

論文・解説

40

高精度スリップ率制御による駆動力制御技術 Driving Force Control Method Based on High Accuracy Slip Ratio Control

高野 毅*¹ 延本 秀寿*² 岡崎 俊実*³
Takeshi Takano Hidetoshi Nobumoto Toshimi Okazaki
藤本 博志*⁴
Hiroshi Fujimoto

要 約

近年、電気自動車 (Battery Electric Vehicle : BEV) やハイブリッド電気自動車 (Hybrid Electric Vehicle : HEV) などの電気駆動モータは、効率の高さから地球環境問題や化石燃料枯渇問題のために使われてきたが、その素早く正確なトルクのコントロール性能を活かした精密な車両運動制御のアクチュエータとしても使われている。この特性を活かした制御技術として、スリップ率に基づいた駆動力制御がある。この技術によって安全性、快適性、航続距離が改善できることが知られている。しかしながら、この技術を1ディファレンシャルギア、1モータ構成の車両に適用しようとするすると駆動系共振の問題があり、共振を回避するために制御の安定性を確保するには、ドライバが違和感を覚えるほど制御の応答性を落とす必要があった。そこで、あらかじめドライビングステイフネスを算出し、そこから目標スリップ率を算出することで2重フィードバックループを1重にするという手法を開発した。この手法により、スリップ率に基づいた駆動力制御の応答性を改善することができ、目標とするトルクや加速度に高速でかつ精密に制御できる。この制御をBEVに実装し、低摩擦路面で試験し、その性能を実証した。

Summary

A traction motor on Electric Vehicle (EV) can be utilized for not only a green power source, but also an accurate controller of vehicle motion. As a method of utilizing these characteristic, traction control method of EV based on a precise control of slip ratio between driving tire and road surface has been proposed. By this method, improvement of safety, comfort and mileage per charge was reported. But, this method was for an application to In Wheel Motor (IWM) vehicle. In case of application to conventional EV, improvement of resonant vibration and control response were the major problem due to its complex drive-line. In this paper, we propose the new method which calculates a target slip ratio by using estimated driving stiffness without driving force feedback loop. Therefore this method has higher response than the conventional method. We also applied this method to EV and tested its performance on snowy, icy surface in the proving ground. The effectiveness of this method is verified by experiments.

1. はじめに

地球温暖化や化石燃料枯渇問題の対策手段としてBEVやHEVが注目され出して久しい。当初は環境性能に主眼を置いて開発が行われてきたが、近年では電気駆動モータの優れた応答性や正確な力行・回生トルク制御を使った快適化技術、車両運動制御技術が次々と提案されている^{(1) (2)}。我々は電気駆動モータの優れた特徴を車両運動制御へ応用

する研究として、スリップ率ベースの駆動力制御に着目し研究を行っている。この制御には航続距離延長、アンチスリップによる安全性、頻繁に路面摩擦係数の変わる環境下の快適な走行性といった多くの利点が期待できる。電気自動車のスリップ率制御に基づく駆動力制御方法として、従来は制御性に優れるインホイールモータ (IWM) による駆動力制御法が提案されてきたが⁽³⁾、この制御をディファレンシャルギアと1モータを持つ電気自動車に適用し、安定

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

*4 東京大学 大学院新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻
Department of Advance Energy, Graduate School
of Frontier Sciences, The University of Tokyo

した制御ができるゲイン設定をすると、路面摩擦係数の変化に対するトルク変化の応答性が悪いなどの問題が発生する。そこでディファレンシャルギアと1モータを持つ電気自動車のスリップ率に基づく駆動力制御を高速化し、応答性の高いスリップ率制御を開発した。

2. タイヤのスリップ率と駆動力

車両の運動を変える際、たとえば加減速や旋回などを行うためにタイヤに力を加えるとタイヤが変形を始める。タイヤと路面間の力の伝達は摩擦力で行われるため、ある程度以上の力を加え、摩擦力が最大静止摩擦力を超えると静摩擦の状態から動摩擦の状態へと移行する。動摩擦の状態は静摩擦の状態に比べ摩擦力が小さいため、力を加えても車両の運動が変えにくい。これにより効率が悪い・ブレーキが効かない・車体が安定せず不快である等のデメリットが多い。この状態を極力避ける手段としてスリップ率制御が開発された。

摩擦力は静摩擦状態、動摩擦状態と表現することもできるが、前述のとおり、タイヤをはじめ物体は力を加えると変形するため、静摩擦といわれる状態でも微小なスリップを起こしている。このため、以降では静摩擦状態のことを微小すべり状態、動摩擦状態を巨視的すべり状態と表現する。制動力・駆動力の場合はスリップ率と摩擦係数の関係からこの二つの領域を分けることができる。Fig. 1はスリップ率と摩擦係数の関係を表している。これを見ると微小すべり領域ではスリップ率と摩擦係数の関係は線形的に変化しているが、最大摩擦係数を越えた点からはスリップ率を増加させても摩擦係数は増加しないことが分かる。

本制御ではこのスリップ率と摩擦係数の関係を用いて制御則を構築する。

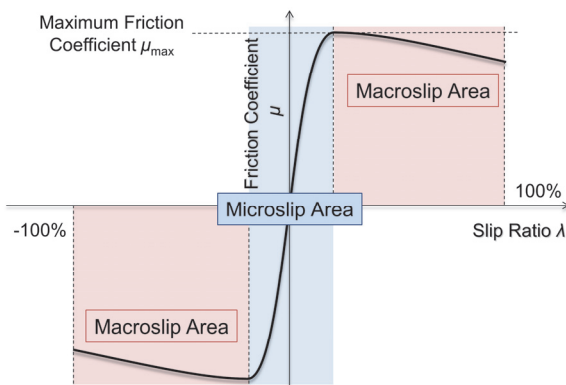


Fig. 1 Typical Relationship between Slip Ratio and μ

3. 車両モデル

本研究では制御車両としてマツダデミオEV (Fig. 2) を使う。この車両の構成をFig. 3で示す。前輪駆動でモータからディファレンシャルギアを介してドライブシャフト、前輪へ続く駆動系になっている。



Fig. 2 Appearance of Test Vehicle

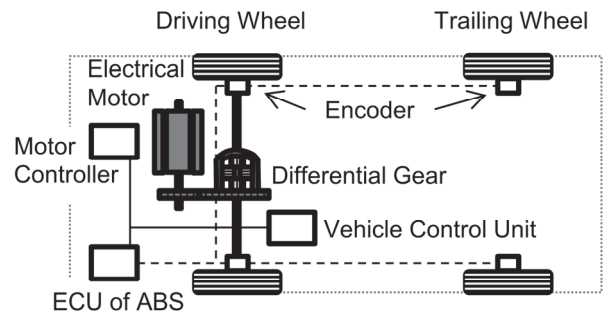


Fig. 3 Physical Architecture of Test Vehicle

制御ロジックを構築するにあたり制御対象をモデル化した。車輪を中心とした車両モデルを考える。Fig. 4のような一輪モデルを考え走行抵抗を無視した時、次式が成り立つ。

$$J\dot{\omega} = T_d - rF_d \tag{1}$$

$$M\dot{V} = F_d \tag{2}$$

$$F_d = \mu N \tag{3}$$

$$V_t = r\omega \tag{4}$$

$$y = \frac{V_t - V}{\max(V, \epsilon)} \tag{5}$$

ここで、 J は車輪周りの慣性モーメント、 ω はタイヤの角速度、 T は車輪軸周りのトルク、 r はタイヤ半径、 F_d は一輪あたりの駆動量、 M は車両質量、 V は車体速度、 μ は摩擦係数、 N はタイヤ荷重、 y は分母を車体速に固定した疑似スリップ率⁽³⁾ (以下単にスリップ率という)、 ϵ はゼロ割防止の微小定数である。実際には駆動輪は左右にあるため二輪で考え、

$$F_d = F_{dL} + F_{dR} \tag{6}$$

とする。添え字のL, Rは左右を表す。

さて、直進かつ左右からの駆動力反力が等しければ一輪車両モデルとしても不都合がないが、左右で路面摩擦係数が異なり、左右の反力が異なる路面を走行した時、Fig. 5のようなディファレンシャルギア周りの運動方程式を考慮する必要がある。

この時、式(1)は

$$gT_{mot} - J_{mot}\dot{\omega}_{ig} = rF_{dL} + J_L\dot{\omega}_L + rF_{dR} + J_R\dot{\omega}_R + J_p\dot{\omega}_p \quad (7)$$

$$J_p\dot{\omega}_p = rF_{dL} - rF_{dR} \quad (8)$$

となる。ただし J_{mot} はモータからファイナルギアまでの慣性モーメント、 J_p はピニオンギア周りの慣性モーメント、 g はトランスアクスルの減速比、 T_{mot} はモータトルクである。本実験車はLSD (Limited Slip Differential gear) のような差回転を制限する機構を持たないため、直進時にはピニオンギアの回転をゼロ、すなわち

$$F_{dL} = F_{dR} \quad (9)$$

となるように制御する。これは左右輪反力の小さい方に合わせて制御することを意味しており、左右の路面摩擦係数が異なるときは摩擦係数の低い方に合わせて制御を行う。

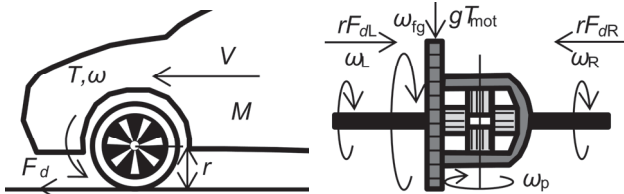


Fig. 4 One Wheel Model Fig. 5 Differential Gear

4. 制御の考え方

4.1 ドライビングステイフネスを使った駆動力制御法

制御対象を前述のようなモデルとし、式(3)とFig. 1の関係をjいて制御法を考える。スリップ率を使った駆動力制御法はたとえば文献(4)のような2重ループを使った駆動力制御法が提案されてきた (Fig. 6)。しかしながらこのような目標の駆動力を得るまでに微細に駆動力を制御する制御方法では今回の実験車のような1ディファレンシャルギア、1モータを持つ車両に適用すると駆動系共振の抑制と駆動力制御応答性がトレードオフになり十分な性能を得ることができなかった。そこで、以下のような方法を考案した。

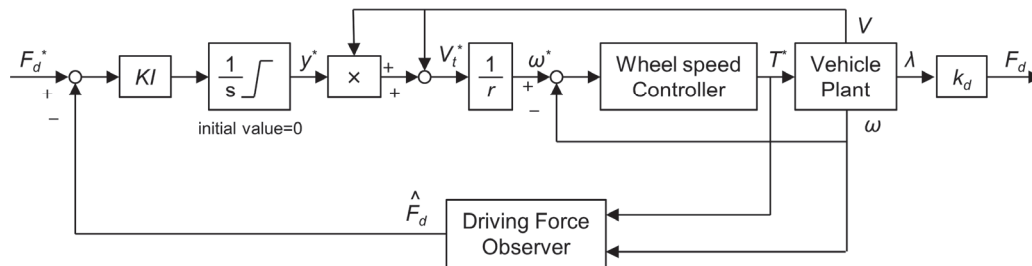


Fig. 6 Double Loop Method (Fujimoto, 2011)⁽⁷⁾

Fig. 7はスリップ率と駆動力の関係を模式的に示したものである。 F_{dol} は現在発生している駆動力、 F_{d*} は目標駆動力、 y_{j0} は現在のスリップ率、 y_{j*} は目標スリップ率であり、添え字の j には高摩擦路面を表す H と低摩擦路面を表す L が入る。2重ループを持つフィードバック制御で駆動力制御を行う時、スリップ率と駆動力が線形関係にあると見做せる領域で応答性を保つためにはドライビングステイフネス k_d に合わせてフィードバックゲイン K を決める必要がある。

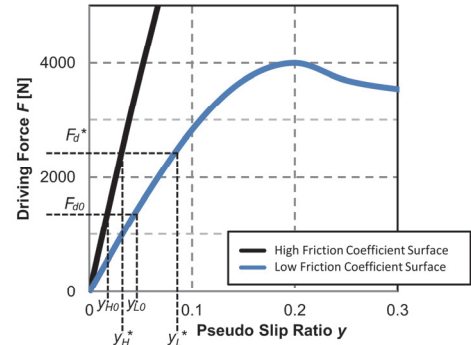


Fig. 7 Typical Relationship between F and y

そこで本稿では、ドライビングステイフネスを y_{j0} と F_{d0} の関係から求め、その逆数と要求駆動力から目標スリップ率を算出する方法を提案する。そして、そのスリップ率と車両からフィードバックされたスリップ率の差分を求め、ドライビングステイフネスからモータトルク指令値を算出するというものである。ドライビングステイフネスの同定方法はさまざまな提案があるが、ここではスリップ率と駆動力の関係が原点を通ると仮定し、単純に比を使い、時間で移動平均することで同定している。

4.2 ドライビングステイフネスを使ったフィードバック制御の構築

文献(4)など従来の提案では、スリップ率から目標駆動車輪速を算出し、実駆動車輪速との差分から指令トルクを算出していた。著者らは目標駆動力が一定の時、目標値が変わりにくい車輪加速度のフィードバックの方がより安定して制御できると考えた。車輪加速度の導入にあたり、

次のように考える。駆動力とスリップ率が線形関係にある領域を使うことを前提に、式(5)を変形すると以下のようになる。

$$y = k_d^{-1} F_d = k_d^{-1} M \dot{V} \quad (10)$$

$$V_t = (1 + y)V = (1 + k_d^{-1} M \dot{V})V \quad (11)$$

$$\dot{V}_t = k_d^{-1} M \ddot{V}V + (1 + k_d^{-1} M \dot{V})\dot{V} \quad (12)$$

ここで一定で加速している時は車体加加速度をゼロとみなす。式(12)の右辺第一項を無視し、加速度をAと置き、

$$A_t^* = (1 + k_d^{-1} MA)A \quad (13)$$

として、目標車輪加速度を求める。

次に車輪加速度のフィードバックゲインの与え方を考える。まず式(13)に式(10)を代入すると

$$A_t^* = (1 + y)A \quad (14)$$

となる。現在発生している車輪加速度をA_{t0}としたとき、次式のように目標車輪加速度との差分から変形でき、スリップ率を暗示的に持たせながら駆動トルク増分を車輪加速度の差分を使って表すことができる。

$$\begin{aligned} A_t^* - A_{t0} &= (y^* - y_0)A \\ &= \frac{F_d^* - F_{d0}}{k_d} A \\ &= \frac{T_d^* - T_{d0}}{rk_d} A \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Delta T_d = \frac{rk_d}{A} (A_t^* - A_{t0}) \quad (16)$$

一方、非線形領域は次のように考える。一定加速状態で目標スリップ率を超えたとき、目標スリップ率に応じた実駆動力と目標駆動力の乖離に応じて慣性力が上昇したと考えることができる。この時の剰余トルクは次のように表現できる。

$$\Delta T_d = r(k_d y_L^* - F(y_L^*)) \quad (17)$$

関数F(x)はスリップ率xを入力した時に真の駆動力Fを返す関数である。この剰余トルクは駆動系の慣性力に変

換されているとすると、式(1)の関係からこのΔT_dを求めることができる。まず、角加速度は

$$\dot{\omega} = \frac{A_t}{r} \quad (18)$$

と求めることができるので、

$$\begin{aligned} \Delta T_d &= J(\dot{\omega}^* - \dot{\omega}_{L1}) \\ &= \frac{J}{r}(A_t^* - A_{t1}) \end{aligned} \quad (19)$$

と書ける。添え字1は非線形領域上にいる状態を表す。

以上をまとめると、以下の式のようにモータへの指令トルクを決めることができる。

$$k_d[k] = \frac{g}{r(n+1)} \sum_{l=0}^n \frac{T_{\text{real}}[k-l]}{y[k-l]} \quad (20)$$

$$y^* = \frac{gT_{\text{mot}}^*}{rk_d} = \frac{MA^*}{k_d} \quad (21)$$

$$A_t^* = (1 + y^*)A \quad (22)$$

$$T_{\text{req}} = \begin{cases} \frac{rk_d}{\max(A, \epsilon)}(A_t^* - A_t) + T_{\text{real}} & \text{if } T \propto y \\ \frac{J}{r}(A_t^* - A_t) + T_{\text{real}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

ここで、T_{real}はモータ電流から算出されるモータが実際に発生しているトルク、T_{req}はインバータに要求するモータトルクである。式(20)は移動平均を示しており、T_{real}やyの添え字kは離散時間上のステップを表している。nは任意の自然数で、k_dが十分収束するように設定する。

式(20)から式(23)にフィードフォワード項を加えたものをブロック線図で表したものがFig. 8となる。この時、A_Pはアクセルペダルポジションを表し、ΔT_{FF}はフィードフォワードから算出されるトルク増分、ΔT_{FB}はフィードバックから算出されるトルク増分、sのブロックは微分演算を表している。

4.3 フィードフォワード制御

EVが内燃機関車に対して優位な点としてアクセルペダルの踏み込に対する加速の反応の良さがしばしば取り上げ

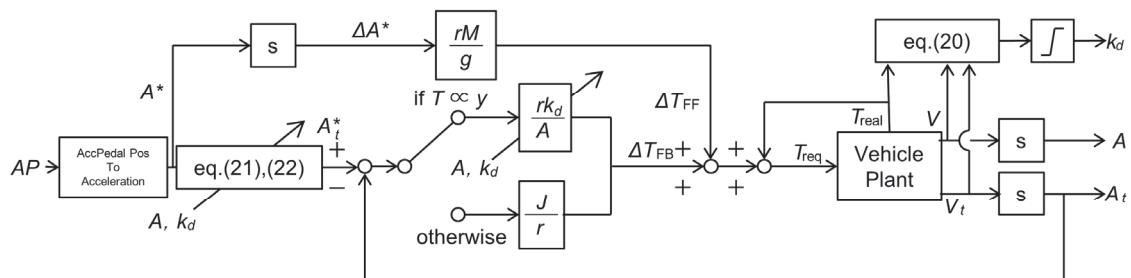


Fig. 8 Block Diagram of Driving Force Controller

られる。前述のフィードバック制御は路面摩擦係数変化による駆動力変化の応答性は確保できたが、アクセルペダル踏み込みに対する応答性が、ベース車両であるデミオEVに対し劣っていた。

そこでフィードフォワード制御を導入し、この問題を解決した。アスファルト路面での全開加速のレスポンスを市販車同等になるようにゲインのチューニングを施した。こうすることによりEVの持ち味を損なわず、本制御の利点を付加することができる。

5. 車両への実装と走行実験

開発した制御を実装する実験車両（デミオEV）は、指令トルクに基づいたベクトル制御で永久磁石同期モータの発生トルクをインバータが制御している⁶⁾。駆動モータの電流量から発生トルクを推定し、それぞれの駆動輪のエンコーダから車輪速を検出することができる。加速度センサは搭載されていないため、加速度は車輪速センサから求める。インバータに送信するトルク指令値を生成するロジックに、提案するFig. 8の制御ロジックを置き換えることで機能を実装した。実験車両を用いて、特にその効果を発揮しやすい低摩擦路面で制御効果を検証した。この時、式(23)の分母の車体加速度は簡単化のために本実験に関しては 1m/s^2 で固定としている。実験では、従来のトラクションコントロールシステム（TCS）の制御と、今回提案する駆動力制御を実装し、同じ条件でテストした。そして提案した制御ロジックが従来のTCSに対しどの程度アドバンテージがあるのかを確認した。

低摩擦路面性能の確認は北海道の寒冷地試験場で行った（Fig. 9）。試験時の外気温は -7C であり、融解による路面の水膜はない状態である。

Fig. 10は圧雪路での走行結果である。従来のTCSは最初に起きたスリップを検知して、スケジュールされたトルクまでトルクダウンしてスリップを止める。この時の車体の加速度を表しているのがFig. 10の下段であるが、これを見るとトルクダウンに伴い大きな加速度の落ち込みが発生していることが分かる。これに対してスリップ率制御は目標のスリップ率に収束するようにトルクを制御するので、大きなトルクダウンは発生しなかった。

Fig. 11はアイスパーンでの走行結果である。TCSとスリップ率制御は一見同じトルクで制御されているが、TCSは大きなスリップ率に高止まりしているのに対してスリップ率制御は速やかに目標スリップ率に収束するという現象を確認できた。スリップ率制御は応答性が改善されており、速やかに目標までトルクダウンするために、確実に線形領域までスリップ率が落ちる。線形領域ではタイヤの横力が残るので、旋回中に安定した走行ができるということも確認できた。

また、加速以外の走行シーンとして登坂の試験も行った。

Fig. 12は勾配が12%~25%変化する圧雪の勾配路を登った時の結果である。勾配路を登っていくと、フロントタイヤにかかる荷重がだんだん抜けていき、同じ駆動力でもスリップ率が増えてやがて巨視的なスリップが発生する。この時、従来のTCSはスリップを検知し、大きくトルクダウンしてグリップを回復させようとするが、一方で坂道なのでトルクが落ちすぎると坂道で止まってしまうという現象が起こる。提案したスリップ率制御の方も勾配の増加とともに巨視的なスリップ領域に突入しようとするが、応答性が改善されているため、目標スリップ率を超えると速やかにかつ精細にトルクダウンが発生できるため、結果として大きくトルクダウンすることなく、止まらずに最後まで登りきることを確認した。



Fig. 9 Scene of Cold Region Test

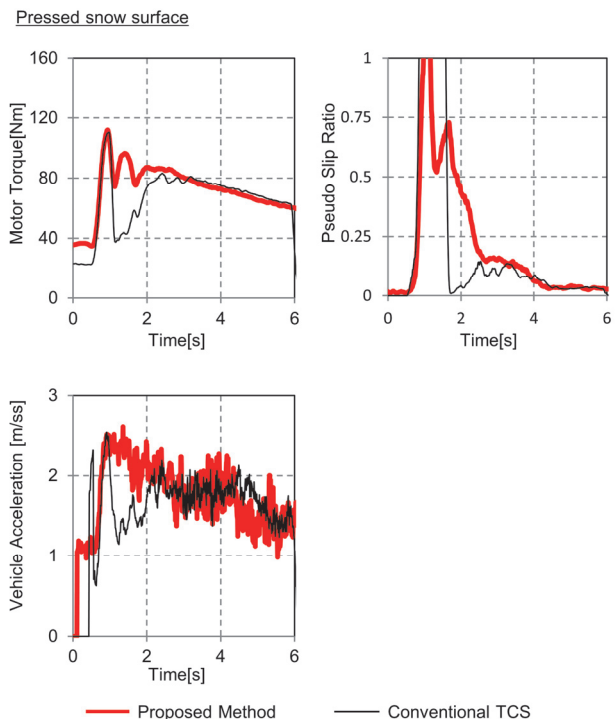


Fig. 10 Result of Pressed Snow Road Test

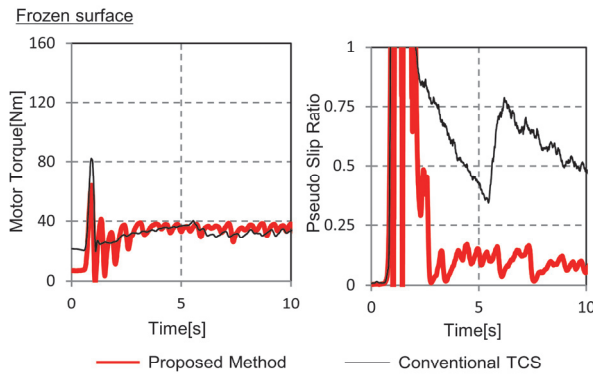


Fig. 11 Result of Frozen Road Test

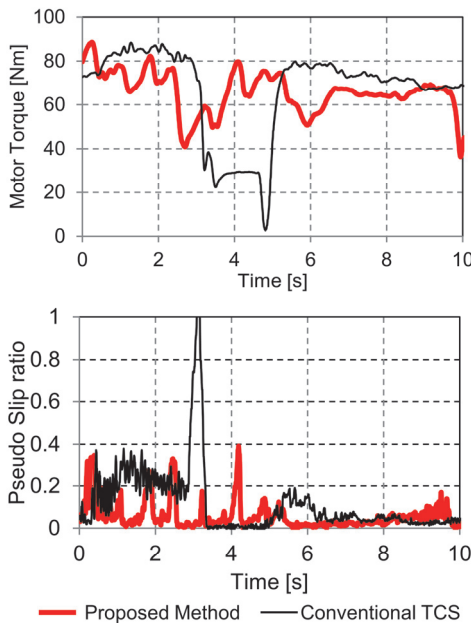


Fig. 12 Result of Snowy Steep Slope Test

6. 結論

本研究では、1ディファレンシャルギア、1モータを持つ電気自動車の構成でスリップ率に基づく駆動力制御の実装において、駆動系共振を回避しながら制御速度を上げるために、ドライビングステイフネスを使ったシングルループの制御法を開発した。

そして、本制御を実装した車両を寒冷地試験場に持ち込み、試験を行うことで以下の知見を得た。

- ・圧雪路で強い加速を行い、タイヤがスリップするような条件では、スリップ率制御を行うことで高い加速度を維持しながら加速することができる。

- ・アイスバーンのようなすぐに滑るような路面でスリップ率制御を行うと、微小すべり領域までスリップ率を落とすことができるので、車体の安定感が増す。

- ・滑りやすい登坂路のような駆動力が落ちてほしくない

場面のトラクションをコントロールする手段としてもスリップ率制御は有効であった。

以上から、スリップ率をコントロールし、さまざまな路面で利点の多い駆動力制御を開発することができた。

参考文献

- (1) 菊込ほか：新開発EV 向けの高応答加速度制御，自動車技術会学術講演会前刷集No.55-11, pp.5-8 (2011)
- (2) 藤本ほか：安全性/快適性/航続距離向上のための前後輪独立駆動電気 自動車の制御，自動車技術会学術講演会前刷集, No.10-12, pp.5-8 (2012)
- (3) 藤本ほか：電気自動車におけるスリップ率制御に基づく駆動力制御法，自動車技術会学術講演会前刷集, No.3-11, pp.11-14 (2011)
- (4) 藤本ほか：可変駆動ユニットシステムを有する電気自動車の開発と制御，2013 年自動車技術会春季学術講演会前刷集, No8-13, pp. 17-20 (2013)
- (5) 佐藤ほか：デミオEV の電子式巻線切り替えモータドライブの開発，マツダ技報, No.30, pp.120-124 (2012)
- (6) 前田ほか：左右独立可能な電気自動車の運動制御，2013 年自動車技術会春季学術講演会前刷集, No30-13, pp.11-14 (2013)
- (7) 吉村ほか：インホイールモータを搭載した電気自動車の駆動トルク制御法，電気学会論文誌D, Vol. 131-D, No.5, pp.721-728 (2011)

■ 著 者 ■



高野 毅



延本 秀寿



岡崎 俊実



藤本 博志