

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560538

研究課題名(和文) 省電力で高い運動性と安全性を実現する次世代電気自動車開発のための制御法の研究

研究課題名(英文) Study of the control method for next-generation electric vehicle development to realize high performance, safety and electric energy saving

研究代表者

河辺 徹 (Kawabe, Tohru)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40224844

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：省エネルギーで環境負荷の少ないスマートシティの実現に不可欠な次世代EVの開発を目指して、本研究課題では、様々な走行状況の変化に対してロバストに、スリップ率、車両姿勢、回生ブレーキ等を、EVの特性を十分に活かして精度良く統合制御することで、省電力で高い運動性と安全性を実現する次世代EVの実用的運動制御法の開発を行った。具体的には、モデル予測制御(MPC)のアルゴリズムに基づいて2自由度PID制御器を設計する方法やスライディングモード制御を拡張/改良し、MPCと組み合わせた方法を構築し、EVのトラクション制御問題等において、安全性や省電力性、運動性能の向上を検証した。

研究成果の概要(英文)：The spread of electric vehicle (EV) is indispensable for the realization of the smart city with a little environmental load, and the development of EV becomes the key by energy saving in the next generation when we overcome problem of current EV. Therefore, by this research, I developed the practical EV control methods in the next generation to realize high kinetics, safety and electric power saving. It is a precision well control method by integrating the regenerative brake equipment, a slip rate control, vehicle posture control and so on by utilizing characteristics of EV enough. The method has robustness property against the various changing road conditions. Specifically, 2DOF (degree of freedom) PID control method by designing the MPC algorithm and the method combination expansion and improved sliding mode control and MPC. And then, these methods are verified the effectiveness of safety, electric power saving characteristics and motion performance by experiments.

研究分野：システム制御工学

キーワード：電気自動車 スリップ抑制 スライディングモード制御 モデル予測制御 2自由度PID制御

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災による原発事故の影響で、節電と電力供給の安定化が大きな課題となっており、スマートグリッド技術により電力供給の安定性/信頼性を向上させ、電気自動車(EV)や再生可能エネルギー等を組合せた、省エネルギーで環境負荷の小さな次世代都市：スマートシティの実現が急務となっていた。このような背景の下、EV普及への期待が高まっていた[1]が、広くEVを普及させるためには、まだまだ技術的に改良、改善すべき余地が残されていた。

### 2. 研究の目的

1. の背景の下、本研究課題では、省電力/高効率でかつ、高い安全性と運動性能を実現するEVの運動制御法を確立することを目指した。加えて、EVの走行環境は多岐で変化に富んでいる点も踏まえ、その制御法は、環境の変化に対してロバストに性能を保証するものであることも欠かせない。本研究課題では、研究代表者がその応用研究を長年行ってきたモデル予測制御(MPC)[別称：Receding Horizon 制御(RHC)]法を基礎として、次世代EVの実用的運動制御法の確立を目指したものである。

### 3. 研究の方法

“高安全性/高運動性ととも省電力性を陽に設計仕様とする制御”に対しては、電気モータの利点である「トルク応答がエンジンより2桁速い」、「発生トルクを正確に計測できる」点を活かして、状況に応じてレスポンス良く高精度にトラクションを制御することで、電力消費量を抑え、運動性と安全性の両面を向上させる手法を開発する。制動時の回生ブレーキの使用割合が電力蓄積効果だけでなく安全性や操作性にも大きく影響する点を考慮し、駆動時のスリップ率と制動時の回生ブレーキの使用割合による回生率と消費電力量、車両姿勢、旋回性能、加減速の応答性といった複数仕様の運動制御問題として設定する。そのうえで、これらの複数目的を単目的関数と制約条件に分類しwell-posedな最適化問題として定式化可能かどうかの検討を行う。可能なら標準的なMPCを応用した手法を開発し、その性能を検証する。同時に、可能でない場合を想定して、多目的最適化問題としても定式化し、パレート最適解集合を効率よく求め、走行状況に応じて最も適切な解を選択決定する多目的最適化型MPCの開発も行う。

“各種の環境変化に対しロバストに性能保証を行う制御”については、モデル化誤差や外乱に対するロバスト性に優れ、近年の計算機の発展により有効性と実用性の両面から再び注目されているスライディングモー

ド制御(SMC)とMPCを融合させたモデル予測スライディングモード制御法の開発やこれまで各種産業界の現場で用いられてきた実績の高いPID制御器をMPCのアルゴリズムを用いて高度化した制御器の開発を行う。そして、最終的には、の2つの制御法を統合し、多目的最適化型モデル予測スライディングモード制御法として体系化するとともに、実用化を目指して、シミュレーションならびに小型EVを製作して行う走行実験等によりその性能検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) MP-PID 制御法

特に駆動時のスリップ防止と適切なトラクション制御を行うことで、EVの運動性能と安定性を高め、不要な電力消費を抑制するための実用的制御方法としてMPCのアルゴリズムをPID制御器に用いる制御方法を改良し拡張することで、実用性と性能を向上させた。MPCは、システムの各種制約条件を陽に考慮することができる点で実用性の高い制御方法であるが、制御アルゴリズムの計算時間がかかることが欠点であった。一方、PID制御器は3つのパラメータのみを用いる簡単な構造で動作も理解しやすいため、古くから各種分野で適用され、現在でも様々な対象に対して用いられている実績も信頼性も高い制御器である。この両者を組み合わせることでMPCの欠点とPID制御器の実績を活かした補うものである、EVのスリップ抑制問題に対する実用的制御法となった。

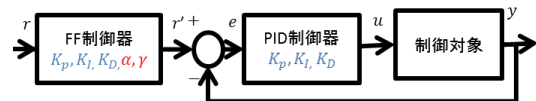


図1 2自由度PID制御系

具体的には、図1に示す2自由度PID制御器構造を既定し、一般的な状態空間モデル：

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + bu(k) \\ y(k) &= cx(k) \end{aligned}$$

で表される制御対象においてMPCに基づき

$$\min_{K_P, K_I, K_D, \alpha, \gamma} J(K_P, K_I, K_D, \alpha, \gamma)$$

$$J := \sum_{i=0}^{N_p-1} q_i \{\hat{e}(k+i+1)\}^2 + \sum_{j=0}^{H_p-1} r_j \{\hat{u}(k+jN_c)\}^2$$

の最小化問題を毎ステップごとに解き、自由度PID制御器の5つのゲインを求めて制御する方法である。なお、 $(K_P, K_I, K_D)$ がフィードバックゲイン、 $(\alpha, \gamma)$ がフィードフォワードゲインである。この手法の有効性を示す一例として、車重1000Kgの車両の発進加速

シミュレーション結果を図2に示す。これは、時刻0[sec]に加速を開始し最初の3秒間は乾燥した舗装だったのが、3秒後に凍結路面に変わった場合の5秒間のシミュレーションである。赤線が提案手法の2自由度MP-PID制御法、緑が1自由度PID制御法、青が制御なしの場合のスリップ率の応答結果である。加速時のスリップ率は、いかなる場合も0.13を保つことがよいことが実験的にわかっているが、赤線を見れば、路面状況が変化してもレスポンスよく反応してこの値を保っていることがわかる。

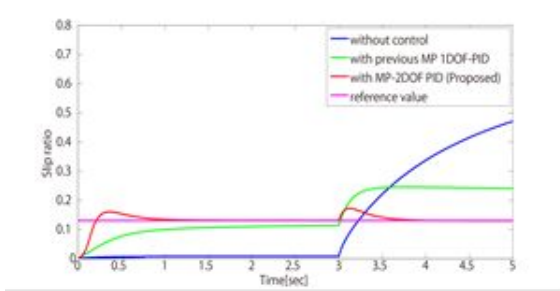


図2 スリップ率の時間応答 (車両重量:1000Kg)

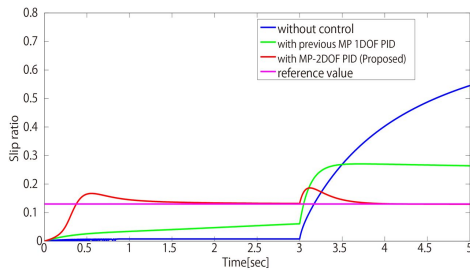


図3 スリップ率の時間応答 (車両重量:1400Kg)

また、図3に車両重量を1400Kgとした場合の結果を示す。図2と比べて、赤線はほとんど変化がないことがわかる。このことから、2自由度MP-PID制御法は、路面状況だけでなく車両重量の変動に対してもロバストな性能を持っていることがわかる。

### (2) MP-SMC-I 制御法

まず、路面状況や重量変動などに対してロバストにスリップ抑制を行いつつ電力消費量を抑える、積分要素を加えたスライディングモード制御法(SMC-I法)を開発した。これは、次式の右辺2項のように、SMCの滑り面の設計においてゲイン付の積分項を追加するもので、これにより出力の定常偏差の低減を図るものである。

$$s(\lambda, t) = \lambda_e + K_{in} \int_0^t \lambda_e(\tau) d\tau$$

しかし、積分要素ゲインの値については定性

的な指針しか得られず、当初はこのパラメータが性能やエネルギー効率に与える影響を解析し、この結果に基づいて実験的に求めて固定値を与えていた。この方法での性能結果はそれほど悪いものではなかったが、更なる性能向上を目指し、MPCのアルゴリズムを用いて、スリップ抑制性能と省電力性能の2つの規範に基づいて適応的にこの値を最適化する方法として、MPCとSMCの統合化制御法であるMP-SMC-I法を開発した。これは、積分ゲイン $K_{in}$ を、

$$\min_{K_{in}} J(K_{in})$$

$$J(K_{in}) = \sum_{i=0}^{H_p-1} (q|\hat{\lambda}_e(k+i+1)| + r|\hat{T}_m(k+i)|)$$

により毎ステップごとにMPCのアルゴリズムで最適化するものである。ここで、 $e$ はスリップ率の偏差(目標とする理想的値である0.13との差)、 $T_m$ はモータトルクを表す。また、 $q, r$ はそれぞれ重みである。このMPCによる $K_{in}$ の決定を行うことで適応的に最適な積分ゲインを決めつつ、SMCによるロバストな制御を行うのが、MP-SMC-Iである。これを用いた制御系は図4のように表される。

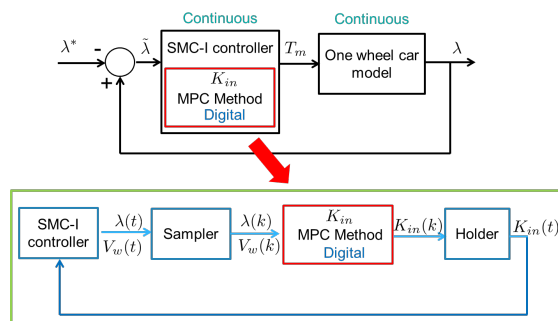


図4 MP-SMC-I 制御系の構成

このMP-SMC-I法をスリップ抑制制御問題に用いた場合の性能検証結果について記す。比較のため、制御なし、通常のSMC法、SMC-I法を用いた場合の結果を併せて示す。

表1 シミュレーション設定

路面状況	0-8[s] on icy road 8-9[s] on wet asphalt road 9-10[s] on dry asphalt road
車両重量	$M = 1400$ [kg]
SMC	$c_n = 0.5$ $K_{in} = 0$
SMC-I	$M_n = 1200$ [kg] $K_{in} = 6$
MP-SMC-I	$\Phi = 1$ $\eta = 10$ $0 \leq K_{in} \leq 200, \Delta K_{in} = 1$ $q = 10^8, r = 1$ $H_p = 3, SamT = 0.01$ [s]

なお、シミュレーションの設定(路面状況、実際の車両重量ならびに各制御法のパラメータ設定値: なお、いずれの制御法において

も想定する車両重量は 1200Kg だが実際には 1400Kg とずれを持たせてロバスト性を検証する)は表1の通りである。

この設定でのシミュレーション結果(スリップ率、車体速度、トルク、 $K_{in}$ の時間応答)を図5に示す。

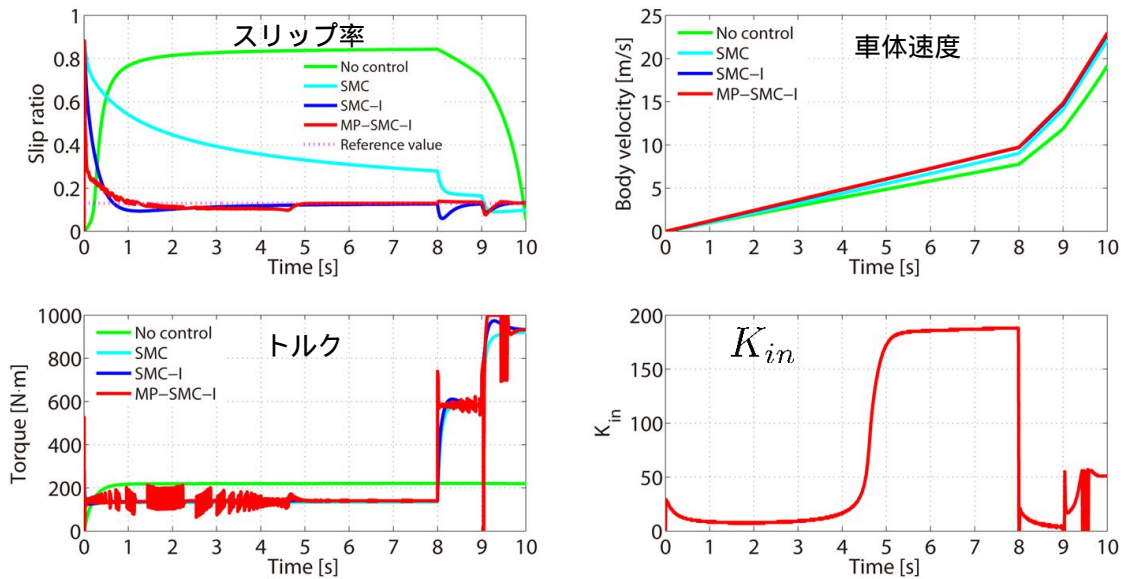


図5 シミュレーション結果

また、省電力性能については、次式で表される平均電力消費率 ([Wh/km]) で比較を行った。

$$E_p = \frac{E_r}{D_d}$$

ここで、 $E_r$ は全体として消費した電力量、 $D_d$ は10秒間(シミュレーション時間)での走行距離を表す。この結果、 $E_p$ の値は、制御なし、通常の SMC、SMC-I、MP-SMC-I においてそれぞれ、1114、545、528、527 となり、省電力性能でも MP-SMC-I 法が優れていることが示された。

### (3) まとめ

本研究課題では、特に(a)モデル予測型2自由度PID制御法と(b)MPCとSMCの統合化の一つの形態としてMP-SMC-I制御法を、新たに理論的に構築でき、また次世代EVの運動制御用として特にスリップ抑制制御問題に対し、省電力性、ロバスト性に優れた実用的なものであることを検証した。紙面の関係で割愛したが、これら2つの他にも、設計指標を多目的とした多目的最適化型ロバストモデル予測制御に基づく(a)および(b)の拡張や、乗り心地性能が特に運転者の安全性に大きな影響を与えることを考慮して、主として加減速によって生じる車両挙動に起因する乗り心地を対象とした、ピッチ角速度を用い

た新たな評価指標を構築し、これに基づき走行性能と乗り心地の両者を満足させる走行を実現するトルクパターンの導出なども行った。

### <引用文献>

[1] “特集：制御技術で描く電気自動車の将来像”，計測と制御，Vol. 50, No. 3, 2011.

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Shabo Li and T. Kawabe : Slip Suppression of Electric Vehicles Using Sliding Mode Control Based on MPC Algorithm, International Journal of Engineering and Industries, Vol.5, No.4, pp.11-23, 2014 (査読有), <http://www.globalcis.org/ijei/ppl/coverpage/IJEI13459105621toc.pdf>.  
T. Kawabe : Model Predictive 2DOF PID Slip Suppression Control of Electric Vehicle under Braking, International Journal of Computer, Information,

Systems and Control Engineering, Vol.8, No.7, pp.974-979, 2014 (査読有), <http://waset.org/publications/9998783/model-predictive-2dof-pid-slip-suppression-control-of-electric-vehicle-under-braking>.

Shaobo Li and T. Kawabe: Slip Suppression of Electric Vehicles Using Sliding Mode Control Method, International Journal of Intelligent Control and Automation, Vol.4, No.3, pp.327-334, 2013 (査読有), doi:10.4236/ica.2013.43038.

T. Kawabe: Slip Suppression of Electric Vehicles using Model Predictive PID Controller, International Journal of WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY, Issue 67, pp. 524-529, 2012 (査読有), <http://waset.org/publications/13878/slip-suppression-of-electric-vehicle-s-using-model-predictive-pid-controller>.

[学会発表](計9件)

Shaobo Li, K. Nakamura, T. Kawabe : A Sliding Mode Control Based on Model Predictive Algorithm for Slip Ratio of Electric Vehicle, Proceedings of SICE Annual Conference 2014, pp.710-714, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, September 10, 2014.

T. Kawabe : Model Predictive 2DOF PID Control for Slip Suppression of Electric Vehicles, Proc. of 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and

Robotics, Vol. 2, pp.12-19, September 1, Vienna, Austria, 2014.

T. Kawabe : Model Predictive 2DOF PID Slip Suppression Control of Electric Vehicle under Braking, Proc. of 2014 International Conference on Control and Automation, pp.948-953, Oslo, Norway, July 19, 2014.

K. Nakamura, Y. Hagiwara, Shaobo Li, T. Kawabe: Model Predictive 2DOF PID Control for Heat Conduction System Proc. of SICE Annual Conference 2013, pp.1465-1469, Univ. Nagoya, Nagoya, Japan, September 16, 2013.

Shaobo Li and T. Kawabe: Sliding Mode Slip Suppression Control of Electric Vehicles, Proc. of 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2013), Vol.2, pp.11-18, July 29, Reykjavik, Iceland, 2013.

T. Kawabe: Model Predictive PID Traction Control Systems for Electric Vehicles, Proc. of 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp.112-117, Dubrovnik, Croatia, November 3, 2012.

Shaobo Li, K. Nakamura, T. Kawabe, K. Morikawa: A Sliding Mode Control for Slip Ratio of Electric Vehicle, Proc. of SICE Annual Conference 2012, pp. 1974-1979, Akita Univ., Akita, Japan, August 22, 2012.

K. Nakamura, R. Yamashina, Shaobo Li, T. Kawabe: A Configuration of Model Predictive PID Control for Heat Conduction System, Proc. of SICE Annual Conference 2012, pp. 187-191,

Akita Univ., Akita, Japan, August 21, 2012.

T. Kawabe: Slip Suppression of Electric Vehicles using Model Predictive PID Controller, Proceedings of 2012 International Conference on Computer, Electrical, and Systems Sciences and Engineering, pp. 444-449, Stockholm, Sweden, July 12, 2012.

〔図書〕(計1件)

T. Kawabe : Sliding Mode Control with Integral Action for Slip Suppression of Electric Vehicles, in J.-L., Ferrier, O. Gusikhin, K. Madani, J. Sasiadek, eds., Informatics in Control, Automation and Robotics, (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 325; ISBN:978-3-319-10890-2, ISSN:1876-1100), Springer International Publishing, pp.141-158, 2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

河辺 徹 (KAWABE, Tohru)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号：40224844

(2)連携研究者

久野 誉人 (KUNO, Takahito)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号：00205113

(3)研究協力者

森川 耕一 (MORIKAWA, Koichi)  
平田 健太郎 (HIRATA, Kentaro)  
Manfred Morari  
中村 亘 (NAKAMURA, Kou)  
李 少博 (LI, Shaobo)  
萩原 悠二 (HAGIWARA, Yuji)  
井原 正雄 (IHARA, Masao)