

インホイールモータを搭載した電気自動車の総合的な効率特性を最適化する前後輪駆動力配分に基づいた航続距離延長制御

江上奨* , 藤本博志 (東京大学)

Range Extension Control System for Electric Vehicle with In-Wheel Motor Based on Front and Rear Driving Force Distribution with Total Efficiency Optimization for Various Driving Condition
Sho Egami*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Abstract

Electric vehicles (EVs) are more highly efficient than internal combustion engine vehicles. However, EVs have a disadvantage in that the mileage per charge is short. In this paper, a range extension control system (RECS) based on front and rear driving force distribution with total efficiency optimization is proposed. The proposed method based on the search controller decides the optimal driving force distribution ratio to improve the total energy efficiency in vehicles. The algorithm uses “golden section technique” in the process of searching the optimal driving force distribution ratio. The effectiveness of the proposed method is verified by experiments.

キーワード：電気自動車, 駆動力配分制御, 航続距離延長制御システム
(electric vehicle, driving force distribution control, range extension control system)

1. はじめに

近年、環境問題やエネルギー資源問題への対策の一つとして、電気自動車の研究が盛んに行われておりハイブリッド自動車、電気自動車が市販されるに至っている。電気自動車はその駆動力源がモータであり、環境面または車両運動制御の面において優れている。内燃機関と比較したモータの優位的な特徴として以下が挙げられる。

- 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
- 力行および再生制動が可能

これらの特徴を活かして、高速なフィードバック制御を行うことにより内燃機関では実現不可能な高度な運動制御が実現できる。これまで著者らのグループでは、これらの特徴を活かした電気自動車の車両運動制御に関する研究に取り組んできた⁽¹⁾⁽²⁾。一方、電気自動車普及への問題として一充電走行距離の問題が存在する。これは給電設備の不足やバッテリーのエネルギー密度が低いことに起因する。この一充電走行距離問題に関連して様々な研究が行われている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。文献⁽³⁾⁽⁴⁾では、走行モードに適した電力変換方式および構成システムを適用することにより総合効率の向上を目指している。文献⁽⁵⁾では、モータ界磁を可変出来る機構を試作しており、出力状態に応じてモータ界磁を適切に可変させることにより損失の低減を目指している。

また、著者らの研究グループでは電気自動車における航続距離延長制御システム (RECS: Range Extension Control System) を提案してきた⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。本システムは電気自動車の機構を変更することなく、制御のみで航続距離を延長することが出来る。本稿では、電気自動車の総合的な効率特性

を最適化する前後輪駆動力配分に基づいた航続距離延長制御を提案する。本稿の評価対象は、車両の総駆動力から総入力電力までに含まれるスリップ率による損失、モータおよびインバータにおける損失とする。総駆動力から総入力電力までの総合効率が最大となる駆動力配分比を適用することにより、走行時における損失を減少させることが出来る。総合効率が最大となる駆動力配分比は、黄金分割法に基づいた探索制御により決定する⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。本稿で適用した黄金分割法は早い収束性があり、導関数を必要としない。また、総合効率の測定値により総合効率最大点を探索するため、複雑な車両モデルやモータモデルなどを一切必要とせずパラメータ変動の影響を受けない。これにより、車両の総合効率を最大化し航続距離を延長することが出来る。および、探索制御の収束時間短縮を目的として、探索制御と車両モデルより導出した総機械出力を最適化する駆動力配分比を協調させている。そのため、総合効率の最大化と探索制御の収束時間短縮を両立することが出来る。本提案法は各輪独立駆動車および 2 つの車載モータを有する前後輪独立駆動車に適用可能である。本稿では、インホイールモータを搭載した各輪独立駆動車を用いて提案法の有効性を示す。

2. 実験車両

本稿における実験では、本研究室で製作した電気自動車 ‘FPEV2-Kanon’ を使用した。FPEV2-Kanon では、駆動モータとして 4 輪全てに東洋電機製造製アウターロータ型インホイールモータを搭載している。本モータはダイレクトドライブ方式であり、リダクションギアによるバックラッシュの影響がない。バッテリーには 1 モジュールあたり 16[V] のバッテリーを 10 個直列に接続し搭載している。昇圧チョップにより 320[V] まで昇圧した後、各インバータに給電する



(a) FPEV2-Kanon



(b) FrontMotor



(c) RearMotor

図 1 実験車両

Fig. 1. Experimental Vehicle

表 1 車両諸元

Table 1. Vehicle Specification

Vehicle Mass M	854 [kg]
Wheelbase l	1715 [mm]
Distance from Center of Gravity to Front/Rear Axle Tread l_f, l_r	$l_f : 1013$ [mm]
	$l_r : 702$ [mm]
Height of Center of Gravity h_g	0.51 [m]
Front Wheel Inertia J_{wf}	1.24 [Nms ²]
Rear Wheel Inertia J_{wr}	1.26 [Nms ²]
Wheel Radius r	0.302 [m]

システムとなっている。図 1 に車両外観と前後輪インホイールモータを示す。また、表 1 に車両諸元を示す。

3. 車両モデル

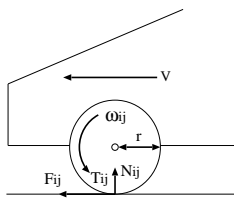


図 2 車輪モデル

Fig. 2. Wheel Model

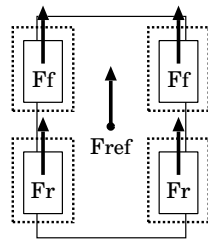


図 3 総駆動力モデル

Fig. 3. Total Driving Force Model

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

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

$$M \dot{V} = F_{ref} \dots \dots \dots (2)$$

$$F_{ref} = F_{fl} + F_{fr} + F_{rl} + F_{rr} \dots \dots \dots (3)$$

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

各変数は ω_{ij} [rad/s]:車輪角速度, V [m/s]:車体速度, $V_{w_{ij}}$

[m/s]:車輪速度, T_{ij} [Nm]:車輪軸周りのトルク, F_{ij} [N]:一輪当たりの駆動力, M [kg]:車両質量, r [m]:タイヤ半径, $J_{w_{ij}}$ [Nms²]:車輪回転部慣性モーメントとする。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 が挿入される。

次にスリップ率について説明する。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。

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

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。本稿において、駆動時のみを想定するため、常に $\max(V_{w_{ij}}, V, \epsilon) = V_{w_{ij}}$ となる。よってスリップ率を式 (6) で表す。

$$\lambda_{ij} = \frac{V_{w_{ij}} - V}{V_{w_{ij}}} \dots \dots \dots (6)$$

摩擦係数はスリップ率 λ_{ij} の関数となっている。また、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} [N] であり式 (7) となる。

$$F_{ij} = \mu_{ij} N_{ij} \dots \dots \dots (7)$$

タイヤが発生する駆動力 F_{ij} はスリップ率 λ_{ij} との関係式として式 (8) で表現することが出来る。

$$F_{ij} = D'_s N_{ij} \lambda_{ij} \dots \dots \dots (8)$$

$$D'_s = \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=0} \dots \dots \dots (9)$$

式 (8) において、係数 D'_s は走行路面によって定まる係数とされており式 (9) で表される。スリップ率 λ_{ij} が微小であるとき、摩擦係数 μ_{ij} は式 (9) に示されるようにスリップ率 λ_{ij} に応じて線形増加する。本稿において想定する路面は高摩擦であり、粘着状態を保持するためスリップ率は微小領域に存在すると考える。そのため、係数 D'_s は定数とする。

並進加速時における車両の荷重変動について述べる。車両が並進加速をしている場合において、前後一輪当たりの垂直抗力 N_f, N_r は式 (10), (11) で表現できる。本稿において左右輪の荷重は等しいものとする。

$$N_f(a_x) = \frac{1}{2} \frac{l_r}{l} M g - a_x M \frac{h_g}{l} \dots \dots \dots (10)$$

$$N_r(a_x) = \frac{1}{2} \frac{l_f}{l} M g + a_x M \frac{h_g}{l} \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 a_x [m/s²]:並進加速度, l_f, l_r [m]:車両重心点から前後輪駆動点までの距離, h_g [m]:重心高である。

4. 前後輪駆動力配分制御

4.1 前後輪駆動力配分モデル 本節では前後輪駆動力配分モデルについて述べる。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は式 (3) で表される。所望の運動を行う場合、車両全体で必要な総駆動力を 4 輪で

満たせば良いため駆動力の配分の組み合わせには自由度がある。本稿では、左右輪の駆動力指令は等しいものとし前後輪間における駆動力配分を行う。

総駆動力 F_{ref} に対する前後 1 輪当たりの駆動力 F_f, F_r 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 1 輪当たりの駆動力 F_f, F_r の関係は式 (12)、式 (13)、式 (14) となる。

$$F_{ref} = F_f + F_r \dots\dots\dots (12)$$

$$F_f = (1 - k_f)F_{ref} \dots\dots\dots (13)$$

$$F_r = k_f F_{ref} \dots\dots\dots (14)$$

なお、駆動力配分比 k_f は力行のみに限定し、 $0 \leq k_f \leq 1$ とする。

4.2 機械出力を最適化する駆動力配分比 本節ではスリップ率および前後輪の垂直抗力を考慮し、総駆動力から総機械出力までの効率を最適化する駆動力配分比を導出する。スリップ率を考慮した車輪軸周りトルクおよび車輪角速度を示す。車輪軸周りトルクは式 (1) より式 (15) で表される。車輪軸周りトルクは、駆動力に起因するトルクと車輪慣性力に起因するトルクの和となる。車輪角速度はスリップ率の定義式 (5) より式 (16) で表される。また、車輪慣性力に起因するトルクは式 (17) で表わされ、スリップ率の関数となる。

$$T_{ij} = rF_{ij} + J_{w_{ij}}\dot{\omega}_{ij} \dots\dots\dots (15)$$

$$\omega_{ij} = \frac{V}{r} \frac{1}{1 - \lambda_{ij}} \dots\dots\dots (16)$$

$$J_{w_{ij}}\dot{\omega}_{ij} = \frac{J_{w_{ij}}}{r} \left(\frac{a_x}{1 - \lambda_{ij}} + \frac{V\dot{\lambda}_{ij}}{(1 - \lambda_{ij})^2} \right) \dots\dots\dots (17)$$

表 1 に示す車両諸元に基づき、総駆動力に対する前後 1 輪当たりのスリップ率、車輪速、車輪軸周りトルクおよび 4 輪における総機械出力を算出した。車両が定速 50 [km/h] で走行しており総駆動力と走行抵抗が釣り合っている場合、また車両が加速度 2.0 [m/s²] で加速し、速度 50 [km/h] を保持した瞬間を想定した。図 4 に駆動力配分比 k_f を変化させた場合の各量を示す。図 4(a) は総駆動力に対する前後輪のスリップ率を示す。前後輪単独駆動時 ($k_f = 1.0, k_f = 0$) のスリップ率が車輪荷重の偏りにより異なることがわかる。特に加速時にその違いは顕著に表れる。このときの車輪速および車輪軸周りトルクは図 4(b)、図 4(c) に示される。車輪軸周りトルクは、定速走行時および加速時においても駆動力に起因するトルクにほぼ依存することになる。また、前後輪の車輪速は前後輪のスリップ率に応じて増減する。車輪軸周りトルクと車輪速から算出した 4 輪における総機械出力を図 4(d)、図 4(e) に示す。ある総駆動力に対して総機械出力が最小になる駆動力配分比が存在することが確認出来る。また、定速走行時と加速走行時では荷重変動の影響により、総機械出力が最小となる駆動力配分比は異なる。

総駆動力に対して総機械出力が最小となる駆動力配分比の導出を行う。車輪軸周りトルクは式 (15) で表されるが、

車輪が粘着であれば駆動力に起因するトルクがほぼ支配的となる。従って、式 (15) における車輪の慣性力に起因するトルク $J_{w_{ij}}\dot{\omega}_{ij} = 0$ とする。式 (8)、式 (13)、式 (14)、式 (15)、式 (16) を考慮し総機械出力を算出すると次式となる。

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{outf} + P_{outr} \\ &= \omega_f T_f + \omega_r T_r \\ &= F_{ref} V \left(\frac{1 - k_f}{1 - \lambda_f} + \frac{k_f}{1 - \lambda_r} \right) \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

$$\lambda_f = \frac{(1 - k_f)F_{ref}}{D'_s N_f} \dots\dots\dots (19)$$

$$\lambda_r = \frac{k_f F_{ref}}{D'_s N_r} \dots\dots\dots (20)$$

式 (18) を駆動力配分比 k_f で偏微分し、 $\frac{\partial P_{out}}{\partial k_f} = 0$ の解を求めることにより総機械出力を最小化する駆動力配分比 $k_{f_{optff}}$ は式 (21) として求められる。

$$k_{f_{optff}}(a_x) = \frac{N_r(a_x)}{N_r(a_x) + N_f(a_x)} \dots\dots\dots (21)$$

4.3 探索制御 本節では、黄金分割法に基づく探索制御について説明する。この探索制御により、車両の総駆動力から総入力電力までの総合効率最適化を行う。総合効率にはスリップ率による損失、モータ損失、インバータ損失などの全ての損失が考慮されている。また、4.2 節の総機械出力を最適化する駆動力配分比と探索制御を協調させることにより探索制御の収束時間短縮を行う。

前後入力電力 P_{inf}, P_{inr} および総入力電力 P_{in} を式 (22)、式 (23) として定義する。

$$P_{inf} = V_{dc} I_{dcf}, \quad P_{inr} = V_{dc} I_{dcr} \dots\dots\dots (22)$$

$$P_{in} = P_{inf} + P_{inr} \dots\dots\dots (23)$$

ここで V_{dc} [V]:インバータ直流電圧, I_{dcf}, I_{dcr} [A]:前後輪インバータ入力電流である。

探索制御におけるフィードバック情報として前後輪モータ効率 η_f, η_r および総合効率 η_{all} を式 (24)、式 (25) と定義する。

$$\eta_f = \frac{F_f V}{P_{inf}}, \quad \eta_r = \frac{F_r V}{P_{inr}} \dots\dots\dots (24)$$

$$\eta_{all} = \frac{F_{ref} V}{P_{in}} \dots\dots\dots (25)$$

式 (24)、式 (25) において、前後輪駆動力 F_f, F_r および総駆動力 F_{ref} はそれぞれ駆動力オブザーバの戻り値を使用する。駆動力オブザーバは式 (1) に基づき、車輪軸周りトルク T_i と車輪角速度 ω_i から駆動力 F_i を推定する。駆動力オブザーバを図 5 に示す。

次に探索方法について説明する。総合的な効率を最適化する駆動力配分比は、黄金分割法に基づく探索制御により決定される。本稿では、評価関数を総合効率 η_{all} とし、駆動力配分比 k_f が取り得る範囲 $[k_{fL}, k_{fH}]$ 内の総合効率最大点を探索する。ここで、駆動力配分比 k_f が取り得る最大の

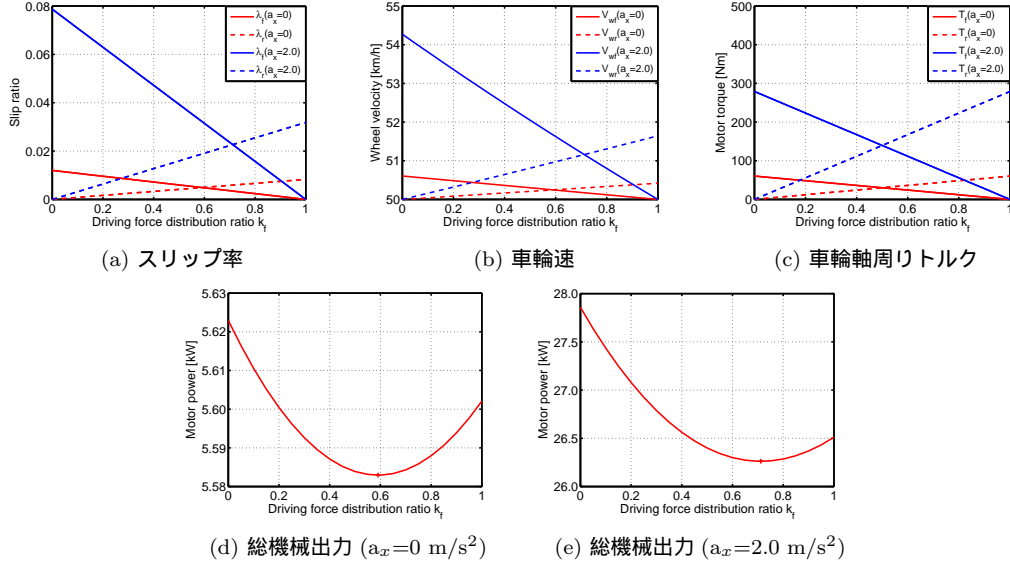


図 4 総駆動力に対する損失算出のシミュレーション
Fig. 4. Simulation of Loss Calculation

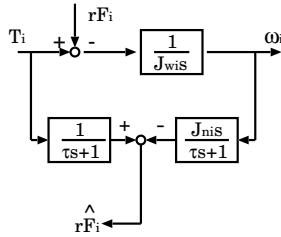


図 5 駆動力オブザーバ
Fig. 5. Driving Force Observer

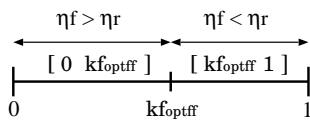


図 6 探索制御初期区間
Fig. 6. Initial Section of Search Algorithm

範囲は $[k_{fL} \ k_{fH}] = [0 \ 1]$ である。

探索時間の短縮のために、4.2 節で導出した総機械出力を最適化する駆動力配分比 $k_{f_{optff}}$ を考慮する。駆動力配分比の取り得る初期範囲を前後輪モータ効率 η_f, η_r から判断し以下のように設定する。前後輪モータ効率 η_f, η_r の評価は探索制御開始時に行われるものとする。この方針を図 6 に示す。

- $\eta_f > \eta_r$ の場合
 $[k_{fL} \ k_{fH}] = [0 \ k_{f_{optff}}]$
- $\eta_f < \eta_r$ の場合
 $[k_{fL} \ k_{fH}] = [k_{f_{optff}} \ 1]$

また、総効率最大点が存在する区間を所望の精度まで絞り込む必要がある。その工程は以下の計算に従う。初期段

階として次の計算を行う。

$$k_{f_{low}} = \alpha k_{fL} + (1 - \alpha) k_{fH} \dots (26)$$

$$k_{f_{high}} = (1 - \alpha) k_{fL} + \alpha k_{fH} \dots (27)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \dots (28)$$

ここで α は黄金分割比と呼ばれる定数である。

次に評価関数である総効率 η_{all} を探索ステップ T_{step} 毎に評価する。 $\eta_{all}(k_{f_{low}}) > \eta_{all}(k_{f_{high}})$ であれば、総効率最大点が存在する新しい区間は $[k_{fL} \ k_{f_{high}}]$ となる。この新しい区間で次式に従い、同様に総効率最大点が存在する区間を絞り込む。

$$k_{fL}[i+1] = k_{fL}[i] \dots (29)$$

$$k_{fH}[i+1] = k_{f_{high}}[i] \dots (30)$$

$$k_{f_{low}}[i+1] = \alpha k_{fL}[i+1] + (1 - \alpha) k_{fH}[i+1] \dots (31)$$

$$k_{f_{high}}[i+1] = k_{f_{low}}[i] \dots (32)$$

逆に $\eta_{all}(k_{f_{low}}) < \eta_{all}(k_{f_{high}})$ であれば、総効率最大点が存在する新しい区間は $[k_{f_{low}} \ k_{fH}]$ となる。この新しい区間で次式に従い、同様に総効率最大点が存在する区間を絞り込む。

$$k_{fL}[i+1] = k_{f_{low}}[i] \dots (33)$$

$$k_{fH}[i+1] = k_{fH}[i] \dots (34)$$

$$k_{f_{low}}[i+1] = k_{f_{high}}[i] \dots (35)$$

$$k_{f_{high}}[i+1] = (1 - \alpha) k_{fL}[i+1] + \alpha k_{fH}[i+1] \dots (36)$$

この工程を繰り返すことにより、効率最大点が存在する区間を小さくしていく。この区間が所望の精度 $k_{f_{high}} - k_{f_{low}} < \epsilon$ まで絞り込んだ段階で探索を終了し、最適駆動力配分比 $k_{f_{opt}}$

を式 (37) により得る。

$$k_{f_{opt}} = \frac{1}{2}(k_{f_{low}} + k_{f_{high}}) \dots \dots \dots (37)$$

以上を考慮したシステムを図 7 に示す。図 7 において、実験におけるノイズの影響を考慮し総合効率および前後輪モータ効率のフィードバック情報はローパスフィルタを通して。このローパスフィルタの時定数は探索ステップ T_{step} より小さい値とする。

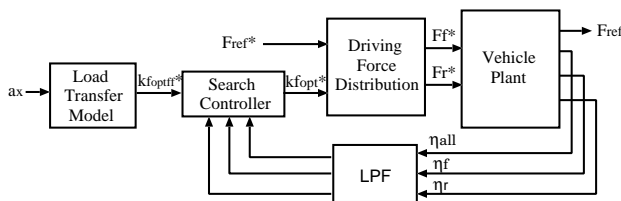


図 7 提案法 システム構成
Fig. 7. Proposed System

5. 実験

提案法の航続距離延長に対する有効性および探索収束の早さを確認するために実験を行った。駆動力配分比の全区間 $[k_{fL} \ k_{fH}] = [0 \ 1]$ を探索するものを提案法 1、図 7 に示すシステムを提案法 2 とする。

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 15 [km/h] で走行するものとした。車体速制御系を図 7 に示すシステムのアウトループに実装し、PI 制御器を用い式 (38) のノミナルプラントに対して極配置設計を行った。また、車体速は車両に搭載された光学センサより測定した。実験において、この車体速制御系がドライバーモデルに相当する。

$$V = \frac{1}{M_s} F_{ref} \dots \dots \dots (38)$$

ここで、車体速制御系の極は $w_n = -1.0$ [rad/s] とした。この車体速制御系により生成される総駆動力を所望の駆動力配分比を満たすように配分する。総合効率および前後輪モータ効率のフィードバック情報はノイズの影響を考慮して、式 (39) のローパスフィルタを通したものを使用した。また、探索制御は探索ステップ $T_{step} = 1.5$ [sec] とし、収束条件 $\epsilon = 0.05$ としている。

$$G(s) = \frac{1}{(0.3s + 1)^2} \dots \dots \dots (39)$$

図 8 に提案法 2 の実験結果を示す。図 8(a)、図 8(b)、図 8(c) より、約 10 [sec] に定常速度となり約 15 [sec] から探索制御を開始している。また、図 8(c) では提案法 2 および提案法 1 を適用した場合の駆動力配分比を示している。探索制御開始以前において、提案法 2 では総機械出力を最適化する駆動力配分比 $k_{f_{opt_{ff}}}$ を適用しており、提案法 1 では駆動力均等配分 ($k_f = 0.5$) を適用している。提案法 2 に

おいて探索制御開始時において $\eta_r > \eta_f$ であるため、区間 $[k_{fL} \ k_{fH}] = [k_{f_{opt_{ff}}} \ 1]$ を探索する。その結果、駆動力配分比 $k_f \simeq 0.83$ に収束している。提案法 1 においてもほぼ同様の駆動力配分比に収束している。このとき、提案法 2 は提案法 1 と比較して 2 ステップ分 3 秒間の探索時間を短縮している。図 8(d) より、総合効率は探索制御開始前と収束後を比較するとある程度向上してことがわかる。しかし、図 8(e) より、総入力電力はあまり変化が見られない。これは走行した路面が厳密に平坦ではなく走行外乱が発生したためである。図 8(f) より、総駆動力が増大しており走行外乱が生じていることが確認できる。

実験は、提案法 1 と提案法 2 でそれぞれ 11 回ずつ測定を行った。このときの最適駆動力配分比、総合効率改善度の分布を図 9、図 10 に示す。また、それぞれの結果の標準偏差 $\pm\sigma$ をエラーバーとして示す。図 9 より、最適駆動力配分比の平均値は提案法 1 と提案法 2 でほぼ一致しており最適値としての妥当性が確認できる。図 10 では提案法 1 と提案法 2 の総合効率改善度を示している。総合効率改善度は、駆動力均等配分適用時 ($k_f = 0.5$) と探索制御収束後の総合効率の差分の平均値であるとする。提案法 1、提案法 2 は平均値として約 8.69 [%]、約 7.20 [%] の総合効率を向上している。

表 2 に kWh 当たりの走行距離を示す。走行距離を消費エネルギーで除することにより求めている。走行外乱の影響を除くために、従来法適用時の車両出力と従来法適用時および提案法適用時の総合効率から消費エネルギーを算出している。この結果、提案法は従来法と比較して 1 [kWh] 当たりで約 2.01 [km] の走行距離を延長している。また、三菱自動車から発売された電気自動車 i-MiEV の 16 [kWh] を仮に想定すると約 32.16 [km] の走行距離が延長している。

表 2 kWh 当たりの走行距離

Table 2. km per kWh

Battery Capacity	Without RECS	With RECS
1kWh	10.63 km	12.64 km
16kWh	170.08 km	202.24 km

6. 結論

本稿では、各輪独立駆動車に総合的な効率特性を最適化する航続距離延長制御システムを適用し、その有効性を実験により示した。車両定速走行時における総合効率を提案法全体の平均として約 7.95 [%] 向上させ、高速な探索制御を実現した。この結果より、本提案法は航続距離延長を目的とした場合に非常に有効であると考えられる。今後の課題として、探索時間の更なる短縮および車両加速時にも適用できる航続距離延長制御システムの提案が挙げられる。

謝辞

最後に本研究の一部は NEDO 産業技術研究助成 (プロジェクト ID:05A48701d) 及び、文部科学省科学研究費補助金 (課題番号, 22246057) によって行われたことを付記する。

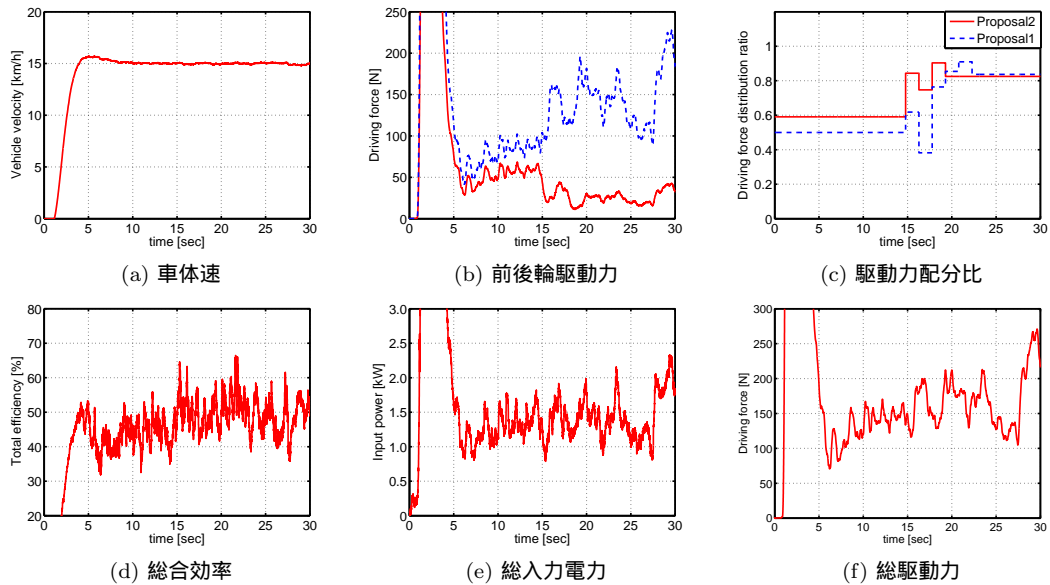


図 8 実験結果 提案法 2
Fig. 8. Experimental Result

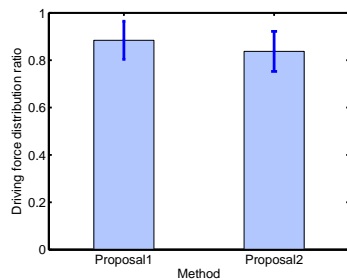


図 9 最適駆動力配分比
Fig. 9. Optimal Driving Force Ratio

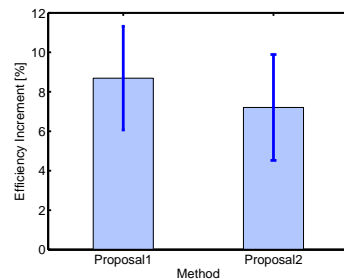


図 10 総合効率改善度
Fig. 10. Total Efficiency Increment

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) 吉村雅貴, 藤本博志: 「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の提案」, 平成 22 年電気学会産業応用部門大会, Vol.2, pp.II-315-II-320, 2010
- (3) 稲坂翔, 河村篤男, 弦田幸憲: 「双方向チョップを用いた電気自動車の高効率電力制御に関する一考察」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, pp.I-667-I-670, 2009
- (4) 弦田幸憲, マーチン・パブロフスキー, 河村篤男: 「中電力応用 SAZZ チョップの高効率化のための改良」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, pp.I-675-I-678, 2009
- (5) 野中剛, 牧野省吾, 平山雅之, 大戸基道: 「可変界磁モータの効率評価」, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, pp.I-91-I-94, 2011
- (6) H.Sumiya, H.Fujimoto: "Range Extension Control System for Electric Vehicle with Active Front Steering and Driving/Braking Force Distribution on Curving Road", in Proc. 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Arizona, pp.2346-2351, 2010.
- (7) 鈴木亨, 藤本博志: 「電気自動車のモータ効率特性を考慮した力行回生配分による航続距離延長制御システムの提案」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-10-019, pp.23-28, 2010
- (8) S.Egami, H.Fujimoto: "Range Extension Control System for Electric Vehicle Based on Front and Rear Driving Force Distribution Considering Load Transfer", in Proc. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, pp.3721-3726, 2011.
- (9) C.-M.Ta, Y.Hori: "Convergence improvement of efficiency-optimized control of induction motor drives", IEEE Trans. Industry Applications, Vol.37, No.6, pp.1746-1753, 2001
- (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