

藤本 博志¹⁾ 江上 奨²⁾ 前田 健太³⁾ 齋藤 潤⁴⁾ 半田 和功⁵⁾

Motion Control of Front and Rear Independent Drive Electric Vehicle for Improvement of Safety, Comfortability, and Cruise Range

Hiroshi Fujimoto Sho Egami Kenta Maeda Jun Saito Kazunori Handa

Electric vehicles (EVs) have attractive potential not only for becoming energy efficient and eco-friendly vehicles but also for vehicle motion control because electric motors have a quick response and motor torque can be accurately measured. The authors' research group has proposed motion control of front and rear independent drive electric vehicle for improvement of safety, comfortability, and mileage per charge. In this paper, the authors' recent study on front and rear motor torque distribution method to improve mileage per charge is briefly presented. We also present driving force distribution method to retain the total driving force on instantaneous slippery roads.

KEY WORDS: (Standardized) vehicle dynamics, (Free) cruise range, traction control, driver comfortability(B1)

1. はじめに

地球温暖化問題や化石燃料枯渇問題への対策として、電気自動車 (Electric Vehicle : EV) が国内外で大きく注目されている。環境面以外にも、モータを駆動力に利用する EV は既存の内燃機関自動車と比べ、以下の点で優勢を持つ⁽¹⁾

- トルク応答が内燃機関より 2 桁速い
- モータが小型であるため各輪に分散配置可能
- 電流値によりトルクを正確に把握できる
- 力行および回生制動が可能

これらの特徴を活かして、EV の運動制御に関する研究成果が多数報告されている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。著者らの研究グループでも、安全性⁽⁵⁾、快適性⁽⁶⁾、航続距離延長⁽⁷⁾のための制御法を開発し、1 人乗り小型電気自動車により検証した。本稿では、これらを前後輪独立駆動可能な SUV 型電気自動車に適用した 2 つの研究成果について報告する。

1 つ目は、走行条件に応じた総合的な効率特性を最適化する航続距離延長制御法⁽⁸⁾である。本制御法では、前後輪で効率特性が異なるモータを搭載した電気自動車に対し、総入力電力から総駆動力までの総合的な効率が最大となる前後輪駆動力配分比を決定する。総合的な効率の測定値により最大点を探索するため、車両、モータ、インバータなどのパラメータ変動の影響を受けない。これにより、車両の総合的な効率を最大化でき、航続距離を延長することが可能である。

2 つ目は、瞬間低 μ 路での総駆動力維持を目的とした前後輪駆動力配分法⁽⁹⁾である。この駆動力配分法は、所々に残る雪、雨に濡れたマンホールや橋のつなぎ目など、瞬間的に低 μ 状態になるような路面において総駆動力を維持することを目的としている。前後輪どちらかが低 μ 路に乗って駆動力が減少した際、粘着している車輪に駆動力低下量を補うことで、総駆動力の減少を抑圧する。その結果、瞬間的な低 μ 路上において車両



Fig. 1 Test vehicle (SUV-PHEV)

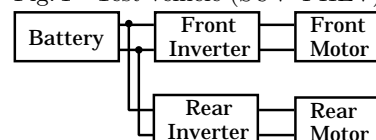


Fig. 2 System structure of test vehicle

加速度の減少が抑圧されることで乗り心地が向上し、安全性のみならず快適性を向上させることが可能である。

本稿では以上 2 つの研究成果について、走行試験の結果を示して紹介する。

2. 実験車両と車両モデル

2.1. 実験車両

本稿では、実験車両として三菱自動車工業が開発した SUV 型プラグインハイブリッド電気自動車を使用した。この車両は前後輪にモータとデファレンシャルギアが搭載されており、前後輪独立駆動可能である。また、加速度センサにより車両前後方向の加速度が取得可能である。車両外観および車両システムの構成を Fig. 1, Fig. 2 に示す。Fig. 2 において、バッテリー出力電圧および前後輪インバータ入出力電流をそれぞれ測定することができる。

2.2. 車両モデル

本節では想定した車両モデルについて述べる。車輪軸周りの運動方程式は Fig. 3 より式 (1) で表される。また、走行抵抗が十分小さいとすると、車両の運動方程式は Fig. 4 より式 (2) ,

*2012 年 5 月 23 日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・2)・3) 東京大学 (227-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

4)・5) 三菱自動車工業 (444-8501 愛知県岡崎市橋目町字中新切 1)

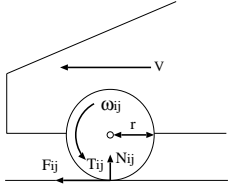


Fig. 3 Wheel model

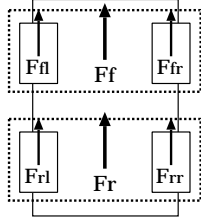


Fig. 4 Vehicle model

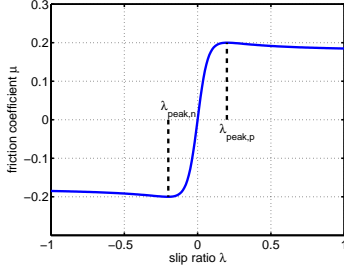


Fig. 5 Typical relationship between μ and λ

式 (3) で表される .

$$J_{w_i} \dot{\omega}_{ij} = T_{ij} - r F_{ij} \quad (1)$$

$$M \dot{V} = F_{all} \quad (2)$$

$$F_{all} = F_{fl} + F_{fr} + F_{rl} + F_{rr} \quad (3)$$

$$V_{w_{ij}} = r \omega_{ij} \quad (4)$$

各変数は ω_{ij} : 車輪角速度, V : 車体速度, $V_{w_{ij}}$: 車輪速度, T_{ij} : 車輪軸周りのトルク, F_{ij} : 一輪当たりの駆動力, M : 車両質量, r : タイヤ半径, $J_{w_{ij}}$: 車輪回転部慣性モーメント, F_{all} : 総駆動力とする . ここで各変数の添え字 i, j には, それぞれ前後を表す文字 f, r および左右を表す文字 l, r が代入される .

スリップ率 λ_{ij} は車体速と車輪速の関係を表し, 式 (5) で定義される .

$$\lambda_{ij} = \frac{V_{w_{ij}} - V}{\max(V_{w_{ij}}, V, \epsilon)} \quad (5)$$

ここで, ϵ は零割防止のための微小定数である . また, 式 (5) で表わされるスリップ率は車輪が駆動時と制動時において定義が異なる . 駆動時において, $V_{w_{ij}} > V$ であり, 制動時において $V > V_{w_{ij}}$ である .

タイヤが発生させる駆動力 F_{ij} は, タイヤと路面間の摩擦係数 μ_{ij} と一輪辺りの垂直抗力 N_{ij} の積で表される .

$$F_{ij} = \mu_{ij} N_{ij} \quad (6)$$

摩擦係数 μ はスリップ率 λ に依存する . 路面状況によって変化するが, Fig. 5 で示すような関係があることが知られている . μ が最大, 最小となるスリップ率 $\lambda_{peak,p}$, $\lambda_{peak,n}$ がそれぞれ存在し, $\lambda_{peak,n} \leq \lambda \leq \lambda_{peak,p}$ の領域では μ は λ の単調増加関数となり, それ以外の領域では $|\lambda|$ に対して単調減少する .

3. 効率特性を最適化する前後輪駆動力配分

本章では, 著者らの研究グループで提案している航続距離延長制御法の一つである, 効率特性を最適化する前後輪駆動力配分に関する研究成果を述べる (8) .

3.1. 前後輪駆動力配分モデル

本稿で想定している車両において 4 輪における総駆動力指令 F_{ref} は式 (3) で表わされる . 総駆動力 F_{all} の指令値 F_{ref} に

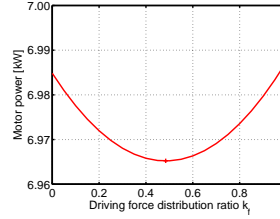


Fig. 6 Output ($a_x = 0$)

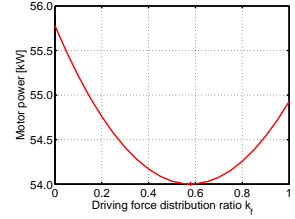


Fig. 7 Output ($a_x = 2.0$)

対する前後輪部の駆動力 F_f ($:= F_{fl} + F_{fr}$), F_r ($:= F_{rl} + F_{rr}$) を決定するため, 駆動力配分比 k_f を導入する . 総駆動力 F_{ref} と前後輪部の駆動力 F_f, F_r の関係は次式となる .

$$F_f = (1 - k_f) F_{ref}, \quad F_r = k_f F_{ref} \quad (7)$$

3.2. モータ出力を最適化する駆動力配分比

まず本節では, Fig. 2 において, 与えられた車両出力 $F_{ref} V$ の条件下で, 総モータ機械出力を最小化する手法について述べる . スリップ率を考慮して, 前後輪の合計機械出力を算出すると次式となる .

$$P_{out} = \omega_f T_f + \omega_r T_r \approx F_{ref} V \cdot \left(\frac{1 - k_f}{1 - \lambda_f} + \frac{k_f}{1 - \lambda_r} \right) \quad (8)$$

式 (6), (7) から λ_f, λ_r を決定すると, 並進加速度 a_x に応じて式 (8) は Fig. 6, Fig. 7 のように図示できる . 総機械出力を最小化する駆動力配分比 $k_{f,opt,ff}$ は次式のように求まる (8) .

$$k_{f,opt,ff}(a_x) = \frac{l_f}{l_f + l_r} + \frac{2h_g}{(l_f + l_r)g} a_x \quad (9)$$

但し, l_f, l_r : 車両重心点から前後輪駆動点までの距離, h_g : 重心高である .

3.3. 最適効率探索制御

本節では, Fig. 2 においてバッテリー出力電力から車両出力までの総合的な効率を最適化する手法について述べる . 本稿で使用した実験車両は前後輪に異なるモータを搭載しており, 各動作点における効率が異なるため, モータ効率を最大化する駆動力配分比が存在する . しかしながら, 効率はモータの温度などによっても変化し, あらかじめ作成した効率マップによる駆動力配分法では限界がある . したがって, 本稿では黄金分割法 (10) に基づく最大効率点探索法を提案する .

探索法の概要を Fig. 8 に, 提案するシステムのブロック図を Fig. 9 に示す . 測定された効率 $\eta_i := F_i V / P_i$ (P_i はインバータ入力電力) を用いて k_f を探索ステップ T_{step} 毎に変化させ, より高効率となる領域に探索範囲を縮小することで, 総合効率 $\eta_{all} := F_{ref} V / (P_f + P_r)$ が最大となる点を, 走行中に探索する . この方法の利点は, 前ステップの測定値を有効利用できること, 及び評価関数 (この場合総合効率) の導関数やモデルパラメータが不要であることである . この際, 前節で述べた $k_{f,opt,ff}$ を用いて初期探索範囲を限定することにより, 探索の収束時間を短縮させている (8) .

3.4. 実験

本節では提案手法の有効性を実験結果により示す . 車両の走行条件として, 一般的なアスファルト路面にて定速 50km/h で走行するものとした . 実験においては, ドライバーモデルに相当する車体速制御系を, Fig. 9 に示すシステムのアウタールー

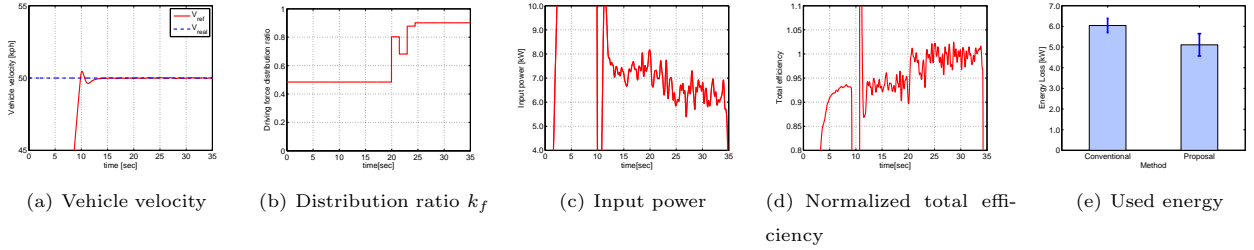


Fig. 10 Experimental results : range extension control

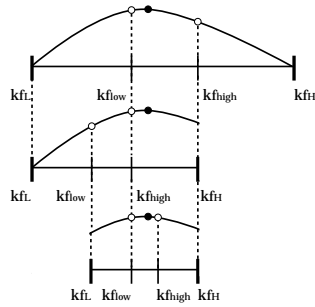


Fig. 8 Concept of search system

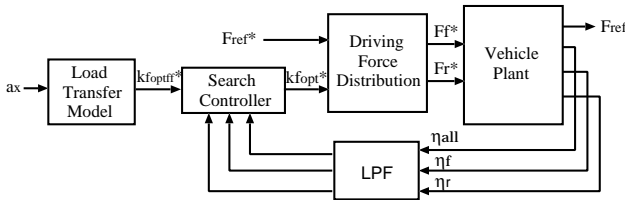


Fig. 9 Block diagram of search system

Table 1 Cruise range per kWh

Battery Capacity	Without RECS	With RECS
1kWh	8.27 km	9.79 km
16kWh	132.38 km	156.61 km

プに実装した。

Fig. 10 に提案法の実験結果を示す。Fig. 10(a) に示すように、約 13s に定常速度となり、約 20s から探索制御を開始している。 $T_{step} = 1.5$ 毎に探索すると、Fig. 10(b) に示すように、約 25s で駆動力配分比 $k_f \simeq 0.9$ に収束している。このとき、Fig. 10(c) および Fig. 10(d) より、探索開始前と比べて探索終了後は、入力電力 $P_f + P_r$ が減少し、総合効率が向上している。

Fig. 10(e) では、均等駆動力配分 ($k_f = 0.5$) とする従来法と、提案法をそれぞれ 12 回分の走行の平均エネルギー消費量により比較している。従来法と提案法のエネルギー消費の差は約 1.0kW となっている。Table 1 に kWh 当たりの走行距離を示す。Fig. 10(e) をもとに、単位時間当たりの走行距離を単位時間当たりのエネルギー消費で除することにより求めている。この結果、提案法は従来法と比較して 1 kWh 当たりで約 1.52 km, 18 % の走行距離が延長している。これを、三菱自動車の電気自動車 i-MiEV のバッテリー容量 16 kWh を仮に想定すると約 24.2 km 航続距離が延長している。

4. 瞬間低 μ 路における前後輪駆動力配分

本章では、瞬間低 μ 路での総駆動力維持を目的とした前後輪

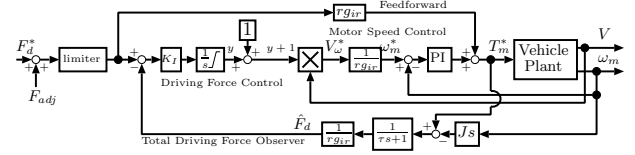


Fig. 11 Block diagram of driving force control

駆動力配分に関する研究成果を述べる⁽⁹⁾。なお、本章では駆動力を表す文字として F_d をあてているが、これは前章における F と同じである。

4.1. 駆動力制御法

駆動力制御法⁽⁵⁾は、著者らの研究グループが提案した新たなトラクション制御である。ブロック図を Fig. 11 に示す。ここで g_{ir} はモータとドライブシャフトのギヤ比、 τ は駆動力オブザーバ時定数である。アウターループが駆動力オブザーバに基づく駆動力ループとなっており、インナーループにスリップ率制御を行うモータ角速度制御系が存在する。スリップ率指令値に相当する操作量 y に上限値 y_{max} および下限値 y_{min} を設けることで、Fig. 5 においてスリップ率と摩擦係数が単調増加する領域にスリップ率を制限することができる。これにより、高 μ 路ではアクセルにより生成した駆動力指令値 F_d^* に追従し、低 μ 路などの駆動力が飽和する領域ではインナーループのスリップ率制御により空転が抑えられ、その路面で発生可能な最大駆動力を得られる。

4.2. 前後輪駆動力配分法

Fig. 11 に示す駆動力制御法のブロック図において、 F_{adj} が駆動力配分量を示す。ここで前輪への駆動力配分量を F_{adjf} 、後輪への駆動力配分量を F_{adjr} と定義する。 F_{adjf} 、 F_{adjr} はそれぞれ後輪、前輪の駆動力指令値に対する駆動力推定値との差であり、(10)、(11) 式のように表せる。

$$F_{adjf} = \zeta_f(y_f, y_r) \cdot [F_{dr}^* - \hat{F}_{dr}] \quad (10)$$

$$F_{adjr} = \zeta_r(y_f, y_r) \cdot [F_{df}^* - \hat{F}_{df}] \quad (11)$$

ここで F_{df}^* 、 F_{dr}^* はそれぞれ配分を行う前の前後輪の駆動力指令値である。また、 $\zeta_f(y_f, y_r)$ 、 $\zeta_r(y_f, y_r)$ はそれぞれ前後輪への駆動力配分量を決める 0 以上 1 以下のゲインである⁽⁹⁾。前後輪のスリップ率指令値 y_f 、 y_r のうち、片方が上限 y_{max} に達した場合にのみ、もう片方の ζ を 0 から 1 に変化させて駆動力配分を行う。

4.3. 予見制御

本稿で使用した実験車両は、ドライブシャフトやモータマウントの共振周波数が低く、後輪の車輪速制御帯域が特に上がらないため、駆動力制御法の適用が困難であった。したがって、

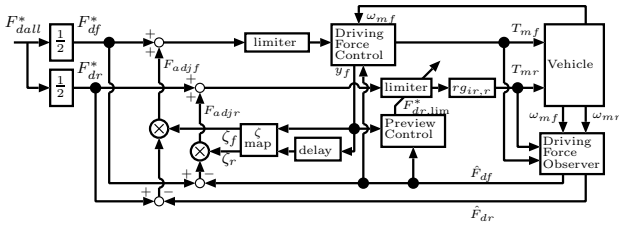


Fig. 12 Block diagram of driving force distribution method

前輪の駆動力制御のスリップ率指令値に相当する操作量 y から前輪が低 μ 路に乗ったことを検知し、その時の前輪駆動力から後輪が出せる最大駆動力を推定して予見的に駆動力指令値を引き下げる予見制御を適用する。Fig. 12 に、前輪の駆動力制御法および後輪の予見制御を含む、駆動力配分法全体のブロック図を示す。ここで F_{dall}^* はアクセルにより生成される総駆動力指令値を表す。

4.4. 実験

提案する前後輪駆動力配分法の有効性を実験結果により示す。低 μ 路として使用した高分子シートは、水をかけることで $\mu = 0.2$ 程度の低 μ 路を実現する。本実験では、実験車両のホイールベースより短い長さ 1.8 m のシートを、発進点から 2 m 前方に、左右輪が同時にシート上を通過するように設置した。そして総駆動力指令値 $F_{dall}^* = 5000$ N を与えて加速した。急峻で強いモータトルクはドライブシャフト、モータマウントの振動を誘発し、駆動力推定値に過大な振動が生じてしまう。この振動抑圧については今後の課題とし、本稿では駆動力推定値および加速度について、帯域 5 Hz 程度の位相遅れのないフィルタをオフラインで適用したものを図示している。

実験結果を Fig. 13~ 15 に示す。ここでは一定トルクを加える制御無しの場合と、予見制御および前後輪駆動力配分法を行った提案法の 2 通りで比較を行っている。

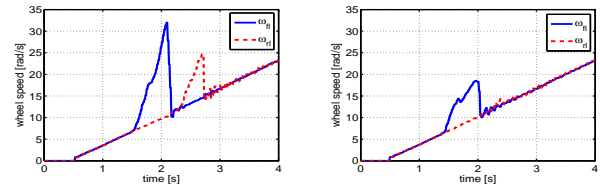
左前後輪の車輪速を比較すると、Fig. 13 より駆動力制御および予見制御による粘着効果を見ることができる。ただし前輪についてはスリップが半分程度にしか低減されていない。これは、駆動力制御インナーのスリップ率制御の帯域が上がらなかったことが原因である。

次に前後輪駆動力、総駆動力に着目すると、Fig. 14(a), Fig. 15(a) に示す制御無しの結果では、前輪、後輪がそれぞれ低 μ 路に乗った際に駆動力の減少が見られる。それに対して提案法では、Fig. 14(b), Fig. 15(b) より前後輪が互いに駆動力を補い合い、総駆動力の減少が抑圧されている。

5. まとめ

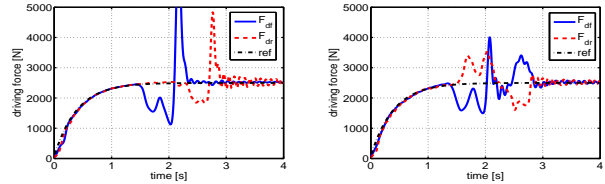
本稿では、前後輪独立駆動可能な電気自動車における、リアルタイムでの最適効率配分制御法について研究成果を報告した。そして本手法により、同量バッテリーで比較した際の航続距離が 18 % 向上することを示した。本手法は走行中に最高効率点を探索するため、モータ、インバータ、車両のパラメータに対してロバストであると考えられる。

また、総駆動力の維持を目的とした前後輪駆動力配分法では、瞬間低 μ 路が存在する場合でも高 μ 路と同様の走行が可能と



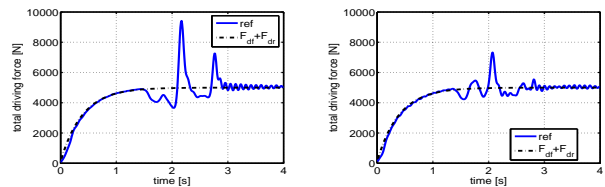
(a) Without control (b) With distribution

Fig. 13 Experimental results : ω_{fl} , ω_{rl}



(a) Without control (b) With distribution

Fig. 14 Experimental results : \hat{F}_{df} , \hat{F}_{dr}



(a) Without control (b) With distribution

Fig. 15 Experimental results : \hat{F}_{dall}

なり、安全性、快適性を向上させることができた。

参考文献

- (1) Y.Hori: Future vehicle driven by electricity and control — research on four-wheel-motored “UOT Electric March II”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.51, No.5, pp.954–962 (2004)
- (2) 勝山悦生: インホイールモータによる非連成 3 D モーメント制御の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.3-11, pp.1–6 (2011)
- (3) 苅込卓明, 伊藤健, 川村弘道, 久米智広: 新開発 E V 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.5-11, pp.5–8 (2011)
- (4) 西原修, 松本大樹: 操舵と制駆動力配分により旋回する電気自動車の低消費電力化, 日本機械学会交通・物流部門大会, No.1315 (2011)
- (5) 藤本博志, 吉村雅貴: 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)
- (6) 藤本博志, 佐藤慎介, 鈴木亨: インホイールモータの高速な回生制動トルク応答を用いた電気自動車の制御, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.8-9, pp.21–24 (2009)
- (7) 藤本博志, 鈴木亨, 角谷勇人: 電気自動車の航続距離延長制御システム, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.53-10, pp.11–14 (2010)
- (8) 江上奨, 藤本博志, 齋藤潤, 半田和功: 走行条件に応じた総合的な効率特性を最適化する電気自動車の前後輪駆動力配分に基づく航続距離延長制御, 計測自動制御学会 12 回制御部門大会予稿集, P0091, (2012)
- (9) 前田健太, 藤本博志, 堀洋一, 齋藤潤, 半田和功: 瞬間低 μ 路での駆動力維持を目的とした車載モータ搭載電気自動車の前後輪駆動力配分法, 計測自動制御学会 12 回制御部門大会予稿集, P0096 (2012)
- (10) C.Chakraborty, Y.Hori: Fast efficiency optimization techniques for the indirect vector-controlled induction motor drives, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.39, No.4, pp.1070–1076 (2003)