車をガソリン車の代替手段とすることが検討されていた。ディーゼルエンジンの環境性能は期待に届かないことが次第に明らかとなり、現在では、電気自動車へ一本化する政策が欧州を中心に進められている。

ところが、研究当初から、電気自動車の蓄電池の容量は、今日的な使用状況では十分大きいとはいえず、航続距離が内燃機関の自動車に比べ約1/2弱と短いことが欠点であり、電気自動車の普及を妨げる一因となっている。蓄電池の大容量化は現在でも研究課題となっているが、決定的な解決方法は未だ発見されていない。その他にも、充電の利便性の向上が課題となっており、充電設備の増設や、非接触走行中給電などのアプローチが継続的に検討されている。

制御技術の観点から、筆者らは内燃機関や、ハイブリッド電気自動車を対象として、その燃費を向上させる研究を進めていた。その結果、目的地までの道路勾配、信号機の現示などを先見情報とし用い、自動車の燃料消費特性をモデルに組み込んだモデル予測制御型の走行制御を適用すれば、大幅なエネルギー消費の削減が見込めることを計算機シミュレーションで明らかにしていた。

2. 研究の目的

図1に概念を示すように、目的地までの道路勾配、信号機の現示など、道路交通情報がIT技術の進歩で、走行中の自動車で取得可能となりつつある。そこで、道路交通情報を先見情報として活用し、目的地までの電力消費を削減する電気自動車用の走行制御方法を開発する。

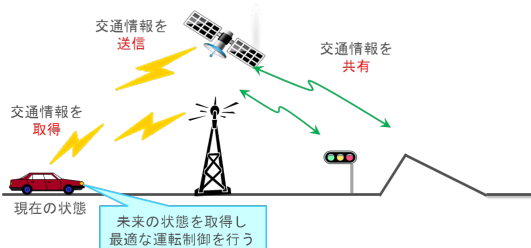


図1 道路交通情報を用いた電気自動車の省電力化

3. 研究の方法

最適制御問題をベースとした、モデル予測制御系(実時間最適化)⁶⁾の設計問題を考える。

モデル予測制御系の設計方法を、最適制御問題の定式化と、その数値解法の両面から検討した。純粋な電気自動のモデル予測制御以外にも、関連するハイブリッド電気自動車の制御問題も扱い、実時間最適化に関する共通

的な知見を得ることとした。その過程で、実用化に至るまでの課題を抽出し、解決法を考える。実用のシステムとするためには、通信や車載センサーなどの性能を考慮する必要があるが、通信、センシング技術には今後の更なる進歩がみこまれる。そこで、通信、センシングの性能は十分であると仮定した。最適制御問題の定式化や数値演算の課題の基本的な部分に研究の焦点をあてた。

- (1) 電気自動車の走行と電力消費との関係を表す最も簡潔なモデルを採用した。
- (2) 自動車の省電力化問題を最適制御問題として定式化する方法を検討した。すなわち、省電力化に有効なステージコスト、拘束条件の設定法を検討した。
- (3) 設定した最適制御問題を、モデル予測制御の形で実装する検討を行った。最適制御問題の“ソルバー”として、C/GMRES法(実時間最適化の場合)、混合整数計画法の適用を検討した。
- (4) 制御効果や実装可能性について、PCを用いた計算機シミュレーションで検証した。
- (5) 計算機シミュレーションのデータの一部は企業から提供を受け、研究を加速した。また、制御効果の評価に関しても、一部企業の協力を得た。

4. 研究成果

モデル予測制御をベースに、自動車の省エネルギー化を考える上で、以下のような知見が得られた。

4.1 勾配情報の利用(C/GMRES法を適用)

L をステージコスト、 $\dot{x} = f(x, u)$ を制御対象の状態方程式とする。最適制御問題

$$\min J, \quad J = \int_0^{\tau} L(x, u) d\tau$$

subject to

$$\dot{x} = f(x, u)$$

へ定式化の一例を示す。状態方程式は：

$$x = [p \quad \omega_{MG} \quad SOC]^T$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} v \\ \tau_{MG} - \frac{\tau_{resist} + \tau_{brake}}{a} \\ I_{MG} + \frac{I_w + mr^2}{a^2} \\ \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4P_{bat}R_{bat}}}{2R_{bat}Q_{bat}} \end{bmatrix}$$

とした。動特性は、車両を質点と近似し、モータ・ジェネレータ周りに見た運動方程式(1行および2行)と蓄電池の充放電の動特性(3行目)で表わしている。 p は自動車の位置、 ω_{MG} はモータ・ジェネレータの回転速度、 SOC は蓄電池のstate of charge(以下SOC)である。最適化する入力 τ_{MG} であ

り、モータ・ジェネレータが発生するトルクとする。 v, P_{bat} はそれぞれ自動車の速度、蓄電池が発生する電力である。 V_{OC}, R_{bat}, Q_{bat} はそれぞれ蓄電池の端子電圧、内部抵抗、容量であり、 I_{MG}, I_w, m, r, a はそれぞれモータ・ジェネレータの慣性、車輪の慣性、車両の質量、車輪半径、ドライブトレインのギヤ比である。ここで

$$\tau_{resist} = rg \sin \theta + \frac{1}{2} C_{air} v^2$$

は走行抵抗であり、第一項は勾配抵抗、第二項は空気抵抗を表す。 θ は勾配、 g は重力加速度である。 τ_{brake} はブレーキが発生する制動トルクである。すなわち、勾配情報は、車両の運動方程式の中で、勾配抵抗として扱える。ステージコストは以下のようにとる。

$$L = L_a + L_b + L_c + L_d + L_e + L_f + L_g$$

$$L_a = -w_1 \frac{SOC}{v} Q_{bat}$$

$$L_b = w_2 (v - v^*)^2$$

$$L_c = w_3 \tau_{MG}^2$$

$$L_d = w_4 \tau_{brake}^2$$

$$L_e = -w_5 \ln(\omega_{MG} - \omega_{MG \min}) - \ln(\omega_{MG \max} - \omega_{MG})$$

$$L_f = -w_6 \ln(SOC - SOC_{\min}) - \ln(SOC_{\max} - SOC)$$

$$L_g = -w_7 \ln(P_{bat} - P_{bat \min}) - \ln(P_{bat \max} - P_{bat})$$

ここで v^* は速度の目標値、 $\omega_{MG \min}, \omega_{MG \max}$ はそれぞれモータ・ジェネレータの回転速度の下限と上限、 SOC_{\max}, SOC_{\min} はそれぞれ蓄電池のSOCの上下限、 $P_{bat \min}, P_{bat \max}$ はそれぞれ蓄電池の充放電電力の下限と上限である。電気自動車の制御においては、蓄電池の保護のため、SOC や充放電電力に上下限を設定することは必須と考えられる。上下限の設定は拘束条件として扱うことも可能であるが、数値演算の容易性からバリア関数 L_e, L_f, L_g で表現する。 $w_i (i=1, \dots, 7)$ は重みである。

L_b を取り去ると、 $v=0$ が自明解となり最適化の問題として意味をなさない。自明解は停止状態ではエネルギー消費が発生しないことに相当する。

内燃機関の自動車の燃料消費性能の指標である燃費の概念を拡張し、ステージコスト L_a に $-SOC Q_{bat} / v$ を用いると、電力消費を削減に有効であることが分かった¹⁵⁾。 L_a の効果を図2の計算機シミュレーション結果に示す。

前方直前に先行車両があり、先行車との衝突回避を考慮するには、衝突防止の項をステージコストに付け加えることが有効である^{3, 10, 16)}。該当するステージコストとして先行車との相対距離でバリア関数を設定する方法がある¹⁾。

L_c はモータ・ジェネレータのトルク発生を抑制する項であり、間接的にエネルギー消費を抑制する項である。電力消費は L_a で抑制されるので不要である可能性がある。この点は

今後の検討課題である。 L_d はブレーキによる運動エネルギーの散逸を抑制する項である。

図2に計算機シミュレーション結果を示す。図中“電費項あり”は $-SOC Q_{bat} / v$ をステージコストに入れた場合、 $-SOC Q_{bat} / v$ を取り去った場合を表す。勾配情報を利用した効果として、下り勾配では重力を利用した加速が見られる。“電費項あり”は、“電費項なし”に対し、目的地到着時点（走行距離 4900m）でのSOCが16%高くなっており、電力消費が減っている。ここでは最適化にC/GMRES法を用いた。

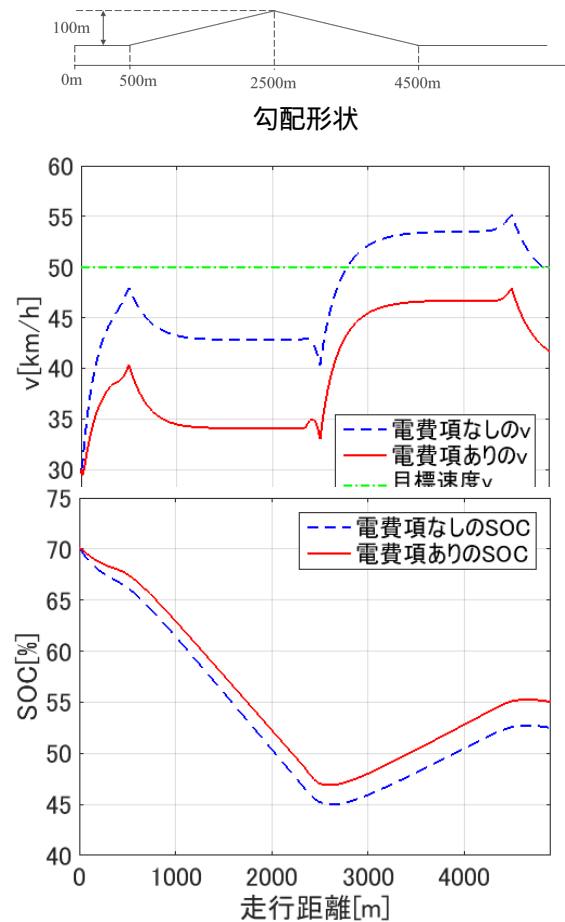


図2 勾配の形状と車両速度、SOCの変化。

4.2 信号現示情報の利用（混合整数計画問題への帰着）

信号機交差点を有する複数台の交通信号機が存在する単路における走行制御を考える。走行制御は信号機の動作を予測・利用したモデル予測型の最適化問題として取り扱う。交通信号機情報を事前に取得して、評価区間内の車両状態を予測し、これらを用いた現時刻の最適な制御入力計算を行う。この際、エネルギー消費に関する最適化問題を離散時間LQ最適制御問題とし定式化を行う。この定式化では、車両の状態に厳密な拘束条件を与える

ことが可能である．交通信号機情報はすべて事前に取得可能であると仮定している．得られた交通信号機情報と現在の車両情報をもとに，モデル予測制御コントローラにより車両に最適な加速操作量を与えるシステムとなっている．

車両モデルは，簡単化のため，質点で近似し，離散時間化した．評価関数は目標速度値と車両速度との2乗誤差および車両加速度の2乗の積算値としたLQ型を用いた．車両加速度の2乗の項がエネルギー消費を抑制する．

交通信号機は以下の3つのパラメータにより動作することとする．

- ・サイクル長： 信号機の現示変化の周期時間
- ・スプリット： 青現示時間のサイクル長に対する割合
- ・オフセット： 隣接信号機との青現示時間開始タイミングのずれ

また，本研究においては黄現示時間を赤現示開始前4sとしている．さらに交通信号機が赤現示の場合，交通信号機によって進入禁止となる区間を設ける．これは実際の道路でいえば交差点の長さを表す．制御車両はこのような動作を行う交通信号機から，最適制御の評価区間分の交通信号機の現示情報を毎時刻取得可能と仮定する．この際受け取る現示情報は，0-1変数により表す．ここで黄色現示は赤現示とみなす．0-1変数を用いることから，操作量の導出は混合整数計画問題に帰着される．

図3に計算機シミュレーション結果を示す上図で赤線は信号（交差点）の位置と通過不可の時間帯を示す．すなわち，車両は赤線と赤線の間を縫うように左下側から右上へ動くこととなる．図中の緑線は人間の運転を模したGippsモデルによる走行を表す．信号現示情報を利用したことにより，走行パターンはGippsモデルの運転より，加速・減速が少なく滑らかになる．また，赤信号で停止する頻度が少なくなる．文献2)では，ガソリン車を想定し，エネルギー削減効果を燃費に換算して評価している．3図のシミュレーションでは，燃費は15%の向上を見ている．滑らかな走行，停止・発進の少ない走行では，加速抵抗が少なくなり，エネルギー消費を抑制できる．電気自動車として得られた走行パターンを評価しても，本手法で高い省エネルギー効果が得られるものと予想される．

4.3 まとめ・その他の知見

勾配情報や，信号機現示の切替わりを先見情報として用いて，モデル予測制御系を構成した．その結果，省エネルギーな走行パターンが生成される

電気自動車，ハイブリッド電気自動車，エンジン搭載車の省エネルギー化に対応するには，車両モデル（状態方程式）の部分で，それぞれのモデルで置き換えることができ，本質的には同様の制御系設計ポリシーを用いることができる^{1,3,10,12}．電力消費を燃料消

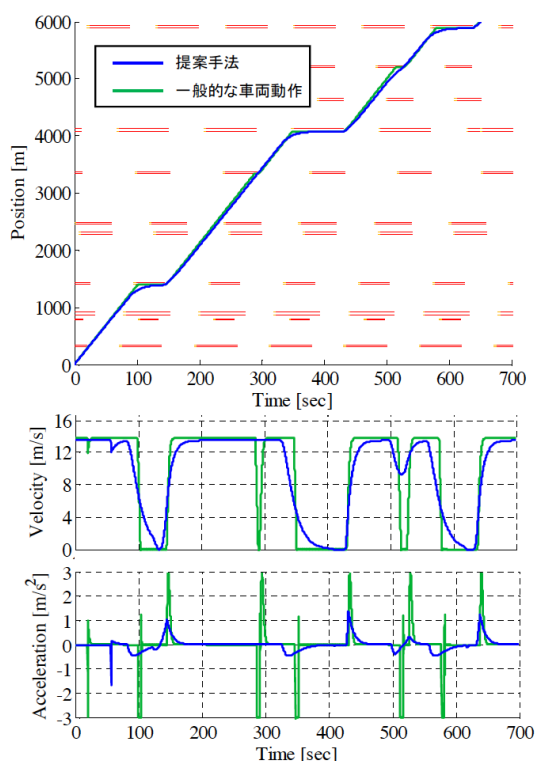


図3 信号機の現示情報を用いた省エネルギー走行制御の計算機シミュレーション結果．現示情報を先見情報として用いると，赤信号で停止する頻度が減り，停止・発進・加速に要するエネルギーが削減される．

費と置き換えれば，内燃機関搭載車両のステージコストとほぼ同様の考え方で電気自動車のステージコストを構成することができる．

扱う事象が連続的である場合と，離散的である場合がある．車両の挙動は連続的であり，ソルバーとしてC/GMRES法が有効である．一方，信号の現示の変化は離散的に扱うことが自然であり，ソルバーとしては混合整数計画法が有効である．

今後の研究課題としては以下が上げられる．顕在化した問題点としては：

- ・C/GMRES法は連続変形法をベースとしているため，制御車両の前方に急に他車両が割り込むなど，最適解が急変する場合，解の追跡に失敗することがある．

- ・混合整数計画法を用いる場合，C/GMRESに対し，ステージコストの設計が制約される．現状では手軽に利用可能なソルバーが，1次計画問題および2次計画問題にしか対応しておらず，電池やガソリンエンジンなどの非線形な特性を直接的に表現することが困難である．

対策としては以下が考えられる：

- ・C/GMRES法を用いる場合には，数値演算上のどの課程で失敗が起こるかを明らかにし，対策を講じる．

・本研究では、実時間最適化を考えたが、制御に関する演算の中で計算コストの大きい部分をオフライン計算する。

・C/GMRES 法は連立一次方程式の数値解に帰着され、数値解には GMRES 法が用いられた。GMRES を他のアルゴリズムに置き換える、または、並列計算し、計算終了までの演算時間を短縮する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

- 1) K.Yu, M.Mukai, T.Kawabe: Battery Management Using Model Predictive Control for a plug-In Hybrid Electric Vehicle, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.7, No.5, 304/312, (2014.9)
- 2) 向井正和, 青木博, 川邊武俊: 信号機情報を利用した混合整数計画法によるモデル予測型省燃費走行制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.12, 866/872, (2015.12)
- 3) K.Yu, H.Yang, X.Tan, T.Kawabe, Y.Guo, Q.Liang, Z.Fu, Z.Zheng: Model Predictive Control for Hybrid Electric Vehicle Platooning Using Slope Information, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.17, No.7, 1894/1909, (2016.7)
- 4) 向井正和, 野口凌介, 川邊武俊: 混合整数計画法を用いたモデル予測制御による 1 車線道路への合流経路生成, 計測自動制御学会論文集, Vol.52, No.11, 625/630, (2016.11)
- 5) 向井正和, 青木博, 川邊武俊, 1 車線道路における交通信号機情報と前方車両の挙動予測に基づく省燃費加減速制御, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.1, 161/166, (2017.01)

[学会発表](計 9 件)

- 6) K.Yu, M.Mukai, T.Kawabe: Performance of an Eco-Driving Nonlinear MPC System for a Power-Split HEV during Car Following, 計測自動制御学会 第 13 回制御部門大会資料, (2013.3)
- 7) 青木博, 向井正和, 川邊武俊: 信号機情報を用いた混合整数計画法によるモデル予測型省燃費運転制御, 第 56 回自動制御連合講演会, (2013.11)
- 8) H.Aoki, M.Mukai, T.Kawabe: Model Predictive Control for Eco-Driving Based on Prediction of Preceding Vehicle Motion with Traffic Signal Information (I), SICE Annual Conference 2014, (2014.9)
- 9) G.Valenzuela, T.Kawabe, M.Mukai: Nonlinear Model Predictive Control of Battery Electric Vehicle with Slope Information, IEEE International Electric Vehicle Conference 2014, (2014.12)
- 10) M.A.S. Kamal and T. Kawabe: Eco-driving using real-time optimization, Proc.of 2015 European Control Conference (ECC). July 15-17 2015. Linz Austria. 111-116, (2015.7)
- 11) Masakazu Mukai and Taketoshi Kawabe: Real-time generation of cooperative merging trajectory on the motor way using model predictive control scheme, Proc.of 2015 European Control Conference (ECC). July 15-17 2015. Linz Austria. 117-122, (2015.7)
- 12) Kaijiang Yu, Taketoshi Kawabe and Qing Liang: Model Predictive Control of Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using for Commuting, Proc.of SICE Annual Conference 2015. July 28-30 2015. Hangzhou China. 1774-1779, (2015.7)

- 13) 草富義也, 湯野剛史, 川邊武俊, 坂田昂亮, 小森谷佑一, 清水亮介: 交通信号切り替わりの将来情報を利用したモデル予測エコ・ドライビング制御, 第59回自動制御連合講演会, (2016.11)
- 14) 中野翔一, 川邊武俊, 湯野剛史: 実路データを用いた電気自動車のモデル予測型航続距離延長制御システムの計算機シミュレーション, 計測自動制御学会 第4回制御部門マルチシンポジウム, (2017.3)
- 15) 松尾俊輔, 川邊武俊, 湯野剛史: 電気自動車のモデル予測型省燃費運転制御における評価関数の検討, 計測自動制御学会 第5回制御部門マルチシンポジウム, (2018.3)

〔図書〕(計 1 件)

- 16) 大塚, 川邊, 向井他, 実時間最適化による制御の実応用, コロナ社(2015)

〔産業財産権〕
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川邊武俊 (KAWABE, Taketoshi)
九州大学大学院統合新領域学府オートモティブサイエンス専攻・教授
研究者番号: 60403953

(2) 研究分担者

向井正和 (MUKAI, Masakazu)
工学院大学工学部電気電子工学科・准教授
研究者番号: 50404059