

駆動力最適配分による電気自動車の航続距離延長制御に適した 前後輪モータ減速比最適化法の提案

原田信吾*, 藤本博志 (東京大学),
後藤雄一, 川野大輔 (交通安全環境研究所), 佐藤宏治, 松尾裕介 (小野測器)

Optimization of Front-Rear Motor Reduction Ratio for Range Extension Control System of Electric Vehicles Based on Optimal Driving Force Distribution

Shingo Harada*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Yuichi Goto, Daisuke Kawano (National Traffic Safety and Environment Laboratory)

Koji Sato, Yusuke Matsuo (Ono Sokki Co.,Ltd.)

Abstract

Reduction gear is used for electric vehicles (EVs) for the purpose of efficiency improvement and miniaturization of the motor. In addition, EVs have the advantage that can be equipped with several motors. In this paper, an optimization method of the reduction ratio of each motor is proposed. The proposed method considers front and rear driving force distribution, motor model and vehicle dynamics precisely. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation and bench test.

キーワード：電気自動車, 制駆動力配分, 航続距離延長制御システム, 減速機, 最適化問題
(electric vehicle, driving and braking force distribution, range extension control system, reduction gear, optimization problem)

1. はじめに

地球温暖化対策として温室効果ガスの排出削減が必要であり, そのために環境負荷の少ない電気自動車が注目されている。モータを駆動力に利用する電気自動車は, 内燃機関自動車と比較して以下の優位性を持つ⁽¹⁾。

- トルク応答が内燃機関と比較して2桁速い
- モータの分散配置, 各輪独立制御が可能
- モータ電流からトルクが正確に測定可能

これらの利点を生かしたトラクション制御⁽²⁾や姿勢制御⁽³⁾の研究が盛んに行われている。

電気自動車の普及を阻んでいる課題として, 従来の内燃機関自動車と比較して一充電航続距離が短いという点がある。この課題を解決するために, モータの効率向上を目的とした新しい電磁鋼板に関する研究⁽⁴⁾, 低速域と高速域でモータ特性を変更してモータ効率の高い動作範囲を広くする研究⁽⁵⁾が行われている。モータの省エネルギー駆動の観点では, 加減速駆動時において効率が最大となる回転角速度およびトルクの最適軌道の導出の研究⁽⁶⁾も行われている。また, 図1に示すようにモータの分散配置および各輪独立駆動が可能であるという点を生かしたトルク配分最適化により前後輪でモータ特性が等しい電気自動車の高効率化を行う研究⁽⁷⁾も行われている。

それらに対し, 著者らの研究グループでは, 車両の運動制御で航続距離を向上させ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⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これらのRECSはモータを複数搭載した電気自動車の利点である各輪への駆動力配分を生かし, 前後輪モータに異なる効率特性を持たせて各モータの効率の高い領域を積極的に使用する。上に述べたように, 駆動力配分を適切に行うことで省エネルギー

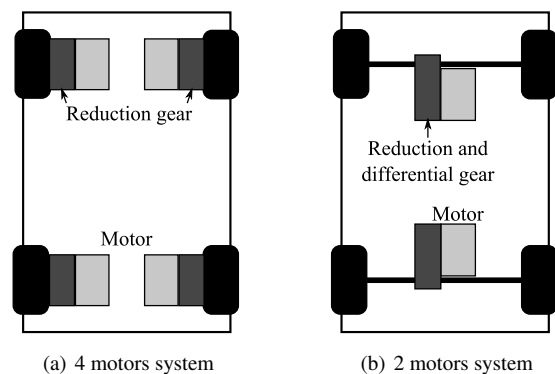


図1 減速機を有するモータを複数搭載した電気自動車
Fig. 1. Electric vehicle with 2 or 4 motors which have reduction gear

化だけではなく車両の安全性や乗り心地の向上が可能である。従って, 今後はモータを複数搭載した駆動力配分が可能である電気自動車が普及すると考えられる。RECSはそのような電気自動車に対して有効であるため, 研究の意義は大きい。

RECSでは与えられた車両システムにおいて車両の運動制御により高効率化を行う。しかし, どのような車両構成がRECSに適しているかの検討は未だに行われていない。

そこで本稿ではRECSに適した車両構成設計法に関する基礎検討として, 前後輪モータの減速比を最適化する。減速機はモータの高効率化・小型化を目的として現在多くの電気自動車に用いられている。モータの減速比の最適化は車輪軸から見たモータ効率の最適化に等しい。したがって, 本提案法を適用し得られたモータ効率特性はモータおよび減速機の設計の指標となり得る。本稿では前後輪減速比の最適化手法を提案し, シミュレーションおよび台上試験により有効性を確認する。

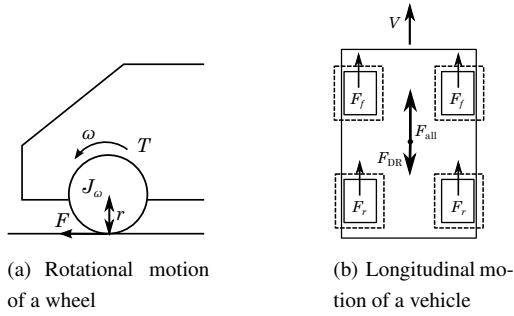


図2 車両モデル
Fig. 2. Vehicle model

2. 車両モデル

〈2・1〉 車両運動モデル 本節では前後輪独立駆動が可能な自動車の車両モデルについて述べる。1輪当たりの回転運動方程式は図2(a)より(1)式で表される。また、本稿では直進走行のみを考慮するため、左右輪の制駆動力は等しいとすると、車両の運動方程式は図2(b)より(2)式で表される。

$$J_{\omega_j} \dot{\omega}_{wj} = T_{wj} - rF_j \dots\dots\dots (1)$$

$$M\dot{V} = F_{all} - F_{DR} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{all} = 2 \sum_{j=f,r} F_j \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ω_{wj} は車輪角速度、 V は車体速度、 T_{wj} は車輪軸周りのトルク、 F_{all} は総制駆動力、 F_j は一輪当たりの制駆動力、 M は車体重量、 r はタイヤ半径、 J_{ω_j} は車輪回転部の慣性モーメント、 F_{DR} は走行抵抗である。ただし、各変数の添え字 j には前輪、後輪を表す文字 f, r が挿入される。

走行抵抗 F_{DR} は(4)式でモデル化する。

$$F_{DR}(V) = \mu_0 Mg + \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 μ_0 は転がり摩擦係数、 ρ は空気密度、 C_d は抗力係数、 A は前方投影面積である。 ρ, A の値はそれぞれ $1.205 \text{ kg/m}^3, 1.2 \text{ m}^2$ とする。

次に、スリップ率 λ_j を車輪速 $V_{\omega_j} = r\omega_{wj}$ と車体速 V により(5)式で定義する。

$$\lambda_j = \frac{V_{\omega_j} - V}{\max(V_{\omega_j}, V, \epsilon)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ϵ は零割防止のための微小定数である。 $|\lambda| \ll 1$ の領域では、 μ は λ に比例する。この傾きをドライビングステイフネスと呼び、 D'_s とおくと、タイヤに発生する駆動力は次式で表される。

$$F_j = \mu_j N_j = D'_s N_j \lambda_j \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 N_j は車両が加速度 a_x で直線運動している時の前後一輪当たりの垂直抗力であり次式で表される。

$$N_f(a_x) = \frac{1}{2} \left(\frac{l_r}{l} Mg - \frac{h_g}{l} Ma_x \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$N_r(a_x) = \frac{1}{2} \left(\frac{l_f}{l} Mg + \frac{h_g}{l} Ma_x \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 l_f, l_r は車両重心点から前後駆動点までの距離、 h_g は重心高である。加速度の向きは加速時を正とする。

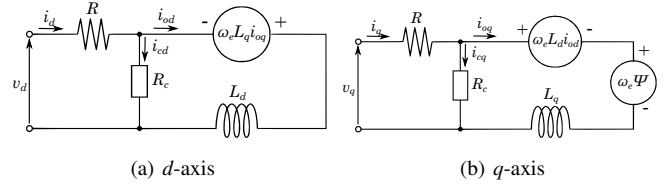


図3 PMSMのdq軸等価回路
Fig. 3. Equivalent circuit of PMSM

〈2・2〉 前後輪制駆動力配分モデル 直進走行を行う場合、必要な総制駆動力を4輪全体で満たせばよい。本稿で想定する電気自動車は前後輪独立駆動が可能であるため、制駆動力の配分に自由度が存在する。総制駆動力 F_{all} の場合の前後1輪当たりの制駆動力 F_j を、前後輪制駆動力配分比 k を導入して以下のように配分する⁽⁹⁾。

$$F_j(k) = \frac{1}{2} \gamma_j(k) F_{all} \dots\dots\dots (9)$$

$$\gamma_j(k) = \begin{cases} 1-k & (j=f) \\ k & (j=r) \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

k は $0 \leq k \leq 1$ の間で変化し、 $k=0$ の場合は前輪駆動となり、 $k=1$ の場合は後輪駆動となる。

〈2・3〉 減速機モデル 次に、減速機モデルについて述べる。モータトルクと車輪トルク、モータ角速度と車輪角速度の関係はそれぞれ(11)式、(12)式となる。

$$T_j = \frac{T_{wj}}{\eta_j g_j} \dots\dots\dots (11)$$

$$\omega_j = g_j \omega_{wj} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 T_j はモータトルク、 ω_j はモータ角速度、 η_j は減速機効率、 g_j は減速比である。本稿では簡易的に η_j は定数とし、減速機の慣性は無視する。

〈2・4〉 モータモデル PMSMのdq軸等価回路⁽¹¹⁾を図3に示す。図3の等価回路より、モータトルクおよびdq軸電流の関係は次式で表される。

$$T_j = P_{nj} \{ \Psi_j i_{oqj} + (L_{dj} - L_{qj}) i_{odj} i_{oqj} \} \dots\dots\dots (13)$$

$$i_{odj} = i_{dj} + \frac{\omega_{ej} L_{qj} i_{oqj}}{R_{cj}(\omega_{ej})} \dots\dots\dots (14)$$

$$i_{oqj} = i_{qj} - \frac{\omega_{ej} (\Psi_j + L_{dj} i_{odj})}{R_{cj}(\omega_{ej})} \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{1}{R_{cj}(\omega_{ej})} = \frac{1}{R_{c0j}} + \frac{1}{R'_{c1j} |\omega_{ej}|} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 P_{nj} は極対数、 Ψ_j は永久磁石による鎖交磁束、 L_{dj} はd軸インダクタンス、 L_{qj} はq軸インダクタンスである。 ω_{ej} はモータの電気角速度であり、 $\omega_{ej} = P_{nj} \omega_j$ である。(16)式は等価鉄損抵抗であり、右辺第一項および第二項はそれぞれ渦電流損失、ヒステリシス損失を表す⁽¹²⁾。

図3よりモータの銅損 P_{cj} および鉄損 P_{ij} は次式で表される。

$$P_{cj} = R_j (i_{dj}^2 + i_{qj}^2) \dots\dots\dots (17)$$

$$P_{ij} = \frac{\omega_{ej}^2}{R_{cj}(\omega_{ej})} \{ (\Psi_j + L_{dj} i_{odj})^2 + (L_{qj} i_{oqj})^2 \} \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 R_j はモータの電機子巻線抵抗である。

(2・5) 入力電力モデル スリップ率 λ が微小でありその変動は十分小さいとすると, (5) 式を一次近似することにより (19) 式, (20) 式を得る。

$$\omega_{wj} = \frac{V}{r}(1 + \lambda_j) \dots \dots \dots (19)$$

$$\dot{\omega}_{wj} = \frac{a_x}{r}(1 + \lambda_j) \dots \dots \dots (20)$$

以上より, 車輪トルク T_{wj} および車輪角速度 ω_{wj} は (1) 式, (6) 式, (9) 式, (19) 式, (20) 式より, それぞれ (21) 式, (22) 式のように配分比 k の関数で表される。

$$T_{wj}(k) = \frac{r}{2} \gamma_j(k) F_{all} + \frac{a_x J \omega_j}{r} \left(1 + \frac{\gamma_j(k) F_{all}}{2 D_s' N_j} \right) \dots \dots \dots (21)$$

$$\omega_{wj}(k) = \frac{V}{r} \left(1 + \frac{\gamma_j(k) F_{all}}{2 D_s' N_j} \right) \dots \dots \dots (22)$$

インバータ損失およびモータの機械損失を無視すると, インバータの入力電力 P_{inj} は次式で表される。

$$P_{inj} = P_{outj} + P_{cj} + P_{ij} \dots \dots \dots (23)$$

ここで, P_{outj} はモータの機械出力であり, (11) 式および (12) 式より次式となる。

$$P_{outj}(k) = \omega_j T_j = \frac{\omega_{wj}(k) T_{wj}(k)}{\eta_j} \dots \dots \dots (24)$$

(13) 式, (14) 式, (15) 式より, i_{oqj}, i_{dj}, i_{qj} は $i_{odj}, T_j, \omega_{ej}$ の関数となる。さらに, T_j, ω_{ej} は (11) 式, (12) 式および (21) 式, (22) 式より k, g_j の関数であるため i_{oqj}, i_{dj}, i_{qj} は次式で表現できる。

$$i_{oqj} := i_{oqj}(i_{odj}, T_j(k, g_j), \omega_{ej}(k, g_j)) = i_{oqj}(i_{odj}, k, g_j) \dots (25)$$

$$i_{dj} := i_{dj}(i_{odj}, T_j(k, g_j), \omega_{ej}(k, g_j)) = i_{dj}(i_{odj}, k, g_j) \dots (26)$$

$$i_{qj} := i_{qj}(i_{odj}, T_j(k, g_j), \omega_{ej}(k, g_j)) = i_{qj}(i_{odj}, k, g_j) \dots (27)$$

したがって, (17) 式, (18) 式に (25) 式, (26) 式, (27) 式を代入することで P_{cj}, P_{ij} は i_{odj}, k, g_j の関数として次式で表される。

$$P_{cj} := P_{cj}(i_{dj}, i_{qj}) = P_{cj}(i_{odj}, k, g_j) \dots \dots \dots (28)$$

$$P_{ij} := P_{ij}(i_{odj}, i_{oqj}) = P_{ij}(i_{odj}, k, g_j) \dots \dots \dots (29)$$

以上より, 車両全体の入力電力 P_{in} は $i_{odf}, i_{odr}, k, g_f, g_r$ の関数として次式で表される。

$$P_{in} := P_{in}(i_{odf}, i_{odr}, k, g_f, g_r) \\ = 2 \sum_{j=f,r} (P_{outj}(k) + P_{cj}(i_{odj}, k, g_j) + P_{ij}(i_{odj}, k, g_j)) \dots (30)$$

3. 前後輪モータ減速比最適化法

(3・1) 問題設定 本稿では固定減速比の減速機を想定し JC08 モードのような車体速度が時系列上で与えられているパターン走行における消費エネルギー最小化を考える。

(3・2) 減速比最適化法

(3・2・1) パラメータ設定 車両・モータ・減速機の各パラメータと減速比 g_j の上限および下限値 g_{jmax}, g_{jmin} を定める。

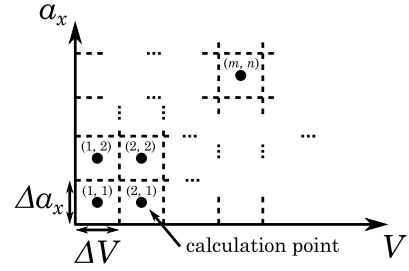


図4 重みマップ生成の概念図
Fig. 4. Conceptual diagram of weight map generation

(3・2・2) 重みマップの生成 走行パターンに基づく重みマップを生成する。図4に重みマップ生成の概念図を示す。始めに与えられた走行パターンから車体速度 V , 加速度 a_x で定まる動作点のあるサンプリング周期でサンプリングする。加速度は速度の差分により求める。ただし, 動作点サンプリングの際速度と加速度が共に0の点は除く。次に, 動作点を $V-a_x$ グラフ上にプロットし, それをいくつかの領域に分割する。分割した領域の代表点についてのみ評価を行うことで計算量を削減する。評価を行う代表点は, 長方形に分割した領域の中心とする。速度 V および加速度 a_x についてそれぞれ $\Delta V, \Delta a_x$ の幅で $N_v \times N_{a_x}$ 個に分割した場合の (m, n) の動作点に対する重み $W^{(m,n)}$ は全領域に対してその領域が占める動作点の割合として次式で定める。

$$W^{(m,n)} = \frac{w^{(m,n)}}{N} \dots \dots \dots (31)$$

ここで, $w^{(m,n)}$ は (m, n) の領域に含まれる動作点の個数, N はサンプリングした動作点の総数である。

(3・2・3) 評価関数の計算

本稿は g_f, g_r を設計変数として最適化するため, 評価関数 J は g_f, g_r の関数として次式で定義する。

$$J(g_f, g_r) = \sum_{m=1}^{N_v} \sum_{n=1}^{N_{a_x}} W^{(m,n)} P_{in_min}^{(m,n)}(g_f, g_r) \dots \dots \dots (32)$$

ただし, $P_{in_min}^{(m,n)}(g_f, g_r)$ は (m, n) の領域の代表点における入力電力であり, 与えられた g_f, g_r に対して制御変数 i_{odf}, i_{odr}, k を最適化した最小値とする。したがって, $\text{grad } P_{in} = \mathbf{0}$ より以下の式を満たす。

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial i_{odj}} = \frac{\partial P_{cj}}{\partial i_{odj}} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial i_{odj}} = 0 \quad (j = f, r) \dots \dots \dots (33)$$

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial k} = \sum_{j=f,r} \left(\frac{\partial P_{outj}}{\partial k} + \frac{\partial P_{cj}}{\partial k} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial k} \right) = 0 \dots \dots \dots (34)$$

(33) 式は前後輪モータそれぞれの最高効率制御⁽¹¹⁾の条件, (34) 式は配分比 k の最適解に関する条件である。本稿では (33) 式および (34) 式を満たした時の k を最適配分比 k_{opt} とする。

(3・2・4) 減速比の最適化

(32) 式の評価関数を最小化する最適解 g_{fopt}, g_{ropt} を求める。本稿では, 滑降シンプレックス法⁽¹³⁾を用いて最適化計算を行う。ただし, 減速比に関する制約条件を満たす解を求めるために以下の変数変換を行う。

$$g_j = \frac{g_{jmax} + g_{jmin}}{2} + \frac{g_{jmax} - g_{jmin}}{2} \sin(z_j) \dots \dots \dots (35)$$

表 1 車両パラメータ

Table 1. Vehicle parameters

Vehicle mass M	854 kg
Wheelbase l	1.715 m
Distance from CG to front/rear axle l_f, l_r	l_f : 1.013 m l_r : 0.702 m
Gravity height h_g	0.51 m
Front and rear wheel inertia J_{ω_j} ($j = f, r$)	1.24 kg · m ²
Wheel radius r	0.302 m

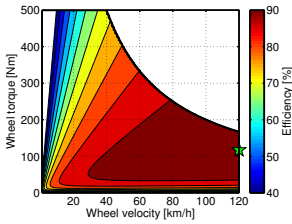


図 5 モータの効率マップ
Fig. 5. Efficiency map of motor

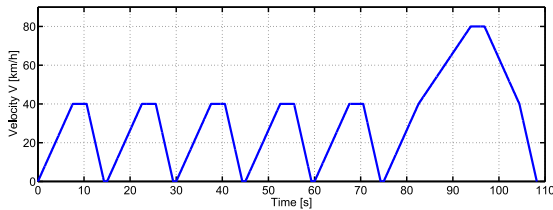


図 6 車体速度指令値 (シミュレーション)
Fig. 6. Reference velocity (simulation)

(35) 式により g_j から z_j に変数変換し z_j について最適解を探索する。

4. シミュレーション

本節では提案法の有効性を確認するために減速比最適化法のシミュレーションを行う。本稿では図 1(a) のように左右前後輪の 4 輪に同一のモータを搭載した車両を考慮する。

〈4・1〉 計算パラメータの決定 シミュレーションに用いる車両パラメータを表 1 に示す。また車輪軸から見たモータの効率マップを図 5 に示す。図 5 の効率マップは減速比が 1 の場合である。図 5 において効率が最大となる点を星印で示す。減速比の下限および上限はそれぞれ $g_{j\min} = 1$, $g_{j\max} = 2.5$ とした。また、高 μ 路上での走行を考え $D'_s = 12$ とした。走行抵抗に関しては、 $\mu_0 = 1.28 \times 10^{-2}$, $C_d = 0.862$, $A = 1.2 \text{ m}^2$ と定めた。

〈4・2〉 走行パターンの決定 シミュレーションで考慮する走行パターンを図 6 に示す。このパターンは最高速度の異なる 2 種類の加減速パターンから構成されており、低速パターンでは加速度は 1.47 m/s^2 、最高速度は 40 km/h 、減速度は -2.94 m/s^2 である。同様に高速パターンでは加速度は順に 1.47 m/s^2 , 0.98 m/s^2 、最高速度は 80 km/h 、減速度は -1.47 m/s^2 , -2.94 m/s^2 である。

〈4・3〉 前後輪減速比最適化のシミュレーション 図 7(a) に図 6 のパターンからサンプリング周期 0.01 s でサンプリングした動作点を示す。図 7(b) に $\Delta V = 5 \text{ km/h}$, $\Delta a_x = 0.25 \text{ m/s}^2$ として生成した図 7(a) の動作点に対する重みマップを示す。

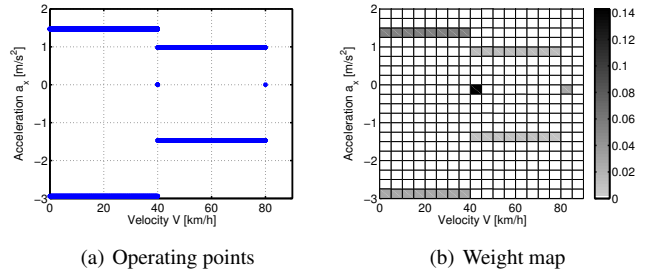


図 7 走行パターンの動作点と重みマップ (シミュレーション)

Fig. 7. Operation points and weight map of test pattern (simulation)

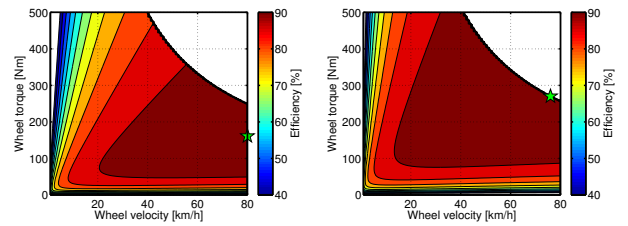


図 8 最適減速比におけるモータ効率マップ

Fig. 8. Efficiency maps of motors with optimal gear ratio

図 7(b) の重みマップを用いた最適化の結果は $g_{f\text{opt}} = 1.425$, $g_{r\text{opt}} = 2.283$ であり、前後輪で異なる減速比となった。前輪モータより後輪モータの減速比が大きいのは、表 1 より $l_f > l_r$ のため後輪荷重が大きく、高トルク出力時に損失となるスリップ率が比較的に小さくなるためである。これらの減速比における前後輪のモータ効率マップを図 8 に示す。図 8 より、前後輪モータで最高効率点が異なっている。減速比を高くすることにより低速度かつ高トルクにおける効率は向上するが高速度低トルク域での効率は低下する。したがって、低速度・高トルク域の効率と高速度・低トルク域の効率はトレードオフの関係にある。

〈4・3・1〉 パターン走行による検証 パターン走行のシミュレーションを行い有効性を確認する。図 6 の走行パターン走行時の最適配分比 k_{opt} を図 9 に示す。図 9 より、減速比が大きい後輪モータの配分が比較的大きい。この理由は図 8 より多くの動作点で減速比の大きい後輪モータの方が前輪モータよりも高効率なためである。加速時には後輪に荷重が移動するため後輪モータの配分がさらに増加する。逆に、減速時や速度が大きい時は減速比の小さい前輪モータの配分が増加する。

パターン走行時の消費エネルギー W_{in} を表 2 に示す。 W_{in} はインバータ入力電力 P_{in} の積分で求めた。比較のため、 $g_f = g_r$ かつ $k = 0.5$ の条件で減速比の値を 1 から 2.5 まで 0.5 刻みで変化させた場合を従来法としてその結果を示す。表 2 より、従来法では $g_j = 2$ の従来法 3 が消費エネルギー最小であり、最適点が存在する。提案法を従来法と比較すると、提案法は従来法 1 よりも大きく消費エネルギーを低減した。また従来法 3 よりもわずかが消費エネルギーを低減している。したがって提案法の有効性が示されている。電池容量を 5.6 kWh とし

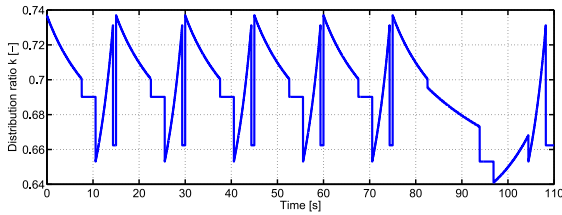


図9 k_{opt} の計算結果 (シミュレーション)
Fig. 9. Calculation result of k_{opt} (simulation)

表2 減速比最適化のシミュレーション結果
Table 2. Simulation results of gear ratio optimization

Case	k	g_f	g_r	W_{in}	Cruising range (5.6 kWh)
conv. 1	0.5	1	1	443.8 kW	42.08 km
conv. 2	0.5	1.5	1.5	367.4 kW	50.83 km
conv. 3	0.5	2	2	356.3 kW	52.42 km
conv. 4	0.5	2.5	2.5	365.3 kW	51.13 km
proposed	k_{opt}	1.474	2.263	355.3 kW	52.56 km

た場合の航続距離を比較すると提案法により従来法と比較して最大 10 km 程度の延長を達成した。

5. 実験

〈5・1〉 実験環境

モータの減速比最適化の効果を簡易実験により実証する。実験には、著者らの研究グループで製作した4輪インホイールモータ駆動の電気自動車 FPEV-2 Kanon を (株) 小野測器の Real Car Simulation Bench (RC-S) に搭載して実施した。RC-S は駆動輪のドライブシャフトに軸受けホイールを取り付けダイナモを接続するので応答速度の速い試験が可能である。また各ダイナモを制御するコントローラ内の車両モデルを変更することで様々な路面状況を想定した試験が可能である。RC-S を用いた実験環境を図 10 に示す。実験においてもシミュレーション同様同一のモータを4輪に搭載した車両を考慮する。しかし、本車両では前後輪のモータ特性が異なる。同一のモータ特性で検証するため、前輪モータトルクを2倍にして車両モデルに入力することにより、2つのモータで4つのモータを搭載した車両を再現した。本研究では車両モデルに(11)式および(12)式で表される減速機を導入し減速比の変化を実現した。また、RC-Sの車両モデルで計算された V, a_x を車両コントローラに入力することで車両の制御を行った。

〈5・2〉 実験条件

RC-S の車両モデルにおいて、車両パラメータ、ドライビングステイフネス、走行抵抗はシミュレーションと同様の値を用いた。ただし、減速機の効率は 100% とした。試験に用いたモータの効率マップを図 11 に示す。実験は図 12 に示す走行パターンを用いて実施した。図 12 のパターンは加速度が 1.47m/s^2 、最高速度が 40km/h 、減速度が -1.47m/s^2 である。図 13(a) に図 12 より 0.01s のサンプリング時間で抽出した動作点を示す。さらに、シミュレーション同様 $\Delta V = 5\text{km/h}$ 、 $\Delta a_x = 0.25\text{m/s}^2$ として図 13(a) より生成した重みマップを図 13(b) に示す。

〈5・3〉 実験結果

実験においては簡易的な減速比最適化法として g_f, g_r を下限の 1 から上限の 2.5 までそれぞれ 20 分割し、それらの格子点について全探索して最適解 g_{fopt}, g_{ropt} を求め

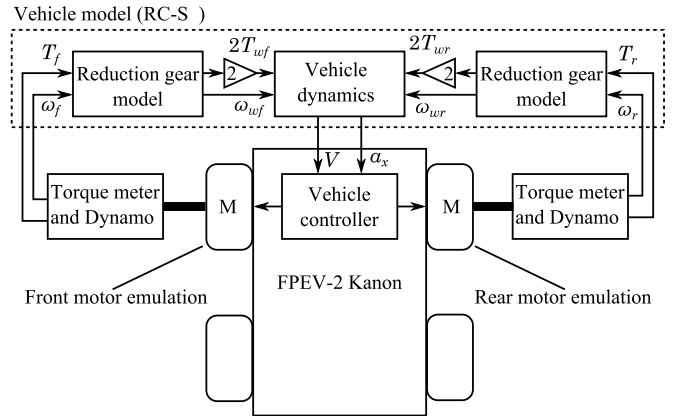


図 10 実験環境

Fig. 10. Experiment environment

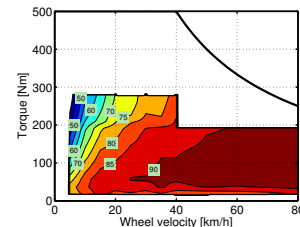


図 11 モータ効率マップ (実験)

Fig. 11. Motor efficiency map (experiment)

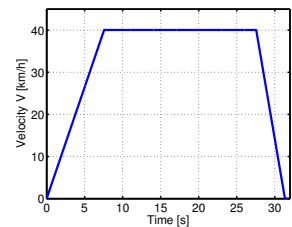
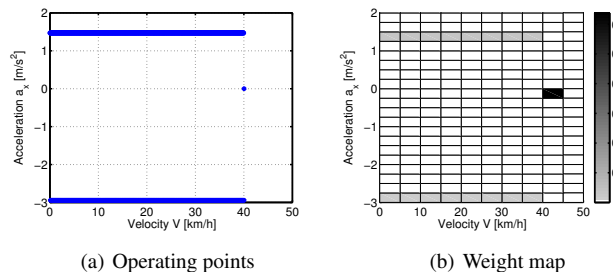


図 12 車体速度指令値 (実験)

Fig. 12. Reference velocity (experiment)



(a) Operating points

(b) Weight map

図 13 走行パターンの動作点および重みマップ (実験)

Fig. 13. Operation points and weight map of test pattern (experiment)

た。この方法で得た解は $g_{fopt} = 1, g_{ropt} = 1.947$ であり、図 13(b) の重みマップを用いて最適化した結果の $g_{fopt} = 1, g_{ropt} = 1.981$ の十分な近似解である。図 14 に最適減速比における前後輪のモータ効率マップを示す。最適減速比がシミュレーションと比較して小さい理由は、図 13(b) においてトルクの小さい低加速

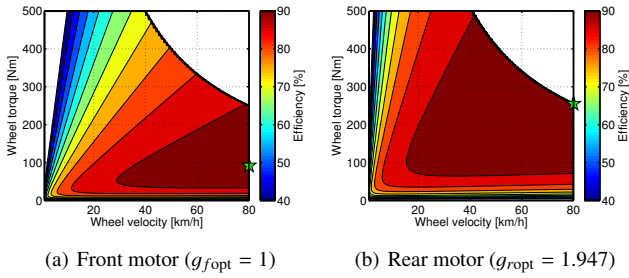


図 14 最適減速比におけるモータ効率マップ

Fig. 14. Efficiency maps of motors with optimal gear ratio

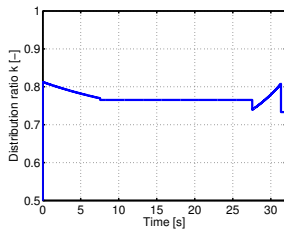


図 15 パターン走行における k_{opt} (実験)

Fig. 15. k_{opt} (pattern driving, experiment)

表 3 減速比最適化の実験結果

Table 3. Experimental results of gear ratio optimization

Case	k	g_f	g_r	W_{in}	Cruising range (5.6 kWh)
conv. 1	0.5	1	1	108.7 kW _s	52.95 km
conv. 2	0.5	1.5	1.5	107.3 kW _s	53.64 km
conv. 3	0.5	2	2	113.3 kW _s	50.80 km
conv. 4	0.5	2.5	2.5	110.5 kW _s	52.08 km
proposed	k_{opt}	1	1.947	104.6 kW _s	55.02 km

度の領域の重みが大きいためである。

図 15 に前後輪減速比を最適化した場合に図 12 のパターン走行を行った際の k_{opt} を示す。図 15 より、後輪モータの配分が大きい。これは、図 14 より後輪モータの減速比が大きく前輪モータより効率が高いためである。40 km/h の一定速走行時はトルクが小さくなるためわずかであるが前輪モータの配分が大きくなる。

表 3 に図 12 のパターン走行を各減速比の組み合わせについて 3 回ずつ測定した際の消費エネルギーの平均値を示す。シミュレーション結果同様、提案法は従来法の中で最良である従来法 2 と比較して消費エネルギーを低減しており、提案法の効果が確認できる。航続距離を比較すると、提案法は従来法と比較して最大 4.2 km の航続距離延長を達成した。

6. 結論

本稿では、前後輪制駆動力配分最適化による航続距離延長制御に適した車両設計の基礎検討として、前後輪モータ減速比の最適化法を提案した。本提案法は制駆動力配分に加え、減速比という冗長性の最適化によりパターン走行時の消費エネルギーを最小化する。本提案法の有効性をシミュレーションおよび台上試験により示した。

本稿ではモータパラメータを既知としたが、モータ設計まで自由度に含めればより航続距離延長制御に適した車両設計

が期待できるため今後の課題とする。

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。

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. IE, Vol. 51, No. 5, pp. 954–962 (2004)
- (2) R. Shirato, T. Akiba, T. Fujita and S. Shimodaira: “A Study of Novel Traction Control Method for Electric Propulsion Vehicle”, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 50, No. 3, pp. 195–200 (2011) (in Japanese)
- (3) N. Ando, H. Fujimoto: “Yaw—rate control for electric vehicle with active front/rear steering and driving/braking force distribution of rear wheels”, in Proc. the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 726–731 (2010)
- (4) H. Toda, Y. Oda, M. Kohno, M. Ishida, and Y. Zaizen: “A New High Flux Density Non—Oriented Electrical Steel Sheet and its Motor Performance”, IEEE Trans. MAGNETICS, Vol. 48, No. 11, pp. 3060–3063 (2012)
- (5) H. Hijikata, T. Shigeta, N. Kariya, K. Akatsu, and T. Kato: “A Study of Dual Winding Method for Compound Magnetomotive Force Motor”, IEEJ Trans. IA, Vol. 133, No. 10, pp. 986–994 (2013) (in Japanese)
- (6) K. Inoue, K. Kotera, Y. Asano, and T. Kato: “Optimal Torque and Rotating Speed Trajectories Minimizing Energy Loss of Induction Motor Under Both Torque and Speed Limits”, in Proc. Power Electronics and Drive Systems, 2013 IEEE 10th International Conference, pp. 1127–1132 (2013)
- (7) X. Yuan, J. Wang: “Torque Distribution Strategy for a Front— and Rear—Wheel—Driven Electric Vehicle”, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 61, No. 8, pp. 3365–3374 (2012)
- (8) H. Fujimoto and H. Sumiya: “Range Extension Control System of Electric Vehicle Based on Optimal Torque Distribution and Cornering Resistance Minimization”, in Proc. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3727–3732 (2011)
- (9) H. Fujimoto, S. Egami, J. Saito, and K. Handa: “Range Extension Control System for Electric Vehicle Based on Searching Algorithm of Optimal Front and Rear Driving Force Distribution”, in Proc. 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4244–4249 (2012)
- (10) H.B. Pacejka and E. Bakker: “The Magic Formula Tyre Model”, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 21, No. 1, pp. 1–18 (1992)
- (11) S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, and T. Hirasaka: “Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives”, IEEE Trans. IE, Vol. 41, No. 5, pp. 511–517 (1994)
- (12) C. Kaido: “Equivalent Circuits for Electrical Steel Cores with Distributed Magnetic Properties”, J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 19, No. 1, pp. 39–44 (1995) (in Japanese)
- (13) J. A. Nelder and R. Mead: “A Simplex Method for Function Minimization”, The Computer Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 308–313 (1965)